



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕΛΕΤΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΟΥ ^{137}Cs ΣΕ
ΒΑΘΙΕΣ ΛΕΚΑΝΕΣ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ

ΠΑΠΠΑ ΦΙΛΟΘΗ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ :
ΧΡΗΣΤΟΣ ΤΣΑΜΠΑΡΗΣ
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :
ΡΟΖΑ ΒΛΑΣΤΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την υλοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας ευχαριστώ θερμά τον ερευνητή του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. και επιβλέποντα της μελέτης Δρα. Χ. Τσαμπάρη, για την συνολική του καθοδήγηση και την υπομονή του, την Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π. και υπεύθυνη αυτής της διπλωματικής κ. Ρόζα Βλαστού, για τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις, και τον Επικ. Καθηγητή του Ε.Μ.Π, κ. Μιχάλη Κόκκορη για την καθοδήγησή του τόσο σε θέματα τεχνικά όσο και θεωρητικά.

Εκφράζω την ιδιαίτερη εκτίμηση και σεβασμό μου στον ερευνητή του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. 'Δημόκριτος' Δρα. Κωνσταντίνο Κάλφα, για την συμβουλευτική και τεχνική βοήθεια σε θέματα λειτουργίας ανιχνευτών αλλά και ανάλυσης δεδομένων.

Ιδιαίτερα επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνεργάτη Διονύση Πατήρη που κομμάτι και της δικής του δουλειάς είναι η εργασία αυτή, καθώς και τον Γιώργο Ελευθερίου για την διαρκή συμπαράσταση και φιλική του βοήθεια κατά την υλοποίηση της εργασίας.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη διαρκή ηθική και υλική στήριξη, απαραίτητο στοιχείο για να ολοκληρωθεί αυτή η διπλωματική, καθώς και σε όλες τις φίλες και φίλους που με βοήθησαν, ο καθένας με το δικό του ιδιαίτερο τρόπο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραδιενέργεια υπήρχε ανέκαθεν και θα συνεχίσει να υπάρχει ως κομμάτι του φυσικού μας περιβάλλοντος. Μέρος όμως της ραδιενέργειας βρίσκεται συνεχώς στο περιβάλλον μας και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες του 20^{ου} και 21^{ου} αιώνα, όπως πυρηνικές δοκιμές, λειτουργία πυρηνικών αντιδραστήρων και διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων. Η μέτρηση και η εξέλιξη των επιπέδων ραδιενέργειας σε ένα οικοσύστημα καθίσταται αναγκαία τόσο για θέματα ραδιοπροστασίας, όσο και για τις επιπτώσεις της περιβαλλοντικής μεταβλητότητας του ίδιου του οικοσυστήματος στον άνθρωπο και γενικότερα στο περιβάλλον του.

Πρωταρχικός σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μέτρηση των επιπέδων ραδιενέργειας ^{137}Cs που υπάρχει στις Ελληνικές Θάλασσες λόγω των πυρηνικών δοκιμών και του ατυχήματος Chernobyl. Επίσης η μελέτη της διάχυσης και μεταφοράς του ^{137}Cs στις βαθιές λεκάνες θα συνεισφέρει σημαντικά στην ερμηνεία και κατανόηση των φυσικών μηχανισμών ανάμειξης νερών που λαμβάνουν χώρα τόσο στο Αιγαίο όσο και στο Ιόνιο Πέλαγος. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν τη ραδιοανίχνευση τριανταέξι θαλάσσιων δειγμάτων συνολικά, τα οποία αντιστοιχούν σε διάφορα βάθη για κάθε λεκάνη. Η συλλογή των δειγμάτων έγινε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος «SESAME» και πραγματοποιήθηκε με το Ωκεανογραφικό Σκάφος «ΑΙΓΑΙΟ» του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε).

Η παρούσα εργασία διαμορφώνεται σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται μία σύντομη αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο, που αποτελεί αναγκαίο κομμάτι για την κατανόηση των εννοιών οι οποίες διαπραγματεύονται στη μελέτη αυτή. Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν στον τόπο της έρευνας και τον τρόπο ανίχνευσης, για να ακολουθήσει το τρίτο μέρος, στο οποίο περιγράφονται οι διαδικασίες της ανάλυσης των αποτελεσμάτων και τα συμπεράσματα που εξάγονται.

Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 1, γίνεται αναφορά στο πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl, το οποίο αποτέλεσε έναν από τους κυριότερους ρύπους στην περιοχή του Αιγαίου Πελάγους και στο πώς η αρνητική αυτή επίπτωση στο περιβάλλον αποτέλεσε έναν εναλλακτικό τρόπο μελέτης των θαλασσίων μαζών για τους ωκεανογράφους, χρησιμοποιώντας το ^{137}Cs ως ιχνηθέτη. Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των πυρηνικών συστημάτων που αφορούν στην πυρηνική ευστάθεια και αστάθεια, οι τρόποι αποδιέγερσης και τα είδη ακτινοβολίας, οι φυσικές ραδιενεργές σειρές και η τεχνητή ραδιενέργεια, σε συνδυασμό με τη μαθηματική ανάλυση των διαδοχικών αποδιεγέρσεων. Τέλος δίδονται μερικά στοιχεία για τις εφαρμογές της ραδιενέργειας εστιάζοντας κυρίως σε εκείνες που αφορούν στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Ακολουθεί το Κεφάλαιο 3, που περιλαμβάνει τα απαραίτητα τοπολογικά στοιχεία του Αιγαίου και Ιονίου Πελάγους, καθώς και τη μεθοδολογία και τις ακριβείς τοποθεσίες της δειγματοληψίας. Η όλη εργασία αφορά σε δύο δειγματοληψίες που έγιναν τον Απρίλιο και τον Αύγουστο του 2008. Την 1η περίοδο έγιναν πέντε δειγματοληψίες: δύο από τις οποίες σε βαθιές λεκάνες (μία στο Βόρειο Αιγαίο με μέγιστο βάθος 1550m και μία στο Νότιο Αιγαίο Πέλαγος με μέγιστο βάθος 1790 m) και άλλες τρεις λεκάνες στην έξοδο των Δαρδανελίων (A2), βορειανατολικά της Λήμνου (NA1) και βορειοδυτικά της Σαμοθράκης (NA8). Την 2^η περίοδο έγιναν τρεις δειγματοληψίες σε βαθιές λεκάνες: στο Νότιο Αιγαίο Πέλαγος (A10), στο Λιβυκό Πέλαγος (L4) και στα στενά των Αντικυθήρων (I1) με μέγιστο βάθος 1805 m, 2902 m και 2151 m, αντίστοιχα. Η συνέχεια του Κεφαλαίου 3 αφορά στην

αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη και την ανίχνευσή της με τα υπάρχοντα ανιχνευτικά συστήματα, που περιλαμβάνει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους, δίνοντας έμφαση στους ανιχνευτές HPGe και NaI(Tl). Στη συνέχεια πριν ακολουθήσει η ολοκλήρωση του κεφαλαίου με την περιγραφή του τρόπου μορφοποίησης των δειγμάτων σε ανιχνεύσιμη μορφή, γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση της ανιχνευτικής διάταξης του HPGe και των χαρακτηριστικών της, καθώς και των απαραίτητων βαθμονομήσεων του ανιχνευτικού συστήματος προκειμένου να συλλεχθούν τα πειραματικά φάσματα.

Στο τρίτο μέρος, αρχικά αναφερόμαστε στα χαρακτηριστικά των δύο διαφορετικών διατάξεων που χρησιμοποιήσαμε, μιας και μέρος των μετρήσεων έγινε στο εργαστήριο του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. και σε αυτό του Ε.Μ.Π. Επιπλέον αναφερόμαστε στη φασματική ανάλυση των πειραματικών φασμάτων, μέσω του προγράμματος SPECTRW. Στο τέλος του Κεφαλαίου 4 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία αυτή. Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη φασματική ανάλυση των δειγμάτων μας και υπολογίστηκαν οι αβεβαιότητες που καθόρισαν τα όρια ακρίβειας αυτών.

Πιο συγκεκριμένα οι μετρήσεις έδειξαν ότι τα μέγιστα επίπεδα ^{137}Cs μετρήθηκαν στο Βόρειο Αιγαίο Πέλαγος και κυρίως στις περιοχές που αλληλεπιδρούν με τα νερά που εκβάλλουν από τα στενά των Δαρδανελίων. Επιβεβαιώνεται ότι η κυκλοφορία του νερού μεταφέρει θαλάσσιες μάζες που εκβάλλονται από τα στενά προς το θαλάσσιο οικοσύστημα της Βόρειας (A1) και Βορειοανατολικής Λήμνου (NA1). Η κυκλοφορία αυτή του νερού δημιουργεί ένα πιο επιβαρυνόμενο οικοσύστημα σε ^{137}Cs (με τιμές από 6 έως 8.5 Bq/m³) στο επιφανειακό στρώμα νερού (0-80m), σε σχέση με άλλες περιοχές του Αιγαίου Πελάγους. Επίσης, τα επίπεδα ραδιενέργειας ^{137}Cs στην έξοδο των Δαρδανελίων ή της Νοτιοανατολικής Λήμνου (A2) είναι χαμηλότερα σε σχέση με της Βόρειας Λήμνου αφού τα νερά των στενών αμέσως μετά την έξοδό τους δεν κατευθύνονται προς τη Νότια Λήμνο. Τα αποτελέσματα αυτά του ^{137}Cs επιβεβαιώνονται και από τιμές θερμοκρασίας και αλατότητας που μετρήθηκαν και αναδεικνύουν ότι τα νερά της περιοχής A2 δεν είναι κατά το ίδιο ποσοστό νερά της Θάλασσας του Μαρμαρά σε σχέση με τις περιοχές της Βόρειας (A1) και Βορειοανατολικής Λήμνου (NA1) αφού παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμοκρασία και υψηλότερη αλατότητα. Τέλος στην περιοχή της βορειοδυτικής Σαμοθράκης (NA8) οι μετρήσεις ήταν χαμηλότερες κατά 20% (με μέση τιμή ^{137}Cs 6.5 Bq/m³) σε σχέση με τις περιοχές A1 και NA1, ενώ οι τιμές της αλατότητας και της θερμοκρασίας ήταν σχεδόν ίδιες.

Όσον αφορά στο Νότιο Αιγαίο Πέλαγος οι τιμές του ^{137}Cs ήταν χαμηλότερες σε σχέση με εκείνες του Βορείου Πελάγους και κυμαίνονται από 3 έως 5 Bq/m³. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το Κρητικό Πέλαγος (A10) όπου οι μετρήσεις ^{137}Cs παρουσίασαν τη μέγιστη τιμή στα επιφανειακά νερά ενώ η ελάχιστη συγκέντρωση παρατηρήθηκε σε βάθη 800 m λόγω της εισβολής θαλάσσιων μαζών που έρχονται από τη Δυτική Μεσόγειο. Επίσης στο Νότιο Κρητικό ή Λιβυκό Πέλαγος (L4) οι τιμές του ^{137}Cs είχαν μέση τιμή 2.7 Bq/m³ κατά μήκος όλης της στήλης νερού. Αντιθέτως στο Ιόνιο Πέλαγος (στενά Αντικυθήρων, I1) οι τιμές ήταν κάτω από το ελάχιστο όριο ανιχνευσιμότητας στα επιφανειακά νερά της βαθιάς λεκάνης. Στην λεκάνη I1 το ^{137}Cs γίνεται εμφανές κάτω από τα 1000m με μέση συγκέντρωση 2.6 Bq/m³ λόγω της απουσίας μηχανισμών ανάμειξης των επιφανειακών νερών με θαλάσσιες μάζες περιέχουν ^{137}Cs . Η παρατήρηση του ^{137}Cs στα βαθιά νερά οφείλεται στην καθίζησή του τα τελευταία χρόνια ύστερα από το ατύχημα του Chernobyl.

Τα δεδομένα ^{137}Cs συσχετίστηκαν με δεδομένα αλατότητας και θερμοκρασίας με σκοπό την διεξαγωγή συμπερασμάτων για την ταυτοποίηση των θαλασσιών μαζών τόσο στο Αιγαίο όσο και στο Ιόνιο Πέλαγος (όπως νερά της Μαύρης Θάλασσας, της Λεβαντίνης, της Δυτικής Μεσογείου και των πυκνών θαλασσιών μαζών). Επίσης τα δεδομένα ^{137}Cs που προέκυψαν στην εργασία αυτή αφορούν σε δεδομένα πριν το ατύχημα της Fukushima και θα αποτελέσουν τη θεμελιώδη βάση δεδομένων για τιμές ^{137}Cs δύο χρόνια πριν το ατύχημα. Σύγκριση των τιμών αυτών με μελλοντικές μετρήσεις θα δώσουν σημαντική πληροφορία για ενδεχόμενη επιρροή του ατυχήματος στις Ελληνικές Θάλασσες.

Παππά Φιλοθέη,
Αθήνα 2011

ABSTRACT

The radioactivity existed always and it will continue existing as piece of our natural environment. Part of the radioactivity in our environment is due to anthropogenic activities of the 20th and 21th century, like nuclear tests, nuclear plants and manipulation of nuclear waste. In every case, it is necessary to measure and monitor the levels of activity in an ecosystem, not only for radioprotection issues, but also to draw conclusions for the environmental changes and their influence to the mankind.

Primary aim of this work is the measurement of ¹³⁷Cs activity levels at Hellenic Seas due to nuclear tests and the Chernobyl accident. Furthermore, the study of diffusion and transfer of ¹³⁷Cs in deep basins will contribute significantly to the explanation and understanding of physical mixing water mechanisms at Aegean and Ionian Sea. The measurements include the radiodetection of thirty-six marine samples, in total, from deep basins and from different depths in each basin. The samples's collection was carried out within the frame of the European project «SESAME» using the Oceanographic Boat «AEGEAN» of Hellenic Centre of Marine Research (H.C.M.R.).

The present work has been structured in three parts. First part refers to the essential theoretical background for the comprehension of significances that negotiates the study. At second part are presented the data that concern the place of research and the way of detection. Afterwards the third part follows, where are described the analysis processes of the results and the configuration of specific conclusions.

Concretely, in Chapter 1, there is a short report concerning the nuclear accident of Chernobyl, which was one of the major contributors at the radio-pollution of Aegean Sea and how this incident became an alternative process for the study of marine masses using ¹³⁷Cs as a tracer. In Chapter 2, is given on the reference the basic characteristics of the nuclear systems referring to the nuclear stability and instability, the ways of deexcitation and the types of radiation, the natural radioactive series and the artificial radioactivity, in combination with the mathematical analysis of successive deexcitation and finally some information are given for the uses of radiation, especially those in the submarine environment.

Chapter 3 follows and consists of the essential topological description of Aegean and Ionian Sea, as well as the methodology and the precise localities of sampling. This work includes two explorations, which were carried out in April and August 2008. In 1st season there were five samplings, two of them from deep basins (one at North Aegean (A1) with bottom depth 1550m and the other at South Aegean Sea (A10) with depth 1790m). The other three basins were at Dardanelles Straits estuary (A2), southeast of Lemnos Island (NA1) and southwest of Samothrace Island (NA8). In 2nd season the samplings were from deep basins of South Aegean Sea (A10) with bottom depth 1805m, Libyan Sea (L4) with bottom depth 2902m and Kythira Straits (I1) with 2151m as bottom depth. Furthermore, the interaction of radiation with matter is presented, along with its implementation for the radiation detection. The main principles and technical characteristics of radiation detectors are described, stressing out the main γ -ray detectors HPGe semiconductor and NaI(Tl) scintillation detector. Detailed presentation is also provided for the detector's calibration so as to collect the experimental data. More information is given for the two detection systems that we used at the laboratory of H.C.M.R and that of N.T.U.A. Furthermore we refer to the spectrum analysis of the experimental spectra with the use of the program

SPECTRW. In the end of Chapter 4 we present the results of detector's calibration, while in Chapter 5, the results of the sample's spectrum analysis and are calculated uncertainties are presented.

The measurements indicate that the maximum ^{137}Cs levels were observed in South Aegean Sea, especially at the regions where waters invade from Dardanelles Straits. This validates that the water circulation transfers water masses through Dardanelles Straits towards the ecosystem of North (A1) and Northeast (NA1) Lemnos Island. The water circulation creates a high ^{137}Cs concentration (6 – 8.5 Bq/m^3) at surface water (0-80m), in comparison with the other regions of Aegean Sea. Furthermore, the levels of ^{137}Cs activity at the estuary of Dardanelles Straits or Southeast Lemnos (A2) were lower than those of North Lemnos, since the waters from Dardanelles Straits are not transferred towards North Lemnos Island. These results are consistent with the measured salinity and temperature for this region and indicate that waters from A2 region do not originate mainly from Black Sea, due to their higher salinity and temperature, in comparison with those from North (A1) and Northeast (NA1) Lemnos Island. As far as the southwest Samothrace Island is concerned, measurements were 20% lower (with mean concentration of ^{137}Cs at 6.5Bq/m^3) than those of regions A1 and NA1, while salinity and temperature were almost stable.

On the other hand, ^{137}Cs concentrations in South Aegean Sea were lower than those of North Aegean and ranged between 3 to 5 Bq/m^3 . Cretan Sea (A10) presents the major interest. The highest concentration was observed on surface waters and the lowest at 800m, due to invasion of water masses from Western Mediterranean. Moreover, in South Cretan or Libyan Sea (L4) the concentrations of ^{137}Cs were about 2.7Bq/m^3 all over the water column. On the contrary, in Ionian Sea, ^{137}Cs could be observed below 1000m with mean value 2.6Bq/m^3 , due to no mixing mechanism of water masses with considerable ^{137}Cs concentration. These data were obtained two years before the accident in Fokushima, so they can be considered as a data base for this period. These data can also be compared with future measurements, and can give us valuable information of potential influence of Fokushima accident to the Hellenic Sea.

Pappa Filothei,
Athens 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	ii
Περίληψη.....	iii-v
Abstract.....	vi-viii
Περιεχόμενα.....	1-2
Πίνακας εικόνων.....	3
Πίνακας σχημάτων.....	4-6
Κατάλογος πινάκων.....	7
Κεφάλαιο Πρώτο.....	8-13
Εισαγωγή	
1.1 Πυρηνικό ατύχημα Chernobyl.....	11-12
1.2 Αιγαίο Πέλαγος και ραδιενέργεια.....	12-13
Κεφάλαιο Δεύτερο.....	14-33
Θεωρητικό μέρος	
2.1 Πυρηνική ευστάθεια.....	14-16
2.2 Πυρηνική αποδιέγερση.....	17-21
2.2.1 Διάσπαση-α.....	17-18
2.2.2 Διάσπαση-β.....	18-19
2.2.3 Διάσπαση-γ.....	20-21
2.3 Ραδιενέργεια και νόμοι διαδοχικής αποδιέγερσης.....	21-24
2.3.1 Αλυσίδες διασπάσεων.....	23-24
2.4 Φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια.....	24-27
2.5 Ανίχνευση ακτινοβολίας γ.....	27-30
2.5.1. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.....	28-29
2.5.2 Σκέδαση Compton.....	29-30
2.5.3 Δίδυμη γένεση.....	30
2.6 Εφαρμογές ραδιενέργειας.....	31-32
2.7 Εφαρμογές ραδιενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον.....	32-33
Κεφάλαιο Τρίτο.....	34-60
Υλικά και μέθοδος	
3.1 Δειγματοληψία και δειγματοποίηση.....	34-39
3.1.1 Τοπολογικά χαρακτηριστικά.....	35-36
3.1.2 Μέθοδος δειγματοληψίας.....	36-39
3.2 Χημική επεξεργασία δειγμάτων.....	40-41
3.3 Ανιχνευτική Διάταξη.....	42-60
3.3.1 Ανιχνευτές ακτινοβολίας.....	42
3.3.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	42-45
3.3.1.2 Είδη ανιχνευτών.....	45-48
3.3.1.3 Σύγκριση ανιχνευτή ημιαγωγών HPGe και σπινθηριστών NaI.....	48-50
3.3.1.4 Πειραματική διάταξη ανίχνευσης.....	50-55
3.3.2 Βαθμονομήσεις ανιχνευτικής διάταξης.....	55-59
3.3.3 Ελάχιστη Ανιχνευόμενη Ενεργότητα (MDA).....	59-60

Κεφάλαιο Τέταρτο.....61-77

Διαδικασία ανάλυσης

4.1 Ανιχνευτές HPGe.....	61-64
4.1.1 Εργαστήριο ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.....	61-62
4.1.2 Εργαστήριο ΕΜΠ.....	62-63
4.1.3 Σύγκριση των δύο ανιχνευτικών διατάξεων.....	63-63
4.2 Φασματική ανάλυση δειγμάτων.....	64-65
4.3 Βαθμονομήσεις (αποτελέσματα).....	65-73
4.3.1 Ανιχνευτικό σύστημα ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.....	65-68
4.3.2 Ανιχνευτικό σύστημα ΕΜΠ.....	68-73
α) 1 ^η Περίοδος Μέτρησης (Απρίλιος 2011).....	68-71
β) 2 ^η Περίοδος Μέτρησης (Μάιος 2011).....	71-73
4.4 Ελάχιστη Ανιχνευόμενη Ενεργότητα (MDA).....	73-77

Κεφάλαιο Πέμπτο.....77-98

Αποτελέσματα

5.1 Ποσοτικοποίηση δεδομένων.....	78-79
5.2 Υπολογισμός αβεβαιοτήτων.....	80-81
5.3 Παρουσίαση δεδομένων.....	81-98
5.3.1 1 ^η περίοδος δειγματοληψίας (Άνοιξη 2008).....	81-91
α) Βαθιά Λεκάνη Βορείου Αιγαίου Α1 (Βόρεια Λήμνος).....	81-83
β) Λεκάνη Α2 (Εξοδος Δαρδανελίων).....	84-85
γ) Λεκάνη ΝΑ1 (Βορειανατολική Λήμνος).....	86-87
δ) Λεκάνη ΝΑ8 (Βορειοδυτική Σαμοθράκη).....	88-89
ε) Βαθιά Λεκάνη Νοτίου Αιγαίου Α10 (Βόρεια Κρήτη).....	90-91
5.3.2 2 ^η περίοδος δειγματοληψίας (Καλοκαίρι 2008).....	92-98
α) Βαθιά Λεκάνη Νοτίου Αιγαίου Α10 (Βόρεια Κρήτη).....	92-94
β) Βαθιά Λεκάνη Ιονίου Πελάγους Π1 (στενά Αντικυθήρων)....	95-96
γ) Βαθιά Λεκάνη Λιβυκού Πελάγους L4.....	97-98

Κεφάλαιο Έκτο.....99-100

Συμπεράσματα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....101

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....102-104

ΓΛΩΣΣΑΡΙ.....105

Βιβλιογραφία..... 106-108

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.1: Συντελεστής εξασθένησης της ακτινοβολίας-γ συναρτήσει της ενέργειας για διάφορα υλικά [GIL 08]

Κεφάλαιο 3

Εικόνα 3.1: Απεικόνιση σε χάρτη των σημείων δειγματοληψίας στο Αιγαίο Πέλαγος

Εικόνα 3.2: Το πλοίο του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. «Αιγαίο»

Εικόνα 3.4: Ροζέτα

Εικόνα 3.5: Συντεταγμένες και βασικά στοιχεία των σημείων-δειγμάτων

Εικόνα 3.6: Αριστερά η πειραματική ανιχνευτική συσκευή HPGe του ΕΜΠ στην οποία μετρήθηκαν τα δείγματα της δεύτερης περιόδου (Αύγουστος 2008).

Εικόνα 3.7: Δεξιά η πειραματική ανιχνευτική συσκευή HPGe του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., στην οποία μετρήθηκαν τα δείγματα της πρώτης περιόδου (Απρίλιος 2008).

Εικόνα 3.8: Φωτογραφία του πειραματικού πλαισίου NIM με τον πυκνωτή, το τροφοδοτικό υψηλής τάσης και τον ενισχυτή. Στο κάτω μέρος φαίνεται ο παλμογράφος [ELE 05]

Εικόνα 3.9(αριστερά): Αρχική μορφή δειγμάτων. Στην εικόνα φαίνεται και το δοχείο ογκομέτρησης.

Εικόνα 3.10(δεξιά): Τα 15 gr AMP και στο πίσω μέρος η μαγνητική ανάδευση.

Εικόνα 3.11 (αριστερά): Το 1ml ^{134}Cs που χρησιμοποιούμε ως έλεγχο για τη χημική απόδοση της μεθόδου μας.

Εικόνα 3.12 (δεξιά): Τελική μορφή δειγμάτων. Έχει προστεθεί πούδρα (talk) ώστε να γεμίσει το τελικό δοχείο και να μην χαλάσει η γεωμετρία του δείγματος

Κεφάλαιο 4

Εικόνα 4.1: Η πειραματική ανιχνευτική συσκευή HPGe του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (αριστερά), στην οποία μετρήθηκαν τα δείγματα της πρώτης περιόδου (Απρίλιος 2008). Στη δεξιά εικόνα φαίνεται η κατακόρυφη θωράκιση του ανιχνευτή

Εικόνα 4.2: Η πειραματική ανιχνευτική συσκευή HPGe του ΕΜΠ (αριστερά), στην οποία μετρήθηκαν τα δείγματα της πρώτης περιόδου (Αύγουστος 2008). Στη δεξιά εικόνα φαίνεται η κατακόρυφη θωράκιση του ανιχνευτή.

Εικόνα 4.3: Τα πειραματικά σημεία των ενεργειακών κορυφών του ^{152}Eu όπως μετρήθηκαν από τον ανιχνευτή, και η αντίστοιχη μορφή της καμπύλης της απόδοσης.

Εικόνα 4.4: Αριστερά φαίνονται οι καμπύλες των αποδόσεων για τους δύο ανιχνευτές, ενώ δεξιά ο λόγος τους για τους ανιχνευτές HCMR / NTUA

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1: Η μεταβολή της μέσης ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο B/A συναρτήσει του μαζικού αριθμού A [ΓΑΖ 02]

Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Segre. Η κοιλάδα σταθερότητας [ΑΣΗ 02]

Σχήμα 2.3: Μεταστοιχείωση μεταξύ ισοβαρών πυρήνων μέσω αποδιέγερσης-β. (α)πυρήνες με περιττό A ($A=135$) (β)πυρήνες με άρτιο A ($A=136$) [ΑΣΗ 02]

Σχήμα 2.4: Διάσπαση με εσωτερική μετατροπή (IC)

Σχήμα 2.5: Χρονική εξέλιξη ενός ραδιενεργού δείγματος με μέσο χρόνο ζωής τ . Η αρχική κλίση της καμπύλης (διακεκομμένη γραμμή) τέμνει τον άξονα του χρόνου στην τιμή τ . Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη αποδιέγερσης είναι ίσο με το πλήθος των ασταθών πυρήνων [ΑΣΗ 02]

Σχήμα 2.6: Αλυσίδα ραδιενεργούς αποδιέγερσης τριών πυρήνων [LEO 87]

Σχήμα 2.7: Λόγος ενεργοτήτων θυγατρικού προς μητρικό πυρήνα. Στην καμπύλη (α) έχουμε μεταβατική ισορροπία και στην (β) διαρκή ισορροπία [LEO 87]

Σχήμα 2.8: Η ραδιενεργός σειρά του Θορίου ($4n$).

Σχήμα 2.9: Η ραδιενεργός σειρά του Ποσειδωνίου ($4n+1$).

Σχήμα 2.10: Η ραδιενεργός σειρά του Ουρανίου ($4n+2$).

Σχήμα 2.11: Η ραδιενεργός σειρά του Ακτινίου ($4n+3$).

Σχήμα 2.12: Σχηματική αναπαράσταση σκέδασης Compton [GIL 08].

Σχήμα 2.13: Σχετική συνεισφορά της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης, της σκέδασης Compton και της δίδυμης γένεσης ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων [ΓΑΖ 02].

Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1: Γεωμετρία πηγής ισotόπου και ανιχνευτή με επιφάνεια S σε απόσταση R ορίζοντας στερεά γωνία $\Omega = S/R^2$. [ΒΛΑ 03]

Σχήμα 3.2: Ενεργειακή διακριτική ικανότητα για έναν ανιχνευτή παλμών. [EHM & VAN 91]

Σχήμα 3.3: Περιοχές λειτουργίας ενός ανιχνευτή αερίων [EHM & VAN 91]

Σχήμα 3.4: Σχηματικό διάγραμμα στερεού κρυστάλλου σπινθηριστού συνδεδεμένου μέσω οπτικής διόδου με ένα φωτοπ/λασιαστή [EHM & VAN 91]

Σχήμα 3.5: Εξάρτηση της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή NaI(Tl) σε συνάρτηση με την ενέργεια των ανιχνευόμενων ακτίνων-γ για διάφορες διαστάσεις του κρυστάλλου [KNO 89].

Σχήμα 3.6: Σύγκριση φασμάτων ίδιου δείγματος από ανιχνευτή HPGe και NaI(Tl). [KNO 89]

Σχήμα 3.7: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των δειγμάτων.

Σχήμα 3.8: Γράφημα διατομής κρυστάλλου Ge με ενσωματωμένο προενισχυτή [KNO 89].

Σχήμα 3.9 : Φωτογραφία και γενικό σχεδιάγραμμα του κρυστάτη (δοχείο Dewar) ανατροφοδότησης του ανιχνευτή. Σε τομές διακρίνονται διάφορες λεπτομέρειες. [KNO 89]

Σχήμα 3.10: Το πειραματικό ενεργειακό φάσμα, της πηγής βαθμονόμησης Eu, με σημειωμένες τις ευκρινότερες φωτοκορυφές με τις αντίστοιχες ενέργειες, μετά την ενεργειακή του βαθμονόμηση [ELE 05].

Σχήμα 3.11: Χαρακτηριστικό φάσμα των μετρήσεών μας στο οποίο φαίνονται οι κορυφές $^{134/137}\text{Cs}$ τις οποίες αναλύσαμε και οι κορυφές ^{40}K και ^{214}Pb με τις οποίες κάναμε την ενεργειακή βαθμονόμηση του φάσματος.

Κεφάλαιο 4

Σχήμα 4.1: Γραφική παράσταση της ενέργειας των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει του αντίστοιχου καναλιού. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτή για σημειακή πηγή σε απόσταση 25 cm.

Σχήμα 4.2: Καμπύλη ενεργειακής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτικού συστήματος για σημειακή πηγή σε απόσταση 25 cm και για εκτεταμένες πηγές νερού 2 L και 0.6 L σε επαφή με τον ανιχνευτή.

Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση της ενέργειας των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει του αντίστοιχου καναλιού. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτή.

Σχήμα 4.4: Γραφική παράσταση του FWHM των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει της ενέργειας τους. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση της βαθμονόμησης της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

Σχήμα 4.5: Γραφική παράσταση της απόλυτης απόδοσης των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει της ενέργειας τους. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση της βαθμονόμησης της ανιχνευτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

Σχήμα 4.6: Γραφική παράσταση της ενέργειας των 7 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει του αντίστοιχου καναλιού. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτή.

Σχήμα 4.7: Γραφική παράσταση του FWHM των 7 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει της ενέργειας τους. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση της βαθμονόμησης της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

Σχήμα 4.8: Γραφική παράσταση της απόλυτης απόδοσης των 7 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει της ενέργειας τους. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση της βαθμονόμησης της ανιχνευτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

Σχήμα 4.9: Χαρακτηριστικό φάσμα των μετρήσεών μας, στο οποίο φαίνονται η κορυφή ^{137}Cs την οποία αναλύσαμε και οι κορυφές ^{40}K και ^{214}Pb με τις οποίες κάναμε την ενεργειακή βαθμονόμηση του φάσματος.

Σχήμα 4.10: Το φάσμα του υποβάθρου.

Σχήμα 4.11: Φάσμα στο οποίο φαίνεται η κορυφή του ^{137}Cs (καθαρά) πάνω από το υπόβαθρο.

Σχήμα 4.12: Φάσμα στο οποίο δεν φαίνεται καθαρά η κορυφή του ^{137}Cs πάνω από το υπόβαθρο

Σχήμα 4.13: Στο άνωθεν σχήμα φαίνονται τα φάσματα των μετρήσεων από το εργαστήριο του Ε.Μ.Π. και του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ.. Το φάσμα των μετρήσεων που έγιναν στο Ε.Μ.Π. παρουσιάζει μικρότερο υπόβαθρο λόγω της καλύτερης θωράκισης.

Κεφάλαιο 5

Σχήμα 5.1: Το σφάλμα της απόλυτης απόδοσης για την περίοδο του Απριλίου (αριστερά) και Μαΐου (δεξιά) 2011.

Σχήμα 5.2: Κάθετη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ^{137}Cs για τη βαθιά λεκάνη A1 (περίοδος 1)

Σχήμα 5.3: Κάθετη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ^{137}Cs για την έξοδο των Δαρδανελίων (A2) (περίοδος 1)

Σχήμα 5.4: Κάθετη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ^{137}Cs για τη βαθιά λεκάνη A10 (περίοδος 1)

Σχήμα 5.5: Κάθετη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ^{137}Cs για τη Βορειοανατολική Λήμνο (NA1) (περίοδος 1)

Σχήμα 5.6: Κάθετη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ^{137}Cs για τη Βορειοδυτική Σαμοθράκη (NA8) (περίοδος 1)

Σχήμα 5.7: Κάθετη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ^{137}Cs για τη βαθιά λεκάνη A10 (περίοδος 2)

Σχήμα 5.8: Κάθετη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ^{137}Cs για τη βαθιά λεκάνη I1 (περίοδος 2)

Σχήμα 5.9: Κάθετη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ^{137}Cs για τη βαθιά λεκάνη L4 (περίοδος 2)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 1.1: Σύγκριση των εκτιμήσεων που έγιναν το 1986 και 1995 της κύριας παραγόμενης δόσης ραδιονουκλιδίων που εκλύθηκαν στο Chernobyl [EI&GE 97].

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1: Οι τέσσερις ραδιενεργές σειρές [ΑΣ 02].

Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3.1: Συντεταγμένες και στοιχεία δειγματοληψίας

Πίνακας 3.3 : Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του φάσματος των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu .

Πίνακας 3.2: Κυριότερες ενέργειες ακτίνων- γ με την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης ανά 100 διασπάσεις κατά τη διάσπαση των ραδιονουκλιδίων ^{152}Eu και ^{154}Eu .

Κεφάλαιο 4

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή HPGe GEM-FX8530P4

Πίνακας 4.2: Τα ηλεκτρονικά που χρησιμοποιήθηκαν με τον ανιχνευτή HPGe για τις δύο ανιχνευτικές διατάξεις.

Πίνακας 4.3: Στην αριστερή στήλη φαίνονται οι ενεργειακές κορυφές του ^{207}Bi και ^{152}Eu , και πιο δίπλα τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την απόδοση με το πειραματικό σφάλμα που τους αναλογεί.

Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικός πίνακας για τις παραμέτρους της απόδοσης της γεωμετρίας που μελετάμε.

Πίνακας 4.5 : Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του φάσματος των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu

Πίνακας 4.6 : Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του φάσματος των 7 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu

Πίνακας 4.7: Τα θεωρητικά αποτελέσματα της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ενεργότητας για τα δείγματά μας.

Κεφάλαιο 5

Πίνακας 5.1: Οι ενεργότητες που προσδιορίστηκαν για τα διάφορα βάθη και η χημική απόδοση της μεθόδου μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιστορία μάς έχει διδάξει κατά καιρούς ότι οι κοινωνίες είναι αλληλένδετες μεταξύ τους και οι αλλαγές που τυχόν συμβαίνουν σε μία από αυτές, αργά ή γρήγορα θα επηρεάσουν και τις υπόλοιπες με έμμεσο ή άμεσο τρόπο. Τέτοια φαινόμενα λαμβάνουν χώρα και στον περιβάλλοντα χώρο στον οποίο ζούμε και μας φιλοξενεί. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες που έχουν γίνει στο 20^ο και 21^ο αιώνα έχουν αλλάξει πολύ τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που καθορίζουν την ποιότητα του περιβάλλοντος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι πυρηνικές δοκιμές τη δεκαετία του '60, οι οποίες παρόλο που έλαβαν χώρα στον Ειρηνικό Ωκεανό, αρκετά μακριά από τη Μεσόγειο, γίνονται εμφανείς σε μετρήσεις που έχουν γίνει στο θαλάσσιο περιβάλλον. Γνωρίζοντας τη συνεχή αυτή αλληλεπίδραση, οι επιστήμονες έχουν ασχοληθεί εδώ και αρκετές δεκαετίες με τη μελέτη και το διαρκή έλεγχο των συγκεντρώσεων από φυσικά ή τεχνητά ραδιονουκλίδια, με σκοπό τόσο τη ραδιοπροστασία που μας αφορά άμεσα, όσο και για την παρατήρηση φαινομένων που συμβαίνουν στο περιβάλλον και είναι δυνατόν να μελετηθούν μέσω αυτής της έρευνας. Πέρα από τον Ειρηνικό Ωκεανό, περιοχές όπως η Κασπία, η Μαύρη και η Μεσόγειος Θάλασσα παρουσιάζουν αξιόλογο ενδιαφέρον διότι επηρεάστηκαν από το ατύχημα του Chernobyl. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει μία σύντομη παρουσίαση των μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί στις περιοχές αυτές.

Στο Νότιο Ειρηνικό Ωκεανό μελετήθηκαν οι συγκεντρώσεις του ¹³⁷Cs μέσω φασματοκοπίας-γ χρησιμοποιώντας έναν χαμηλού υποβάθρου ανιχνευτή Ge (Γερμανίου) [YAM 07]. Τα θαλάσσια δείγματα ελήφθησαν από λεκάνες της ανατολικής Καρολίνας, της Κοραλλιογενούς Θάλασσας (Coral Sea), του New Herbrides, Νότια των Φίτζι και της Θάλασσας της Τασμανίας. Οι ενεργότητες κυμάνθηκαν από 1.4-2.3 Bq/m³ για τα βάθη 0-250m και μειώνονταν εκθετικά για τα βάθη 250-1000m. Η κατακόρυφη κατανομή του ¹³⁷Cs δεν διαφοροποιήθηκε σημαντικά σε κάθε έναν από τους έξι διαφορετικούς σταθμούς δυτικά του Νοτίου Ειρηνικού Ωκεανού. Όμως παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη διαφορά στην κατακόρυφη κατανομή της ενεργότητας του ¹³⁷Cs μεταξύ της λεκάνης της ανατολικής Καρολίνας και του σταθμού μελέτης GEOSECS (Geochemical Ocean Sections Study) που βρισκόταν στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος του Ισημερινού. Η επιφανειακή συγκέντρωση (ολοκλήρωση ως προς το βάθος) του ¹³⁷Cs αυξήθηκε για τα διαστήματα βάθους 100-1000m από 400 ± 30 Bq m⁻² σε 560 ± 30 Bq m⁻² κατά τη χρονική περίοδο 1973-1992. Οι συνολικές συγκεντρώσεις του ¹³⁷Cs δυτικά του Νοτίου Ειρηνικού Ωκεανού κυμάνθηκαν από 850 ± 70 Bq m⁻² στη λεκάνη της Κοραλλιογενούς Θάλασσας και 1270 ± 90 Bq m⁻² σε εκείνη Νότια των Φίτζι. Οι συγκεντρώσεις αυτές βρέθηκαν 1.9-4.5 φορές υψηλότερες από τη αναμενόμενη τιμή που εκτιμάται μέσω της ατμοσφαιρικής απόθεσης λόγω των πυρηνικών δοκιμών. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην εσωτερική διασπορά ¹³⁷Cs (inter-hemisphere dispersion) από το βόρειο στο νότιο κομμάτι της στρατόσφαιρας και την επακόλουθη εναπόθεση, καθώς και την θαλάσσια μεταφορά του ¹³⁷Cs από το Βόρειο Ειρηνικό Ωκεανό στο δυτικό μέρος του Νοτίου Ειρηνικού.

Παρόμοια μελέτη έγινε στον κόλπο (εκβολή ποταμού) του Νοτίου Σαν Φρανσίσκο και στα παράκτια επιφανειακά νερά στο Baja της Καλιφόρνια [VOL 02]. Συγκεκριμένα προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις του ¹³⁷Cs και κάποιων στοιχείων από την ομάδα των σπανίων γαιών σε αιωρούμενα και διαλυμένα υλικά στο θαλασσινό νερό, κατά μήκος της βαθμίδας της αλατότητας στον κόλπο του Βορείου Σαν Φρανσίσκο. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν οι σπάνιες γαίες είναι για να

διαχωριστούν τα αιωρούμενα υλικά και διαλυμένα μέρη από εκείνα που προήλθαν από το θαλάσσιο περιβάλλον. Υπολογίστηκε ότι περίπου $1 - 4 \cdot 10^{10}$ Bq ^{137}Cs μετακινούνται ετήσια μέσω των αιωρούμενων υλικών διαμέσου του κόλπου. Επιπροσθέτως, μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις του ^{137}Cs στα επιφανειακά νερά του Baja της Καλιφόρνια. Ο συνδυασμός των επιτόπιων μετρήσεων της πυκνότητας του νερού με τα δεδομένα από την ανάλυση του ^{137}Cs , κατέστησαν δυνατόν το διαχωρισμό μεταξύ των ρευμάτων από την Καλιφόρνια (California Current) σε σχέση με τις θαλάσσιες μάζες του κόλπου της Καλιφόρνια.

Όσον αφορά οικοσυστήματα που επηρεάστηκαν περισσότερο από το ατύχημα του Chernobyl σε σχέση με εκείνα των πυρηνικών δοκιμών θα παρουσιαστούν εργασίες που αφορούν στην Κασπία, Μαύρη και Μεσόγειο Θάλασσα. Στην Κασπία Θάλασσα οι ωκεανογραφικές και ισοτοπικές μελέτες που έγιναν σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα δεδομένα της απόθεσης νερών στη θάλασσα, υποδηλώνουν ότι η κύρια αιτία διακύμανσης του επιπέδου της θάλασσας κατά τον προηγούμενο αιώνα είναι η εισροή των ποταμών στο συγκεκριμένο κλειστό οικοσύστημα [FRO 99]. Τα δεδομένα αναλύθηκαν μέσω μετρήσεων $^3\text{H} - ^3\text{He}$ και υποδεικνύουν ότι οι βαθιές λεκάνες οξυγονώνονται ταχύτατα, παρόλο που ο χρόνος κυκλοφορίας του νερού στις βαθιές λεκάνες είναι περίπου 200 χρόνια. Τα επίπεδα συγκέντρωσης ανθρωπογενών ραδιονουκλιδίων ^{90}Sr , ^{137}Cs και $^{239,240}\text{Pu}$ στις στήλες του νερού, μπορούν να εξηγηθούν από την ατμοσφαιρική εναπόθεση λόγω πυρηνικών δοκιμών και ατυχήματος Chernobyl. Στην εργασία αυτή [FRO 99] οι μετρήσεις έδειξαν ότι για τις περιοχές της Κασπίας θάλασσας που μελετήθηκαν δεν βρέθηκαν ραδιενεργά απόβλητα, επειδή οι μετρήσεις ερμηνεύτηκαν από τη ραδιενεργό απόθεση λόγω ατυχημάτων και πυρηνικών δοκιμών. Σε ανάλογα συμπεράσματα καταλήγουν και στην εργασία [POV 03] όπου πραγματοποίησαν δύο αποστολές στην Κασπία Θάλασσα (1995 και 1996), με σκοπό τη μελέτη των ωκεανογραφικών συνθηκών, τη δυναμική των νερών και τις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων (^{90}Sr , ^{137}Cs και $^{239,240}\text{Pu}$) στις στήλες του νερού. Τέλος επεκτάθηκαν και σε θέματα ραδιοπροστασίας με τελικό συμπέρασμα ότι οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στα ψάρια και στο χαβιάρι ήταν μέσα στα επιτρεπόμενα όρια, χωρίς ιδιαίτερη ραδιολογική σημασία [POV 03].

Μία ενδιαφέρουσα περιοχή πλησιέστερη του Αιγαίου είναι αυτή της Μαύρης Θάλασσας. Στη Μαύρη Θάλασσα έχουν γίνει μετρήσεις των συγκεντρώσεων ^{90}Sr και ^{137}Cs , σε θαλάσσια δείγματα και ιζήματα για τη χρονική περίοδο 1986-1996 [EGO 99]. Σκοπός ήταν η εκτίμηση της χρονικής εξέλιξης των παραπάνω ραδιονουκλιδίων και των λόγων τους, καθώς και ο υπολογισμός της ανάμειξης των θαλασσιών μαζών και των διαδικασιών ιζηματογένεσης/καθίζησης. Χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα και δεδομένα από το πεδίο υπολογίστηκαν οι χρόνοι ανάμειξης σε 5, 16 και 24 χρόνια για τα θαλάσσια στρώματα με βάθη 0-50, 0-100 και 0-200m, αντίστοιχα. Για την κεντρική λεκάνη της Μαύρης Θάλασσας ο χρόνος οξυγόνωσης του χαμηλότερου αλοκλινούς υπολογίστηκε στα 15-25 χρόνια. Τέλος το ^{137}Cs χρησιμοποιήθηκε για τη χρονολόγηση των ιζημάτων των βαθιών λεκανών, παρέχοντας έτσι την ιστορία της χημικής και ραδιενεργού μόλυνσης τα τελευταία 50 χρόνια [EGO 99].

Τέλος, στη Μεσόγειο Θάλασσα χρησιμοποιήθηκε το ^{137}Cs ως ραδιοϊχνηθέτης, διότι είναι διαλυτό στο θαλασσινό νερό και μεταφέρεται μέσω των θαλασσιών μαζών στους ωκεανούς [SAN 02]. Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε αριθμητικό μοντέλο για την ερμηνεία της κατανομής και διασποράς του ^{137}Cs στη Μεσόγειο Θάλασσα αφού αυτή διαιρέθηκε σε 40 τμήματα (η αρίθμηση ξεκινά από τη Δυτική έως την Ανατολική Μεσόγειο). Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος πραγματική τιμή

συγκεντρώσεων ^{137}Cs , χρησιμοποιώντας δεδομένα της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης λόγω του πυρηνικών δοκιμών, του ατυχήματος του Chernobyl, των πυρηνικών εργοστασίων και τις εκβολές των ποταμών. Η εκτίμηση της χρονικής εξέλιξης των συγκεντρώσεων του ^{137}Cs έγινε για τη χρονική περίοδο 1954-1994 και έδειξε ότι οι συγκεντρώσεις στα επιφανειακά νερά κυμάνθηκαν από $0-36 \text{ Bq m}^{-3}$. Στα περισσότερα τμήματα της Μεσογείου Θάλασσας προβλέφθηκαν επιτυχώς τα δύο μέγιστα συγκεντρώσεων του ^{137}Cs (το 1963 λόγω πυρηνικών δοκιμών και 1986 λόγω του ατυχήματος του Chernobyl). Οι μέγιστες συγκεντρώσεις προβλέφθηκαν για τα επιφανειακά νερά σε όλες τις περιοχές παρουσιάζοντας μείωση των συγκεντρώσεων καθώς αυξανόταν το βάθος. Επίσης, οι μεγαλύτερες χωρικές βαθμίδες συγκέντρωσης του ^{137}Cs , προβλέφθηκαν κατά τη διάρκεια και λίγο μετά τη μέγιστη ατμοσφαιρική εναπόθεση λόγω των πυρηνικών δοκιμών. Ύστερα από τη μέγιστη εναπόθεση λόγω των δοκιμών, οι προβλεπόμενες συγκεντρώσεις μειώθηκαν (στην αρχή γοργά και ύστερα πιο αργά), ώστε να έχουν φτάσει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα λίγο πριν το ατύχημα του Chernobyl. Αντίθετα, οι μέγιστες προβλεπόμενες συγκεντρώσεις μετά το ατύχημα του Chernobyl παρουσίασαν μεγάλες διακυμάνσεις στα επιφανειακά νερά και αυτό διότι ο τρόπος απόθεσης των ραδιονουκλιδίων ήταν αρκετά ανομοιομορφος στη Μεσόγειο Θάλασσα. Οι θεωρητικές εκτιμήσεις βρέθηκαν σε καλή συμφωνία με μέσες ετήσιες τιμές για κάθε τμήμα [SAN 02].

Την περίοδο 1995-1997 έγιναν αποστολές στην ανατολική Μεσόγειο, προκειμένου να εξακριβωθεί η σχέση μεταξύ της κατανομής του ^{137}Cs στις στήλες νερού και της κυκλοφορίας των θαλασσιών μαζών [PAP 99]. Οι συγκεντρώσεις στην επιφάνεια κυμάνθηκαν μεταξύ 3.3 και 4.0 Bq m^{-3} σε όλη την περιοχή, υποδεικνύοντας ότι οι ραδιενεργές αποθέσεις λόγω του ατυχήματος του Chernobyl, μεταφέρθηκαν στα βαθιά θαλάσσια στρώματα μέσω ωκεανογραφικών διαδικασιών. Στην πραγματικότητα, στις κατακόρυφες κατανομές παρατηρήθηκαν σχετικά μέγιστα στα ενδιάμεσα (4.0 Bq m^{-3}) και στα βαθιά νερά ($\sim 2.5 \text{ Bq m}^{-3}$), τα οποία σχηματίστηκαν μετά το ατύχημα. Επίσης έγινε εμφανές ότι νεότερα βαθιά νερά που σχηματίστηκαν στο Αιγαίο Πέλαγος και βγαίνουν από τα στενά του Κρητικού τόξου, διαδίδονται από το 1991 στο κατώτατο στρώμα της ανατολικής Μεσογείου. Οι αλλαγές στις κατακόρυφες κατανομές του ^{137}Cs , σχετίζονται με τη νέα θερμοαλική κυκλοφορία (thermohaline circulation) που έρχεται από τη Δυτική Μεσόγειο και επηρεάζει τα ενδιάμεσα και τα βαθιά νερά της ανατολικής Μεσογείου. Η κατακόρυφη κατανομή του 1997 παρουσιάζει μία μείωση της συγκέντρωσης τόσο στα ενδιάμεσα νερά της Λεβαντίνης όσο και στα βαθιά νερά της ανατολικής Μεσογείου, σε σχέση με το 1996. Η μείωση που παρατηρήθηκε στα ενδιάμεσα νερά της Λεβαντίνης οφείλεται σε εποχικές/ετήσιες διακυμάνσεις, ενώ οι αλλαγές στο βαθύ στρώμα σχετίζονται με τη μεταφορά του νεότερου πυκνού νερού από το Αιγαίο δυτικά μέσα στο Ιόνιο. Κατά μήκος της διαδρομής από την Ανατολική προς τη δυτική Μεσόγειο, το ποσοστό του ^{137}Cs στα ενδιάμεσα νερά της Λεβαντίνης μειώνεται από $\sim 4.0 \text{ Bq m}^{-3}$ σε 2.0 Bq m^{-3} λόγω της ανάμειξης με υποθαλάσσια νερά που περιέχουν μικρότερο ποσοστό ^{137}Cs . Οι χρονικές σειρές μετρήσεων στη δυτική πλευρά των Στενών της Σικελίας έδειξαν ότι ενώ η συγκέντρωση του ^{137}Cs στα επιφανειακά νερά, που εισέρχονται από την ανατολική Μεσόγειο, παραμένει σταθερή ($\sim 3.5 \text{ Bq m}^{-3}$) για τη χρονική περίοδο 1993-1997, τα επίπεδα στα ενδιάμεσα νερά της Λεβαντίνης μειώθηκαν από 3.5 σε 2.0 Bq m^{-3} [PAP 99].

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω αποτελούν κομμάτι της μελέτης που έγινε τα τελευταία χρόνια στο Νότιο και Βόρειο Ειρηνικό Ωκεανό και σε γειτονικά θαλάσσια οικοσυστήματα χωρίς να έχουν ενσωματωθεί σε αυτά αποτελέσματα από το πρόσφατο ατύχημα που έγινε στην περιοχή της Fukushima της Ιαπωνίας. Σκοπός

αυτής της εργασίας είναι τα δεδομένα της να αποτελέσουν τη βάση δεδομένων για συγκεντρώσεις ^{137}Cs στις Ελληνικές Θάλασσες πριν το ατύχημα στην Ιαπωνία με απώτερο σχέδιο τα δεδομένα από μελλοντικές εργασίες να συγκριθούν με τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής για πιθανή ραδιολογική μελέτη τόσο στο Αιγαίο όσο και στο Ιόνιο Πέλαγος. Επίσης τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν και για την ωκεανογραφική μελέτη των Ελληνικών θαλασσών κυρίως για την αλληλεπίδραση των νερών με εκείνα της θάλασσας του Μαρμαρά, όπου οι τιμές του ^{137}Cs διαφέρουν σημαντικά.

Προκειμένου να αντιληφθούμε το περιβάλλον ανάπτυξης αυτής της διπλωματικής εργασίας γίνεται μία σύντομη αναφορά στο πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl ως εισαγωγικό κεφάλαιο. Κάτι τέτοιο κρίνεται σκόπιμο γιατί το ατύχημα αυτό είναι η ουσιαστικότερη και μεγαλύτερη, για την περιοχή του Αιγαίου και της Μαύρης Θάλασσας τουλάχιστον, αιτία τεχνητής ραδιενέργειας και ραδιορύπανσης. Σε κάθε περίπτωση λοιπόν, το αποτύπωμα αυτού του ατυχήματος θα είναι εμφανές στα αποτελέσματα της ανάλυσης που θα διεξαχθεί. Βέβαια το ατύχημα αυτό αποτέλεσε έναν εναλλακτικό τρόπο μελέτης των υποθαλάσσιων περιοχών, όπως γίνεται εμφανές στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου, όπου παρουσιάζονται οι μελέτες και τα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς στο χώρο του Αιγαίου.

1.1 Πυρηνικό ατύχημα Chernobyl

Το πυρηνικό ατύχημα που συνέβη στις 26 Απριλίου 1986 στον τέταρτο αντιδραστήρα του πυρηνικού εργοστασίου του Chernobyl, είχε σαν αποτέλεσμα την επιβάρυνση με ραδιενεργά κατάλοιπα της Ουκρανίας και άλλων Ευρωπαϊκών χωρών, μεταξύ των οποίων και της Ελλάδος.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις εκτιμήσεις των κύριων ραδιονουκλιδίων που συνέβαλαν στη συνολική δόση ραδιενέργειας. Γίνεται σύγκριση μεταξύ των εκτιμήσεων 1986 και 1995.

Nuclide	Activity released (PBq)	
	1986 estimate	1995 estimate
^{133}Xe	1665	6500
^{131}I	270	1760
^{137}Cs	37	54
^{90}Sr	8	10
^{239}Pu	0.025	0.042

Πίνακας 1.1: Σύγκριση των εκτιμήσεων που έγιναν το 1986 και 1995 της κύριας παραγόμενης δόσης ραδιονουκλιδίων που εκλύθηκαν στο Chernobyl. [EIS &GES 97]

Τα περισσότερα από τα ραδιενεργά κατάλοιπα ήταν βραχύβια. Μεταξύ των πλέον μακρόβιων είναι και το ^{137}Cs με χρόνο ημιζωής $\tau_{1/2}=30.07$ χρόνια που εξακολουθεί να υπάρχει στο έδαφος και τη θάλασσα. Η ανίχνευσή του είναι σημαντική διότι έτσι μπορεί να διαπιστωθεί ο βαθμός της ραδιορύπανσης και επίσης επειδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ιχνηθέτης για την μελέτη γεωλογικών εναποθέσεων ή μεταβολών είτε στην ξηρά είτε στον θαλάσσιο χώρο. Τα τελευταία 15 χρόνια έχουν αναπτυχθεί συστήματα συνεχούς μέτρησης και ελέγχου της ραδιενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή ραδιορύπανση λόγω της γειτνίασης τους με πυρηνικά εργοστάσια. Οι έλεγχοι αυτοί αφορούν και σε επί τόπου (in situ) μετρήσεις [POV 98], [OSV 01], [UGU 03], [WED 98] για τη συνεχή παρακολούθηση (monitoring) των επιπέδων της ραδιενέργειας στη

θάλασσα, καθώς και σε δειγματοληψίες και ακολούθως επεξεργασία και ανάλυση των δειγμάτων στο εργαστήριο, όπως γίνεται και στην παρούσα εργασία.

Μέχρι το 1986 η ραδιολογική κατάσταση του Αιγαίου Πελάγους είχε άμεση εξάρτηση από την επίδραση της παγκόσμιας ραδιενεργού κατάστασης η οποία ήταν αποτέλεσμα των πυρηνικών δοκιμών στην ατμόσφαιρα. Τα επίπεδα του ^{137}Cs στο προ του Chernobyl διάστημα κυμαίνονται στα 2-3 Bq m⁻³. Η επίδραση όμως του πυρηνικού αυτού ατυχήματος είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση αυτών των επιπέδων κατά μία τάξη μεγέθους [KPH 96]. Σήμερα, η αναμενόμενη ραδιενεργός ρύπανση στο Αιγαίο είναι μικρότερη των 10Bq m⁻³, αφ' ενός μεν λόγω της παρέλευσης 25 ετών και αφ' ετέρου λόγω των διαφόρων διαδικασιών (ρευμάτων κ.λ.π.) που έχουν σαν αποτέλεσμα τη διασπορά της σε μεγαλύτερους θαλάσσιους όγκους.

1.2 Αιγαίο Πέλαγος και ραδιενέργεια

Το Αιγαίο πέλαγος είναι μία από τις λεκάνες της Ανατολικής Μεσογείου. Στο βόρειο μέρος του συνδέεται με τη Μαύρη Θάλασσα μέσω των στενών των Δαρδανελίων ενώ στο νότιο μέρος του βρίσκεται το νησί της Κρήτης. Η επιφάνεια του Αιγαίου Πελάγους είναι περίπου $1.8 \times 10^{11} \text{ m}^2$ ενώ ο όγκος του είναι της τάξης $8.5 \times 10^{13} \text{ m}^3$ με μέσο βάθος τα 450m. Το Αιγαίο Πέλαγος παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον από πλευράς φυσικής ωκεανογραφίας διότι συνδέει τη Θάλασσα του Μαρμαρά με τη Μεσόγειο Θάλασσα μέσω των στενών των Δαρδανελίων με εντελώς διαφορετικά νερά (όσο αφορά αλατότητα και θερμοκρασία). Η αλληλεπίδραση των δύο διαφορετικών θαλάσσιων μαζών δημιουργεί επιφανειακά νερά στο Βόρειο Αιγαίο Πέλαγος χαμηλής αλατότητας [LAS 92]. Μεγάλη προσπάθεια έχει γίνει τα τελευταία χρόνια για μέτρηση χρονοσειρών ωκεανογραφικών παραμέτρων των θαλάσσιων μαζών για κλιματολογικές μελέτες επειδή οι παράμετροι αυτές αλλάζουν παροδικά με την κυκλοφορία του θερμοκλινούς της Ανατολικής Μεσογείου [ROE 96]; [LAS 99]; [KLE 99]; [ZER 00]; [NIT 03]; [GER 06]. Πρόσφατα αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι για ιχνηθέτηση των θαλασσιών μαζών [MAN 04]; [NOU 08] της στήλης νερού για το χαρακτηρισμό των νερών τόσο στα επιφανειακά όσο και στα ενδιάμεσα και βαθιά νερά [VEL 05].

Η κύρια είσοδος ραδιενεργών ρύπων στις Ελληνικές Θάλασσες είναι η ατμοσφαιρική απόθεση από προϊόντα σχάσης πυρηνικών δοκιμών και πυρηνικών εργοστασίων. Τα δεδομένα από το ^{137}Cs μπορούν να μας δώσουν πολύτιμες πληροφορίες για την αποτίμηση της επικινδυνότητας παρατηρώντας το συντελεστή κατανομής του στοιχείου [KUL 09]. Τα ανθρωπογενή ραδιοϊσότοπα του Cs αποτελούν σημαντικούς ιχνηθέτες για την μελέτη διαδικασιών μεταφοράς στο θαλάσσιο περιβάλλον για περιόδους χρόνων ή και δεκαετιών [PAP 99], [VOL 02]. Το ^{137}Cs είναι ένα συντηρητικό στοιχείο στο θαλασσινό νερό και βρίσκεται σε ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις στις Ελληνικές Θάλασσες. Το ατύχημα του Chernobyl το 1986 δημιούργησε μία άνιση απόθεση ραδιονουκλιδίων πάνω από τις ανατολικές και βόρειες λεκάνες της Μεσογείου, η οποία υπερτέθηκε στις προηγούμενες ατμοσφαιρικές αποθέσεις από τις πυρηνικές δοκιμές. Η απόθεση του ^{137}Cs λόγω του ατυχήματος έγινε κυρίως στη Μαύρη Θάλασσα (1.7 – 2.4 PBq) καθώς και σε αυτές του Αιγαίου και του Ιονίου κατά μήκος των ελληνικών ακτών (800 TBq) [KRI 90]. Επιπροσθέτως, η εισχώρηση επιφανειακού νερού από τη Μαύρη Θάλασσα μέσω των στενών των Δαρδανελίων, συνεχίζει να αποτελεί μία συνεχή πηγή ^{137}Cs για το Βόρειο Αιγαίο [EGO 99]. Στο Αιγαίο Πέλαγος έχουν γίνει σποραδικές μετρήσεις του ^{137}Cs για τις υποθαλάσσιες περιοχές. Πριν από τα φαινόμενα καθίζησης νερού σε μεγάλα βάθη (deep-water formation events) το 1992 και 1993, δεν είχε γίνει συστηματική παρακολούθηση, ειδικά σε μεγάλα βάθη, στο Βόρειο και Κεντρικό Αιγαίο [TSA 07].

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην εξήγηση των επιπέδων ραδιενέργειας ^{137}Cs και των κατακόρυφων κατανομών του στις Ελληνικές Θάλασσες, προκειμένου να αποτελέσει μία πρωταρχική έρευνα για μετέπειτα μελλοντικά γεγονότα που τυχόν συμβούν, όπως το πυρηνικό ατύχημα της Fokushima.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η πυρηνική φυσική αποτελεί έναν ιδιαίτερο κλάδο της φυσικής με σημαντική εξέλιξη τον 20^ο αιώνα. Κύριο αντικείμενο της μελέτης της είναι ο πυρήνας του ατόμου και τα φαινόμενα που σχετίζονται με αυτόν. Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της έρευνας στον κλάδο αυτό είναι απαραίτητο να βασιστεί στην ακριβή γνώση όλων των διαστάσεων του θέματος τόσο για γνωσιολογικούς λόγους όσο και για λόγους βελτίωσης της ποιότητας ζωής μας, μιας και όλοι μας λίγο πολύ έχουμε γευτεί τις ευεργετικές αλλά και καταστροφικές επιπτώσεις της πυρηνικής φυσικής.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση του θεωρητικού μέρους που αφορά στο πυρηνικό σύστημα και θεωρείται ως στοιχειώδης βάση για την μετέπειτα ανάπτυξη της παρούσας εργασίας. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στην σταθερότητα που διέπει τους πυρήνες καθώς και τις περιπτώσεις που αυτή παύει να υφίσταται. Εξετάζονται αναλυτικά τα είδη ακτινοβολίας και οι τρόποι με τους οποίους ο πυρήνας μεταπίπτει σε πιο σταθερές καταστάσεις. Στην συνέχεια η περιγραφή της φυσικής και τεχνητής ραδιενέργειας γίνεται καλύτερα κατανοητή με την μαθηματική ανάλυση των αποδιεγέρσεων που προηγείται και ακολουθεί ως επίλογος οι εφαρμογές και οι επιπτώσεις της ραδιενέργειας στον άνθρωπο και το περιβάλλον.

2.1 Πυρηνική Ευστάθεια

Κάθε άτομο περιέχει στο κέντρο του έναν εξαιρετικά πυκνό, θετικά φορτισμένο πυρήνα, ο οποίος έχει μέγεθος αρκετά μικρότερο από το συνολικό μέγεθος του ατόμου, αλλά περιέχει σχεδόν όλη τη μάζα του. Ο πυρήνας συγκροτείται από νουκλεόνια, φερμιόνια με σπιν $\frac{1}{2}$, δηλαδή τα νετρόνια που δεν έχουν φορτίο και τα πρωτόνια που είναι θετικά φορτισμένα.

Η δέσμευση των νουκλεονίων στον πυρήνα οφείλεται στην ισχυρή αλληλεπίδραση, η οποία είναι υπεύθυνη και για την παραγωγή στοιχειωδών σωματιδίων σε συγκρούσεις υψηλών ενεργειών. Η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι 100 φορές ισχυρότερη από την ηλεκτρομαγνητική, αλλά εξασθενεί με τη απόσταση ταχύτερα από $1/r^2$, δηλαδή έχει αρκετά μικρή εμβέλεια της τάξης μεγέθους διαστάσεων του πυρήνα (10^{-15} m). Δύο ακόμα χαρακτηριστικά της πυρηνικής δύναμης είναι η σχεδόν σταθερή ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο και η σταθερή πυκνότητα της πυρηνικής ύλης, που προκύπτει από την εξάρτηση της ενέργειας σύνδεσης από τον αριθμό των νουκλεονίων του πυρήνα.

Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι κάθε νουκλεόνιο σε έναν πυρήνα δεν μπορεί να αλληλεπιδρά ταυτόχρονα με όλα τα άλλα, αλλά μόνο με λίγα νουκλεόνια που βρίσκονται στην άμεση γειτονιά του. Τέλος η πυρηνική δύναμη συμβάλλει στο σχηματισμό δεσμού μεταξύ ζευγών πρωτονίων ή νετρονίων, καθώς και πρωτονίου νετρονίου, όπου τα σπιν των αλληλεπιδρώντων νουκλεονίων σε κάθε ζεύγος είναι αντίθετα [YOU 91].

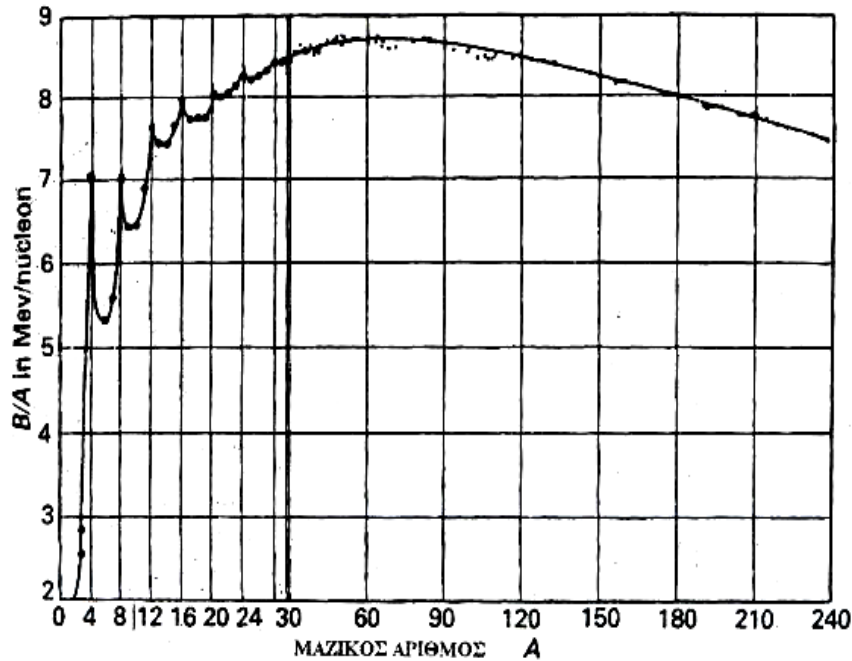
Εφόσον ο πυρήνας είναι ένα δέσμιο σύστημα, για να αποσυνδέσουμε τα Z πρωτόνια και τα N νετρόνια που τον αποτελούν χρειάζεται μία ενέργεια $B(Z,N)$. Χρησιμοποιώντας τη σχέση μάζας-ενέργειας του Einstein, βρίσκουμε ότι η ενέργεια σύνδεσης $B(N,Z)$ συνδέεται με την μάζα του πυρήνα ($m_{\text{πυρ}}$) με τη σχέση:

$$m_{\nu\rho}(Z, N) = Zm_p + Nm_n - B(Z, N)/c^2 \quad (2.1.)$$

όπου η $B(Z, N)$ πρέπει να είναι θετική για να υπάρξει δέσμιο σύστημα. Πειραματικά, όμως οι ποσότητες που μετρούνται άμεσα είναι οι μάζες των ατομικών ιόντων και όχι οι μάζες των γυμνών από ηλεκτρόνια πυρήνων. Αν $m_a(Z, N)$ είναι η μάζα του ουδέτερου ατόμου,

$$m_a(Z, N) = Z(m_p + m_e) + Nm_n - B(Z, N)/c^2 - b_{\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho}/c^2 \quad (2.2.)$$

όπου $b_{\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho}$ είναι η ενέργεια σύνδεσης των ατομικών ηλεκτρονίων. Η συνεισφορά του όρου αυτού είναι ιδιαίτερα μικρή και μπορεί να αγνοηθεί [ΑΣΗ 02]



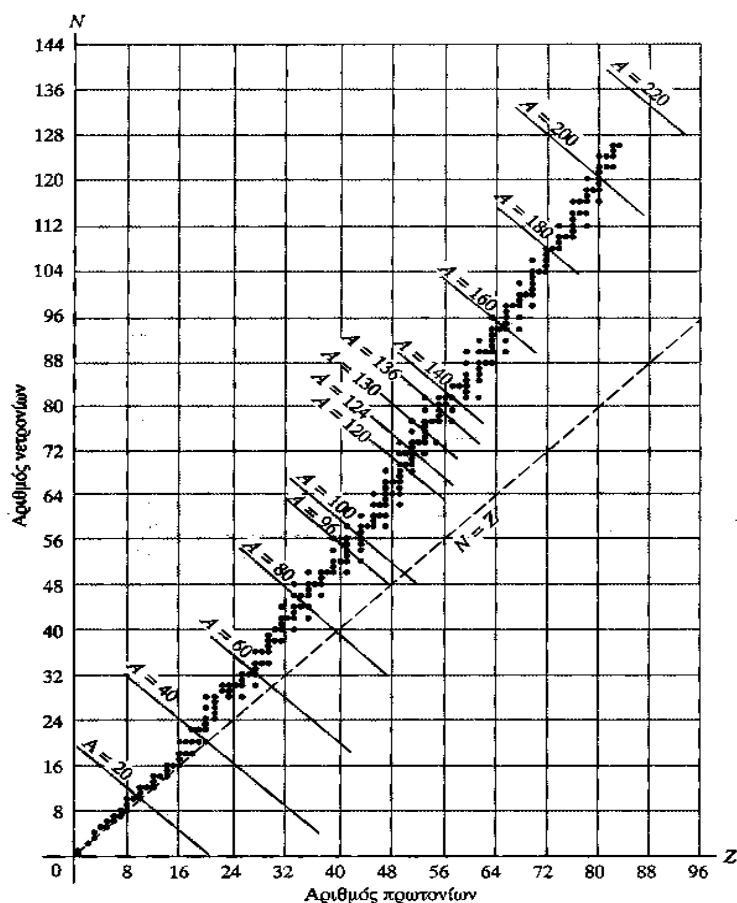
Σχήμα 2.1: Η μεταβολή της μέσης ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο B/A συναρτήσει του μαζικού αριθμού A . [ΓΑΖ 02]

Η ενέργεια σύνδεσης αποτελεί μέτρο της πυρηνικής σταθερότητας. Μεγάλη ενέργεια σύνδεσης συνεπάγεται υψηλή σταθερότητα. Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως όλοι οι σταθεροί πυρήνες, ανεξάρτητα από τη μάζα τους, έχουν ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο στην περιοχή με τιμές 6 έως 9 MeV, ενώ η μέγιστη τιμή παρατηρείται περίπου για $A=60$. Για τιμές ενέργειας μεγαλύτερες αυτής, κάθε πυρηνικός μετασχηματισμός που καταλήγει σε πυρήνες με μικρότερο A (π.χ. σχάση) συνοδεύεται από έκλυση ενέργειας.

Στην αρχή της μεταβολής της ενέργειας σύνδεσης, ορισμένα στοιχεία παρουσιάζονται ιδιαίτερα σταθερά σε σχέση με τα γειτονικά τους και αυτό φαίνεται από τις αλληπάλλληλες κορυφές της ενέργειας σύνδεσης, οι οποίες είναι λιγότερο έντονες όσο αυξάνεται ο μαζικός αριθμός A μετά την τιμή 28. Οι πυρήνες που έχουν έντονη σταθερότητα και μεγάλη ενέργεια σύνδεσης αντιστοιχούν σε τιμές του ατομικού αριθμού Z ή του αριθμού νετρονίων $N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$, αποκαλούνται μαγικοί αριθμοί και ερμηνεύτηκαν θεωρητικά με τη θεωρία του πυρηνικού προτύπου των φλοιών.

Ο σημαντικότερος λόγος για την ευστάθεια ή την αστάθεια των πυρήνων είναι ο ανταγωνισμός μεταξύ των ελκτικών πυρηνικών δυνάμεων και των απωστικών

ηλεκτρικών (δυνάμεις Coulomb). Αν δεν υπήρχαν οι ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις, σταθερότεροι θα ήταν οι πυρήνες με τον ίδιο ή άρτιο αριθμό νετρονίων και πρωτονίων ($N=Z$). Όμως εξαιτίας της ηλεκτρικής άπωσης ευνοούνται οι πυρήνες που έχουν μεγαλύτερο αριθμό νετρονίων από αυτόν των πρωτονίων. Παρόλα αυτά ένας πυρήνας με υπερβολικά πολλά νετρόνια είναι ασταθής γιατί δεν είναι αρκετά αυτά που μπορούν να σχηματίσουν ζεύγη με πρωτόνια σε σχέση με το συνολικό αριθμό τους. Βέβαια ένας πυρήνας με υπερβολικά μεγάλο αριθμό πρωτονίων είναι επίσης ασταθής, διότι οι απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των πρωτονίων θα υπερισχύσουν έναντι των ελκτικών πυρηνικών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των νουκλεονίων. Εν κατακλείδι αυξανόμενο του αριθμού των νουκλεονίων έχουμε αύξηση της θετικής ηλεκτρικής ενέργειας ανά νουκλεόνιο ταχύτερα από την αρνητική πυρηνική ενέργεια, όπου οδηγούμαστε σε μία κατάσταση που δεν ευνοεί την ύπαρξη σταθερότητας. Για στοιχεία με $Z > 83$ ή/και $A > 206$ έχουμε ασταθείς δομές που διασπώνται και σχηματίζουν άλλα νουκλίδια, εκπέμποντας σωματίδια και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, πράγμα που εξηγεί τον μικρό αριθμό των σταθερών νουκλιδίων στη φύση - περίπου 300 από τους 2500 γνωστά νουκλίδια. [EHM & VAN 98]. Όλα τα ανωτέρω φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα Segre :



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Segre. Η κοιλάδα σταθερότητας [ΑΣΗ 02]

Τα σημεία που βρίσκονται δεξιά της κοιλάδας σταθερότητας παριστάνουν νουκλίδια που εμφανίζουν μεγάλο αριθμό πρωτονίων στον πυρήνα τους ή ανεπαρκή αριθμό νετρονίων. Ενώ αυτά τα οποία βρίσκονται αριστερά της κοιλάδας σταθερότητας είναι τα στοιχεία που έχουν μεγάλο αριθμό νετρονίων στον πυρήνα τους ή απλώς ελλιπή αριθμό πρωτονίων.

2.2 Πυρηνική Αποδιέγερση

Οι ασταθείς πυρήνες έχουν την αυθόρμητη τάση να μεταπίπτουν σε σταθερότερες δομές που τις χαρακτηρίζουν μικρότερες ενέργειες μάζας. Η χρονική τους κλίμακα κυμαίνεται από κλάσματα δευτερολέπτου μέχρι δισεκατομμύρια χρόνια. Υπακούουν στους νόμους διατήρησης της ολικής ενέργειας, της ορμής και της στροφορμής, του φορτίου και του μαζικού αριθμού του συστήματος.

Ο μηχανισμός μετάπτωσης, έγκειται είτε σε μετάπτωση του πυρηνικού συστήματος των νουκλεονίων σε χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες (σύμφωνα με το ατομικό πρότυπο των φλοιών) είτε σε μεταβολή του αριθμού των νουκλεονίων (A,Z), κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προκύψουν σταθερότεροι πυρήνες. Οι διαδικασίες αυτές είναι πάντα εξωενεργειακές και συνοδεύονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ή σωματιδίων.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ραδιενεργού διάσπασης που συχνά ανταγωνίζονται ή συμβαίνουν διαδοχικά. Οι πιο συνηθισμένοι αναφέρονται ως α, β και γ-διάσπαση που υποδηλώνουν την εκπομπή της αντίστοιχης ακτινοβολίας. Η μελέτη της πυρηνικής αποδιέγερσης έγινε από αρχικά από το Γάλλο φυσικό Antoine Henri Becquerel στο τέλος του 19^{ου} αιώνα, ο οποίος παρατήρησε πρώτος τα τρία είδη ακτινοβολίας.

2.2.1 Διάσπαση-α

Στην αποδιέγερση ή διάσπαση-α, ένας πυρήνας εκπέμπει ένα σωματίδιο το οποίο αποτελείται από δύο πρωτόνια και δυο νετρόνια, δηλαδή ένα πυρήνα ${}^4_2\text{He}$. Με την εκπομπή αυτή έχουμε μείωση του μαζικού A και ατομικού αριθμού Z του μητρικού ραδιονουκλιδίου (M) κατά 4 και 2 μονάδες αντίστοιχα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία του θυγατρικού νουκλιδίου (Θ). Η α-διάσπαση μπορεί να συνοδεύεται ή όχι και από εκπομπή ακτίνων-γ, δηλαδή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η γενική εξίσωση, που περιγράφει την διάσπαση-α είναι :



Η εκπομπή αυτού του είδους συμβαίνει όταν έχουμε βαρείς πυρήνες πολύ μεγάλου μεγέθους, όπου το σωματίδιο α διαφεύγει από το πυρηνικό δυναμικό Coulomb, μέσω του κβαντικού φαινομένου σήραγγας [ΑΣΗ 02]. Πυρήνες με μαζικό αριθμό A μεγαλύτερο από 150 είναι θεωρητικά ασταθείς ως προς την α-διάσπαση, εφόσον η μάζα του είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών του θυγατρικού πυρήνα και ενός σωματίου. Αυτό καταδεικνύεται από τον υπολογισμό ενέργειας-μάζας Q_α που γίνεται θετική για $A \geq 150$ σύμφωνα με την παρακάτω σχέση,

$$Q_\alpha = M(A, Z) - M(A-4, Z-2) - M(4,2) = B(4,2) + B(A-4, Z-2) - B(A, Z) \quad (2.4)$$

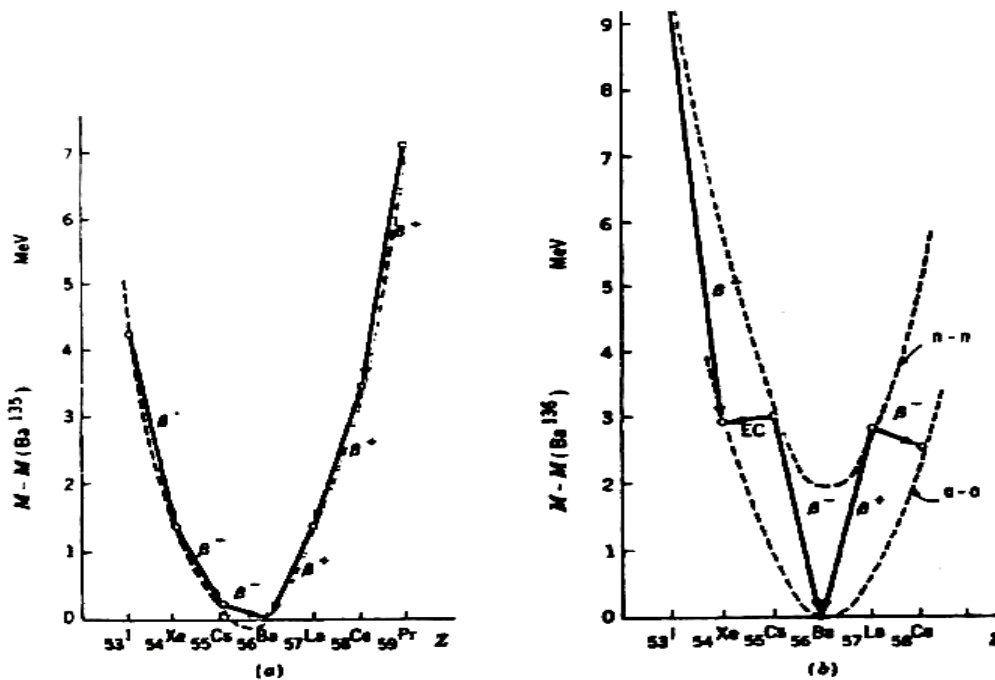
όπου B είναι η ενέργεια σύνδεσης των αντίστοιχων πυρηνικών συστημάτων

Ο μετρούμενος χρόνος ημιζωής των φυσικών ραδιονουκλιδίων του υφίστανται α-διάσπαση, παρουσιάζει πολύ μεγάλη διακύμανση, από 10^{-6} έως περισσότερο από 10^{15} χρόνια. Η διακύμανση της ενέργειας των σωματιδίων-α είναι 5-7 MeV για τα βαρύτερα μητρικά ραδιονουκλίδια (1-2.5 MeV για εκείνα της περιοχής των σπανίων γαιών.

Τα σωματίδια-α εκπέμπονται πάντα με διακεκριμένες τιμές κινητικής ενέργειας, η οποία καθορίζεται από τις αρχές διατήρησης της ορμής και της ενέργειας. Παρόλα αυτά, τα φάσματα των σωματιδίων-α προς την ενέργεια τους αν και διακριτά περιέχουν διευρυμένες κορυφές που οφείλονται στην αρχή απροσδιοριστίας και σε πειραματικούς παράγοντες. Εφόσον έχουν μεγάλο μέγεθος μπορούν να διανύσουν μερικά εκατοστά στον αέρα, αλλά ακινητοποιούνται μπροστά σε πιο πυκνά μοριακά πλέγματα (π.χ. φύλλο χαρτί), λόγω των έντονων κρούσεων τους με τα μόρια της ύλης.

2.2.2 Διάσπαση-β

Στην αποδιέγερση-β ο μαζικός αριθμός A μένει σταθερός ενώ ο ατομικός Z μεταβάλλεται. Στην προσπάθειά του ο πυρήνας να μεταπέσει σε χαμηλότερες ενεργειακά καταστάσεις τείνει να κινηθεί στο πλησιέστερο νουκλίδιο της κοιλάδας σταθερότητας, ή ισοδύναμα στο ελάχιστο κάθε καμπύλης ισοβαρών πυρήνων. Αυτό, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3, μπορεί να συμβεί με μεταβολή ενός πρωτονίου σε νετρόνιο ή αντίστροφα, ανάλογα με το αν βρίσκεται στην δεξιά ή αριστερή μεριά του ελαχίστου της καμπύλης.



Σχήμα 2.3: Μεταστοιχείωση μεταξύ ισοβαρών πυρήνων μέσω αποδιέγερσης β. (α) Πυρήνες με περιττό A ($A = 135$). (β) Πυρήνες με άρτιο A ($A = 136$).[ΑΣΗ 02]

Η μετάπτωση μεταξύ πρωτονίου και νετρονίου οφείλεται στην ασθενή αλληλεπίδραση, μέσω της οποίας πραγματοποιούνται οι δύο βασικές αντιδράσεις :



όπου ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε νετρόνιο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός ποζιτρονίου (θετικού ηλεκτρονίου), και ενός νετρίνου, καθώς και :



όπου ένα νετρόνιο μετατρέπεται σε πρωτόνιο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός ηλεκτρονίου και ενός αντινετρίνου, που είναι ένα αφόρτιστο στοιχειώδες σωματίο με μηδενική μάζα .

Χαρακτηριστικό των αντιδράσεων είναι ότι πρόκειται για αμφίδρομες και συνεπώς οι αντιδράσεις που προκύπτουν από μεταφορά ενός σωματίου από το ένα σκέλος της στο άλλο με ταυτόχρονη αντικατάσταση του σωματίου από το αντισωματίό του είναι επιτρεπτές και έχουν παρατηρηθεί. Έτσι μια ακόμα ενδιαφέρουσα μετάπτωση που προκύπτει είναι η αλληλεπίδραση ενός ηλεκτρονίου με πρωτόνιο, που στην πράξη πρόκειται για την σύλληψη ενός τροχιακού ηλεκτρονίου (π.χ. της K στοιβάδας – K-σύλληψη) :



Οι τρεις εξισώσεις (2.5), (2.6) και (2.7) που συναντήσαμε παραπάνω περιγράφουν τις τρεις περιπτώσεις β-διάσπασης, αντίστοιχα : β⁻-διάσπαση, β⁺-διάσπαση και διάσπαση με εκπομπή ηλεκτρονίου (electron capture, EC).

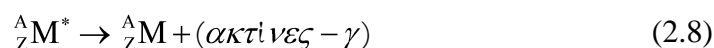
Σε σχέση με την αποδιέγερση-α, η αυθόρμητη εκπομπή-β εμφανίζει ορισμένες χαρακτηριστικές διαφορές:

- Η ενέργεια των ηλεκτρονίων κυμαίνεται μεταξύ μερικών keV και 15 MeV, ενώ κατά την αποδιέγερση-α τα σωματία που εκπέμπονται έχουν ενέργεια που κυμαίνεται στα 5-7 MeV, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.
- Ο αριθμός των γνωστών β-ασταθών πυρήνων είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των πυρήνων που εμφανίζουν αυθόρμητη εκπομπή-α.
- Τα σωματία-α εκπέμπονται από τον πυρήνα με ορισμένες διακριτές ενέργειες, δηλαδή οι μεταπτώσεις α πραγματοποιούνται μεταξύ διακριτών καταστάσεων του μητρικού και του θυγατρικού συστήματος. Αντίθετα, τα σωματία β εμφανίζουν πάντα ένα συνεχές φάσμα ενέργειας.
- Κατά την αποδιέγερση-α εξετάζεται η διαφυγή ενός σωματίου που αν και δεν υπάρχει μόνιμα μέσα στον πυρήνα, αποτελεί σύνθεση των μόνιμων δομικών λίθων του μητρικού συστήματος. Από την άλλη πλευρά, κατά την αποδιέγερση-β παρατηρούμε την εκπομπή ενός σωματίου που ξέρουμε ότι δεν υπάρχει μέσα στον πυρήνα πριν την αποδιέγερση. Έτσι, στο σημείο αυτό η αποδιέγερση-β παρουσιάζει περισσότερα γνωρίσματα με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τον πυρήνα, όπου το φωτόνιο δημιουργείται ως μέρος της όλης διεργασίας αποδιέγερσης.
- Τα σωματία-α εκπέμπονται από τον πυρήνα με ταχύτητες αρκετά χαμηλές σε σχέση με την ταχύτητα του φωτός. Έτσι στη μελέτη της αποδιέγερσης-α μπορούμε να χειριστούμε το φαινόμενο με μη σχετικιστικές μεθόδους. Σε αντίθεση, η ενέργεια των σωματίων-β συνήθως υπερβαίνει την τιμή της μάζας αδρανείας τους ($m_e=0,511\text{MeV}$) και επομένως ο χειρισμός του φαινομένου πρέπει να γίνει στα πλαίσια της θεωρίας της σχετικότητας [ΑΣΗ 02].

Ανάλογα με την ενέργεια που κατέχουν τα β σωματίδια μπορούν να διανύσουν αρκετά μέτρα στον αέρα και ακινητοποιούνται μπροστά σε ένα λεπτό στρώμα μετάλλου ή πλαστικού [ΓΑΖ 02].

2.2.3 Διάσπαση-γ

Στην γ-διάσπαση παρατηρείται αποδιέγερση του διεγερμένου πυρήνα, δηλαδή πυρήνα που τα νουκλεονία του βρίσκονται για κάποιο λόγο σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες πάνω της βασικής. Κατά την διάσπαση εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καθώς ο πυρήνας μεταπίπτει σε χαμηλότερη ή στη θεμελιώδη του κατάσταση. Η γενική εξίσωση για τη γ-διάσπαση, όπου M^* δηλώνει την ανώτερη ενεργειακή κατάσταση είναι :



Υπάρχουν τρεις τρόποι διασπάσεως που σχετίζονται με εκπομπή ακτίνων-γ : η καθαρή εκπομπή ακτίνων-γ, η δίδυμη γένεση (pair production, PP) και η εσωτερική μετατροπή (internal conversion, IC). Στους δύο πρώτους τρόπους έχουμε δημιουργία στοιχειώδους ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, ενός φωτονίου, που μεταφέρει την ενέργεια, ορμή και στροφορμή μεταξύ αρχικής και τελικής κατάστασης όπως απαιτούν οι κανόνες διατήρησης. Ο τρίτος τρόπος πραγματοποιείται μέσω του πεδίου ενός ατομικού ηλεκτρονίου στην γειτονιά του πυρήνα ενώ το ηλεκτρόνιο μεταφέρει την απαιτούμενη ενέργεια, ορμή και στροφορμή.

α) καθαρή εκπομπή ακτίνων γ

Οι ακτίνες-γ που εκπέμπονται από έναν πυρήνα κατά τη γ-διάσπαση είναι μονοενεργειακές για κάθε μετάπτωση μεταξύ ενεργειακών σταθμών και η τυπική κλίμακα ενεργειών είναι από 2 keV έως 7 MeV. Οι ενέργειες αυτές των ακτίνων-γ είναι σχεδόν ίσες με τις ενέργειες των μεταπτώσεων μεταξύ των διαφόρων κβαντικών καταστάσεων του πυρήνα. Οι όποιες διαφορές που παρατηρούνται οφείλονται στο μικρό ποσοστό της ενέργειας που μεταφέρεται στο θυγατρικό πυρήνα ως ενέργεια ανακρούσεως (αρκετά μικρή ενέργεια σε σχέση με την ενέργεια των ακτίνων-γ) .

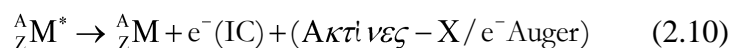
β) δίδυμη γένεση (pair production)

Η δίδυμη γένεση συμβαίνει όταν η ενέργεια της πυρηνικής μεταπτώσεως είναι μεγαλύτερη από 1,024 MeV. Κατά την παραγωγή ζεύγους, η ενέργεια της μεταπτώσεως χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου (e^-e^+), το οποίο κατόπιν εκδιώκεται από τον πυρήνα. Η συνολική κινητική ενέργεια που δίνεται στο ζεύγος είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας της μεταπτώσεως και του ποσού των 1,024 MeV που είναι απαραίτητο για τη δημιουργία του ζεύγους. Η γενική αντίδραση για αυτόν τον τρόπο διασπάσεως είναι :

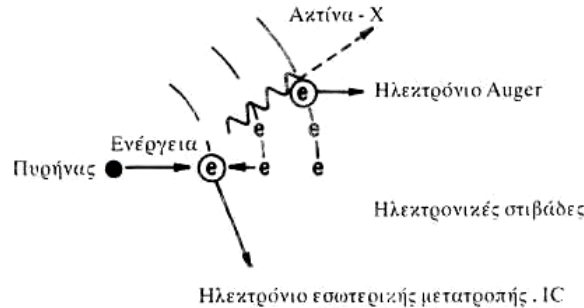


γ) εσωτερική μετατροπή (internal conversion)

Στην περίπτωση αυτή, ο διεγερμένος πυρήνας αποδιεγείρεται μεταφέροντας την ενέργεια διεγέρσεώς του σε ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο, το οποίο κατόπιν εκπέμπεται από το άτομο. Σε αυτή την περίπτωση δεν εκπέμπεται ακτινοβολία-γ. Η γενική αντίδραση είναι :



Τα ηλεκτρόνια εσωτερικής μετατροπής είναι μονοενεργειακά. Οι ενέργειες τους είναι ίσες με την ενέργεια της μεταπτώσεως μεταξύ των πυρηνικών σταθμών μείον την ενέργεια συνδέσεως του ατομικού ηλεκτρονίου και επομένως. Επειδή η διάσπαση με εσωτερική μετατροπή δημιουργεί ένα κενό σε ένα ατομικό τροχιακό, θα ακολουθήσει επίσης εκπομπή ακτίνων-X ή ηλεκτρονίων Auger (σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4 : Διάσπαση με εσωτερική μετατροπή (IC)

Η εσωτερική μετατροπή και η καθαρή εκπομπή ακτίνων-γ είναι ανταγωνιστικοί μηχανισμοί διασπάσεως και αυτός που επικρατεί περισσότερο, εξαρτάται από την ενέργεια της μεταπτώσεως, τον ατομικό αριθμό και τη μεταβολή του πυρηνικού σπιν.

Η αποδιέγερση-γ είναι συνήθως ταχύτερη από εκείνες των α και β με χαρακτηριστικούς χρόνους ημιζωής μεταξύ 10^{-17} s και 10^{-10} s. [ΑΣΗ 02].

2.3 Ραδιενέργεια και Νόμοι Διαδοχικής Αποδιέγερσης

Οι ασταθείς πυρήνες έχει καθιερωθεί να λέγονται ραδιενεργοί και η ποσότητα που εκφράζει τον ρυθμό αποδιέγερσης για ένα σύνολο πυρήνων ραδιενέργεια ή ενεργότητα. Ο υπολογισμός του ρυθμού διάσπασης των ραδιενεργών πυρήνων εμφανίζει κάποια ευκολία διότι διέπεται από ένα κοινό νόμο για όλα τα είδη των ραδιενεργών διασπάσεων και πυρήνων.

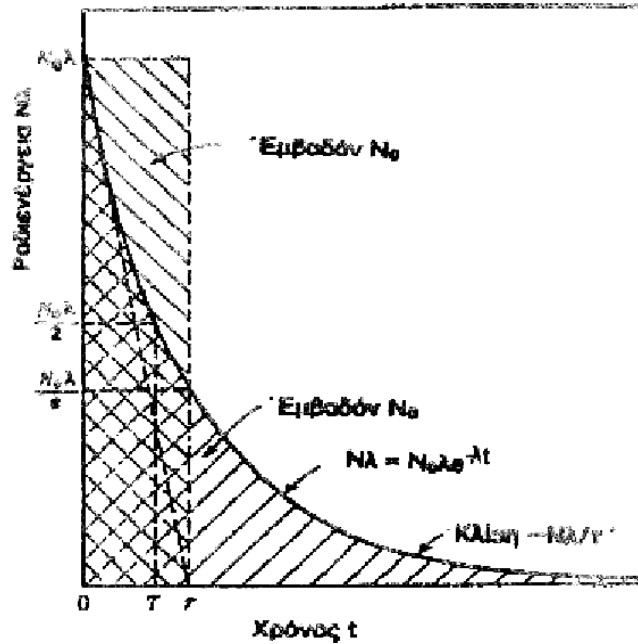
Στις αρχές του αιώνα καθιερώθηκε πειραματικά ο νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων από τους Rutherford και Soddy και περιγράφει την εκθετική μείωση της ενεργότητας ενός ραδιενεργού δείγματος [LEO 87]. Η διαδικασία της πυρηνικής διάσπασης χαρακτηρίζεται από την πιθανότητα εκπομπής ανά μονάδα χρόνου, λ. Η σταθερά διάσπασης λ είναι χαρακτηριστικό του πυρήνα και σε περίπτωση που ο πυρήνας διασπάται με πέραν του ενός τρόπους τότε το λ είναι το άθροισμα των σταθερών διάσπασης για την κάθε διαδικασία. Ο ρυθμός αποδιέγερσης ανά μονάδα χρόνου (ραδιενέργεια) είναι:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.11)$$

όπου N ο αριθμός των πυρήνων. Ολοκληρώνοντας την άνω εξίσωση καταλήγουμε στην εξής:

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (2.12)$$

όπου N_0 είναι ο αριθμός των πυρήνων για $t=0$ sec. Αυτή η εκθετική εξάρτηση που παρουσιάζουν οι N αδιάσπαστοι πυρήνες με το χρόνο φαίνεται στο κάτωθι σχήμα:



Σχήμα 2.5. Χρονική εξέλιξη ενός ραδιενεργού δείγματος με μέσο χρόνο ζωής τ . Η αρχική κλίση της καμπύλης (διακεκομμένη γραμμή) τέμνει τον άξονα του χρόνου στην τιμή τ . Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη αποδιέγερσης είναι ίσο με το πλήθος των ασταθών πυρήνων [ΑΣΗ 02].

Μονάδα μέτρησης της ενεργότητας είναι το Curie (Ci) και ισούται με $3,70 \cdot 10^{10}$ διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο. Η αντιστοιχία αυτής της ποσότητας είναι περίπου ίση με την ενεργότητα ενός γραμμαρίου ραδίου. Η μονάδα ενεργότητας στο σύστημα SI είναι το Becquerel (Bq) και η αντιστοιχία του (Bq) με το (Ci) είναι $1 Ci = 3,70 \cdot 10^{10} Bq$

Παράλληλα ορίζουμε ένα πιο βολικό μέγεθος, το μέσο χρόνο ζωής ως τη μέση τιμή του χρόνου διάσπασης των ασταθών πυρήνων σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tau \equiv \langle t \rangle = \frac{\int_{N_0}^0 t dN}{\int_{N_0}^0 dN} = \frac{\int_0^{\infty} t \frac{dN}{dt} dt}{\int_0^{\infty} \frac{dN}{dt} dt} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.13)$$

καθώς και το χρόνο ημιζωής ή χρόνο υποδιπλασιασμού $t_{1/2}$ ως το χρόνο που απαιτείται ώστε να έχουμε μείωση των πυρήνων στους μισούς των αρχικών. Η σύνδεση των μεγεθών αυτών προκύπτει αν θέσουμε $N=N_0/2$:

$$t_{1/2} = \frac{1}{\lambda} \ln 2 = \tau \ln 2. \quad (2.14)$$

Η πιθανότητα να παρατηρήσουμε N διασπάσεις σε χρόνο Δt ακολουθεί την κατανομή Poisson:

$$P(N, \Delta t) = \frac{m^N}{N!} \exp(-m), \quad (2.15)$$

όπου m είναι ο μέσος αριθμός των διασπάσεων για το χρονικό διάστημα Δt . Η απόκλιση της κατανομής είναι:

$$\sigma = \sqrt{m}. \quad (2.16)$$

2.3.1 Αλυσίδες διασπάσεων

Συχνά παρατηρούμε αλυσίδες ραδιενεργών διασπάσεων από ασταθείς μητρικούς σε ασταθείς θυγατρικούς έως ότου καταλήξουν σε σταθερό πυρήνα. Ένα απλό παράδειγμα είναι το εξής:



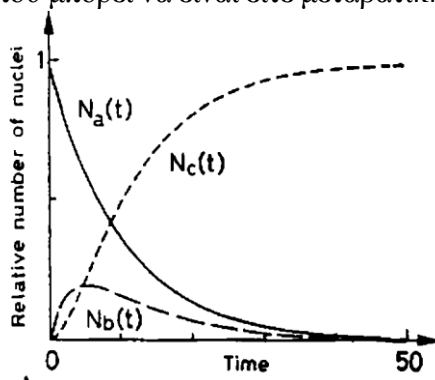
όπου C είναι ο σταθερός πυρήνας. Αν εφαρμόσουμε το νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων για το κάθε κομμάτι της άνωθεν σχέσης έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{dN_a}{dt} &= -\lambda_a N_a, \\ \frac{dN_b}{dt} &= \lambda_a N_a - \lambda_b N_b, \\ \frac{dN_c}{dt} &= \lambda_b N_b, \end{aligned} \quad (2.18)$$

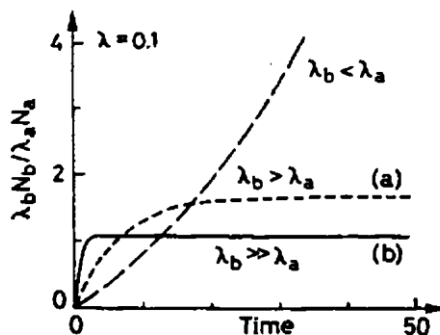
όπου λ_a και λ_b οι αντίστοιχες σταθερές διάσπασης. Αν θεωρήσουμε $N_{b0}=N_{c0}=0$ προκύπτουν οι λύσεις των άνωθεν εξισώσεων :

$$\begin{aligned} N_a(t) &= N_{a0} \exp(-\lambda_a t), \\ N_b(t) &= N_{a0} \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} [\exp(-\lambda_a t) - \exp(-\lambda_b t)], \\ N_c(t) &= N_{a0} \left\{ 1 + \frac{1}{\lambda_b - \lambda_a} [\lambda_a \exp(-\lambda_b t) - \lambda_b \exp(-\lambda_a t)] \right\}, \end{aligned} \quad (2.19)$$

Από τις εξισώσεις αυτές γίνεται φανερό ότι η χρονική εξέλιξη του ραδιενεργού δείγματος εξαρτάται από τους χρόνους ημιζωής του μητρικού και θυγατρικού πυρήνα (σχήμα 2.6). Η διαφορά στο χρόνο υποδιπλασιασμού έχει σαν αποτέλεσμα την αποκατάσταση μίας συνθήκης ισορροπίας μεταξύ των ραδιενεργειών του μητρικού και του θυγατρικού πυρήνα που μπορεί να είναι είτε μεταβατική είτε διαρκής (σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.6: Αλυσίδα ραδιενεργούς αποδιέγερσης τριών πυρήνων [LEO 87]



Σχήμα 2.7: Λόγος ενεργοτήτων θυγατρικού προς μητρικό πυρήνα. Στην καμπύλη (a) έχουμε μεταβατική ισορροπία και στην (b) διαρκή ισορροπία [LEO 87]

Η μεταβατική συνθήκη ισορροπίας αποκαθίσταται όταν ο χρόνος υποδιπλασιασμού του μητρικού πυρήνα είναι περίπου 3-10 φορές μεγαλύτερος από το χρόνο υποδιπλασιασμού του θυγατρικού ($\lambda_a < \lambda_b$), αλλά είναι αρκετά μικρός ώστε να παρατηρείται αισθητή διάσπαση του μητρικού. Η συνθήκη της διαρκούς ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν ο χρόνος ημιζωής του μητρικού πυρήνα είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερος από εκείνον του θυγατρικού ($\lambda_a \ll \lambda_b$).

Όταν ο χρόνος ημιζωής του θυγατρικού νουκλιδίου είναι μεγαλύτερος του μητρικού, τότε σε καμία χρονική στιγμή δεν επιτυγχάνεται ισορροπία. Η ραδιενέργεια του μητρικού μειώνεται συνεχώς ώσπου προσεγγίζει το μηδέν, ενώ η ραδιενέργεια του θυγατρικού αυξάνει μέχρι να φτάσει σε ένα μέγιστο και στη συνέχεια μειώνεται και αυτή, σύμφωνα με το εκθετικό νόμο που αναφέραμε παραπάνω.

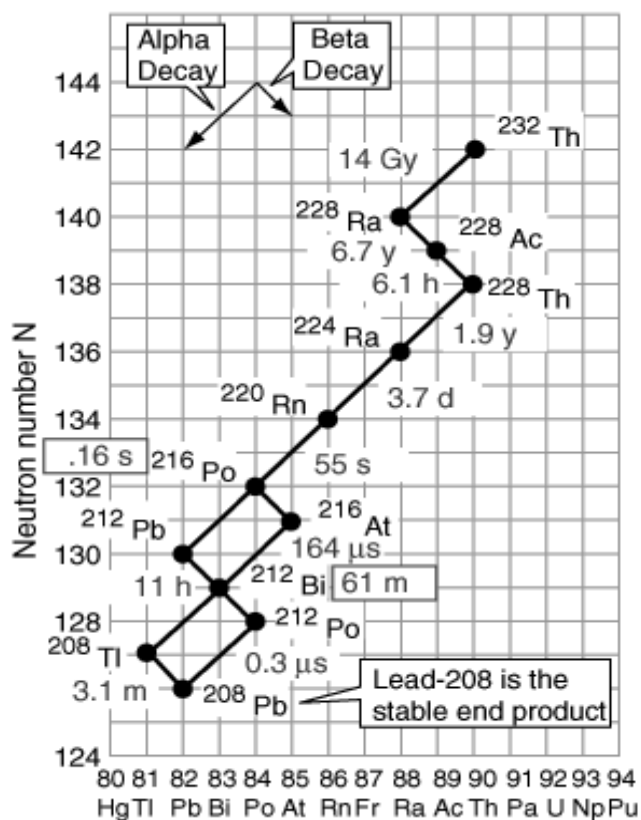
2.4 Φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια

Η ραδιενέργεια που υπάρχει στη Γη μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την πηγή προέλευσής της, την τεχνητή και τη φυσική ραδιενέργεια. Νουκλίδια με $Z > 82$ (στοιχεία μετά του ^{208}Pb) που έχουν βρεθεί στον πλανήτη μας ή έχουν κατασκευαστεί τεχνητά είναι μετασταθή και αποδιεγείρονται με σταδιακές διασπάσεις μέσω εκπομπής ακτινοβολίας- α ή β προς σταθερούς πυρήνες με $Z \leq 82$. Οι ασταθείς πυρήνες που υπάρχουν σήμερα στη φύση προέρχονται είτε από την αρχική πυρηνοσύνθεση (Big Bang), είτε από κοσμικές εκρηκτικές διαδικασίες (π.χ. σουπερνόβα), είτε από πυρηνικές αντιδράσεις που συντελούνται στη γη από φυσικά και ανθρωπογενή αίτια.

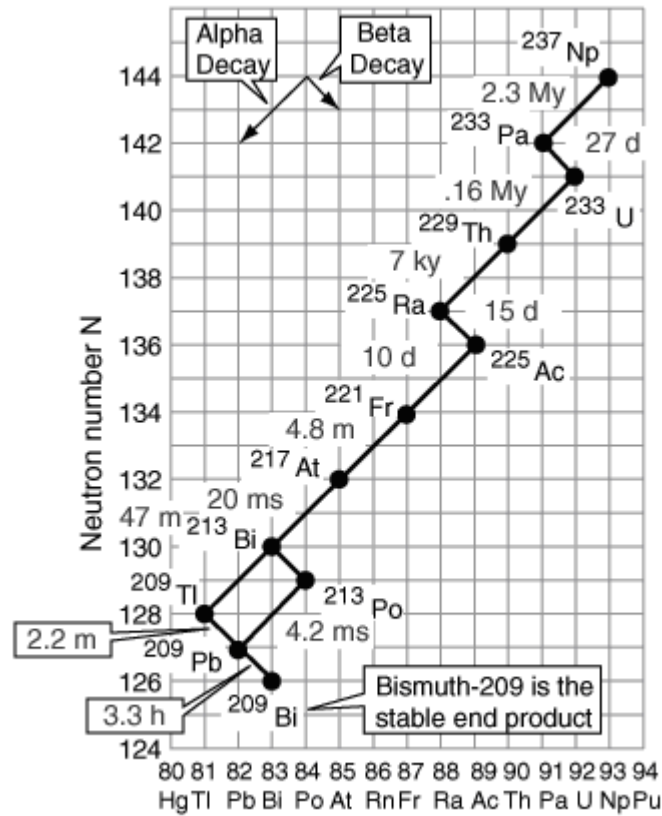
Το μεγαλύτερο ποσοστό φυσικών ραδιονουκλιδίων που βρίσκονται διάχυτα στον στερεό φλοιό της γης, με $Z > 82$, ομαδοποιούνται σε τρεις σειρές φυσικής ραδιενέργειας. Η σειρά του θορίου ($4n$) με μητρικό το ^{232}Th ($t_{1/2} = 1,39 \cdot 10^{10} \text{y}$) και τελικό το ^{208}Pb . Η σειρά του ουρανίου ($4n + 2$) με αρχικό το ^{238}U ($t_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9 \text{y}$) και τελικό το ^{206}Pb . Η σειρά του ακτινίου ($4n + 3$) με αρχικό το ^{235}U ($t_{1/2} = 7,07 \cdot 10^8 \text{y}$) και τελικό το ^{206}Pb . Η σειρά των πυρήνων με μαζικό αριθμό $A = 4n + 1$, που λείπει, ανακαλύφθηκε μετά τη δημιουργία τεχνητών ραδιοϊσοτόπων σε αντιδραστήρες. Σήμερα δεν υπάρχει στη φύση γιατί ο μακροβιότερος πυρήνας της, το ποσειδώνιο έχει χρόνο ημιζωής $2,25 \cdot 10^6$ χρόνια που σημαίνει ότι όλοι οι πυρήνες που δημιουργήθηκαν κατά την κοσμογονία έχουν αποδιεγερθεί. Η τεχνητή αυτή σειρά είναι η σειρά του ποσειδωνίου ($4n+1$) με μητρικό το ποσειδώνιο ^{237}Np ($t_{1/2} = 2,25$) και τελικό το ^{205}Th [ΑΣΗ 02]. Τα κύρια χαρακτηριστικά των τεσσάρων ραδιενεργών σειρών δίνονται στον παρακάτω πίνακα και ακολουθούν τα σχήματα που δείχνουν τις διαδοχικές διασπάσεις για κάθε σειρά.

Σειρά	Ονομασία	Μακροβιότερος πυρήνας	$T_{1/2}$ (y)	Τερματικός πυρήνας
4n	Θορίου	^{232}Th	1.39×10^{10}	^{208}Pb
4n+1	Ποσειδωνίου	^{237}Np	2.25×10^6	^{205}Tl
4n+2	Ουρανίου	^{238}U	4.51×10^9	^{206}Pb
4n+3	Ακτινίου	^{235}U	7.07×10^8	^{207}Pb

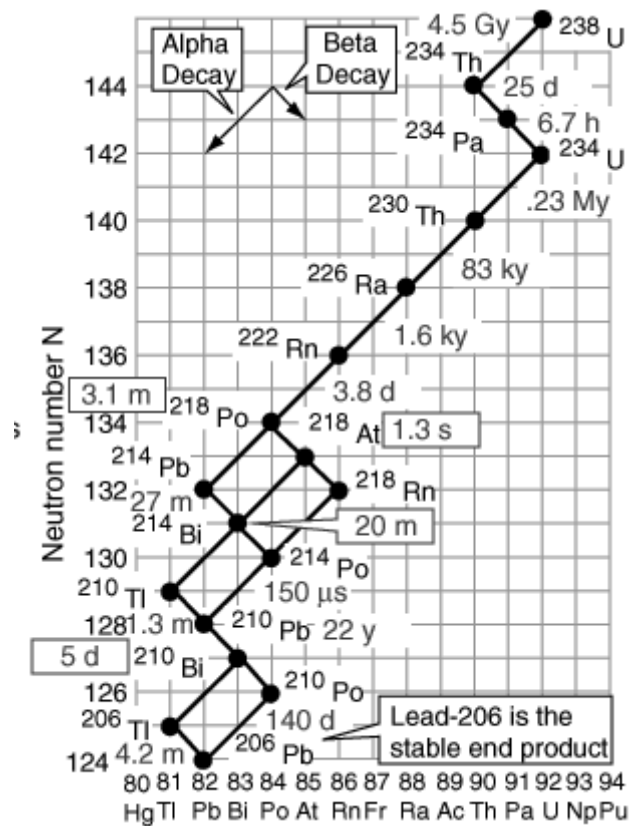
Πίνακας 2.1: Οι τέσσερις ραδιενεργές σειρές [ΑΣΗ 02].



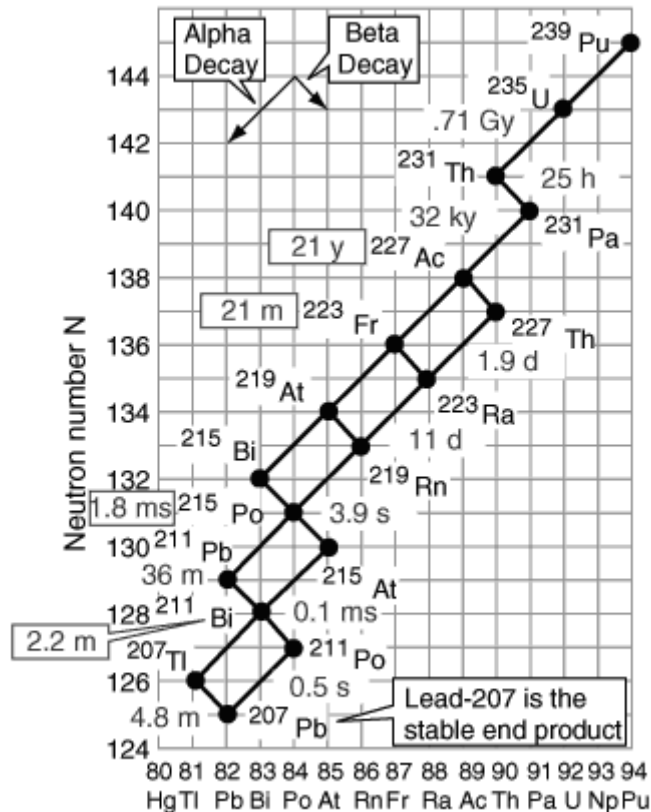
Σχήμα 2.8: Η ραδιενεργός σειρά του Θορίου (4n).



Σχήμα 2.9: Η ραδιενεργός σειρά του Ποσειδωνίου ($4n+1$).



Σχήμα 2.10: Η ραδιενεργός σειρά του Ουρανίου ($4n+2$).



Σχήμα 2.11: Η ραδιενεργός σειρά του Ακτινίου (4n+3).

Πέραν της φυσικής ακτινοβολίας, που είναι και το μεγαλύτερο ποσοστό (~90%), από τους ανθρωπογενείς παράγοντες σημαντικότερος είναι οι ιατρικές εφαρμογές. Σε αυτές περιλαμβάνονται κυρίως οι ακτίνες-X και υπό περιπτώσεις ακτινοβολία πρωτονίων, β, νετρονίων και διαφόρων ραδιοιχνηθετών. Τα σπουδαιότερα ραδιονουκλίδια σε περιπτώσεις χρήσης πυρηνικών όπλων είναι τα $^{239/240}\text{Pu}$, ^{95}Zr , ^{90}Sr και ^{137}Cs . Σε σταθμούς παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, υπό κανονικές συνθήκες εκπέμπεται το αέριο ^{85}Kr σε χαμηλές δόσεις, ενώ σε περιπτώσεις πυρηνικών ατυχημάτων υπάρχουν μεγάλες διαρροές ^{133}Xe (Three Miles Island, Η.Π.Α.) και ^{137}Cs (Chernobyl, Ουκρανία) [ELE 05].

Συνοπτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι κυριότερες πηγές τεχνητής ραδιενέργειας στα θαλάσσια οικοσυστήματα είναι οι δοκιμές πυρηνικών όπλων, οι διαρροές και εναποθέσεις από πυρηνικούς σταθμούς και αντιδραστήρες, η μη σωστή αποθήκευση και ρίψη πυρηνικών αποβλήτων σε θαλάσσιους ορίζοντες, το πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl (1986) και τέλος ατυχήματα πυρηνικών υποβρυχίων και αεροσκαφών.

2.5 Ανίχνευση ακτινοβολίας –γ

Ο μόνος τρόπος που γίνεται αισθητή η ακτινοβολία από τις ραδιενεργές διασπάσεις - και συνεπώς η ύπαρξη των ραδιενεργών στοιχείων - είναι η αλληλεπίδρασή της με την ύλη. Προκειμένου να ταυτοποιηθούν ποιοτικά και ποσοτικά τα ραδιενεργά δείγματα έχουν αναπτυχθεί ανιχνευτικά συστήματα ακτινοβολίας και η φασματοσκοπία μία μαθηματική-εμπειρική μέθοδος ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας επιδιώκεται ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των ραδιενεργών ισοτόπων που υπάρχουν σε υποθαλάσσια

δείγματα, μέσω της φασματοσκοπία-γ, μιας και οι ακτίνες-γ είναι οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες που συνοδεύουν τις πυρηνικές μεταβάσεις

Αντίθετα από τα φορτισμένα σωματίδια, μια καλά ευθυγραμμισμένη δέσμη μονοχρωματικών ακτίνων-γ παρουσιάζει εκθετική απορρόφηση στην ύλη. Αυτό σημαίνει ότι τα παράλληλα φωτόνια της δέσμης που διαπερνούν τον απορροφητή δεν είχαν καμία αλληλεπίδραση με αυτόν, ενώ αυτά που απορροφώνται ή σκεδάζονται έχουν αποβληθεί από την ακτίνα και θεωρούνται ως ενιαίο γεγονός στον εκθετικό νόμο. Η περιγραφή της πιθανότητας μιας τέτοιας αλληλεπίδρασης καθορίζεται από την ενεργό διατομή της διαδικασίας. Η εξασθένιση που υφίσταται η δέσμη των ακτίνων-γ καθώς διέρχεται μέσα από την ύλη έχει εκθετικό χαρακτήρα και ισούται με:

$$dN/N = -\sigma dx \quad (2.20)$$

όπου N είναι ο αριθμός των ακτίνων-γ της δέσμης, dx είναι ο αριθμός των ατόμων ανά μονάδα επιφανείας και σ είναι η ενεργός διατομή της εξασθένισης των φωτονίων. Αν ολοκληρωθεί η παραπάνω σχέση για πάχος ύλης από μηδέν μέχρι x τότε προκύπτει ότι

$$N = N_0 e^{-\sigma x} = N_0 e^{-\mu x} \quad (2.21)$$

που αποτελεί χαρακτηριστική σχέση εκθετικής εξασθένισης παράλληλης δέσμης ακτίνων-γ που εισέρχεται σε λεπτό φύλλο ύλης, όπου $\mu = \sigma$ είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένισης στο συγκεκριμένο υλικό και N_0 ο αρχικός αριθμός των ακτίνων-γ της δέσμης [GAZ 02].

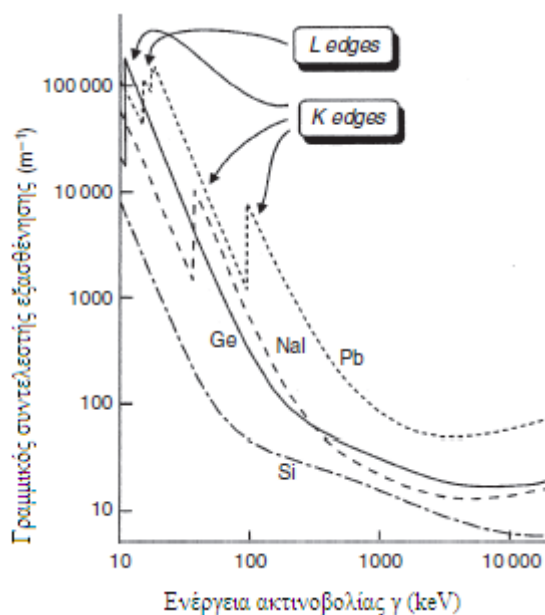
Για την περιοχή ενεργειών που πραγματοποιούνται συνήθως οι πυρηνικές μεταπτώσεις, από 0,01 έως 10 MeV, όλες οι αλληλεπιδράσεις εκτός από πολύ μικρό ποσοστό εξηγούνται από τις εξής διαδικασίες: το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η σκέδαση Compton και η παραγωγή ζεύγους ή δίδυμη γένεση.

2.5.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα άτομο του απορροφητή και εξαφανίζεται εντελώς. Στη θέση του, εκπέμπεται ένα ενεργητικό φωτοηλεκτρόνιο, δηλαδή ένα από τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια στοιβάδας του ατόμου. Η αλληλεπίδραση πραγματοποιείται με το άτομο συνολικά και όχι με ελεύθερα ηλεκτρόνια. Για ακτίνες-γ αρκετής ενέργειας, η προέλευση των φωτοηλεκτρονίων είναι πιο πιθανό να προέρχεται από τις πιο στενά συνδεδεμένες όπως η K στοιβάδα του ατόμου. Το φωτοηλεκτρόνιο εμφανίζεται με μια ενέργεια που δίδεται από την σχέση :

$$E_e = h\nu - E_b \quad (2.22)$$

όπου το E_b αντιπροσωπεύει την ενέργεια σύνδεσης του φωτοηλεκτρονίου στην αρχική στοιβάδα του. Για ακτίνες-γ με ενέργεια μεγαλύτερη από μερικές εκατοντάδες keV, το φωτοηλεκτρόνιο φέρει το μεγαλύτερο ποσοστό της αρχικής ενέργειας των φωτονίων.



Εικόνα 2.1: Συντελεστής εξασθένησης της ακτινοβολίας-γ συναρτήσει της ενέργειας για διάφορα υλικά [GIL 08]

Η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau \propto \frac{Z^n}{E_\gamma^m} \quad (2.23)$$

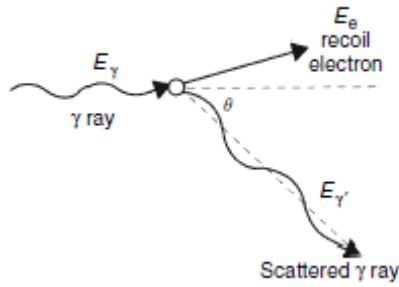
όπου τα n και m λαμβάνουν τιμές από 3 έως 5 αναλόγως την ενέργεια. Προφανώς Z είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων του απορροφητή.

2.5.2 Σκέδαση Compton

Το φαινόμενο Compton είναι μία ελαστική σκέδαση ενός φωτονίου με ένα ατομικό ηλεκτρόνιο κατά την οποία το πρώτο σκεδάζεται κατά μία γωνία θ από την αρχική του κατεύθυνση. Το φωτόνιο μεταφέρει μέρος της ενέργειας του στο ηλεκτρόνιο, γνωστό ως ηλεκτρόνιο ανάκρουσης (recoil electron). Η ενέργεια του σκεδαζόμενου φωτονίου δίνεται από τη σχέση:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (2.24)$$

όπου $m_0 c^2$ η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου (0.511 MeV) και $h\nu$, $h\nu'$ η ενέργεια της προσπίπτουσας και της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας αντίστοιχα.



Σχήμα 2.12: Σχηματική αναπαράσταση σκέδασης Compton [GIL 08].

Η πιθανότητα σκέδασης Compton δίνεται από τον τύπο :

$$\sigma = \text{σταθερά} + \frac{Z}{E_\gamma} \quad (2.25)$$

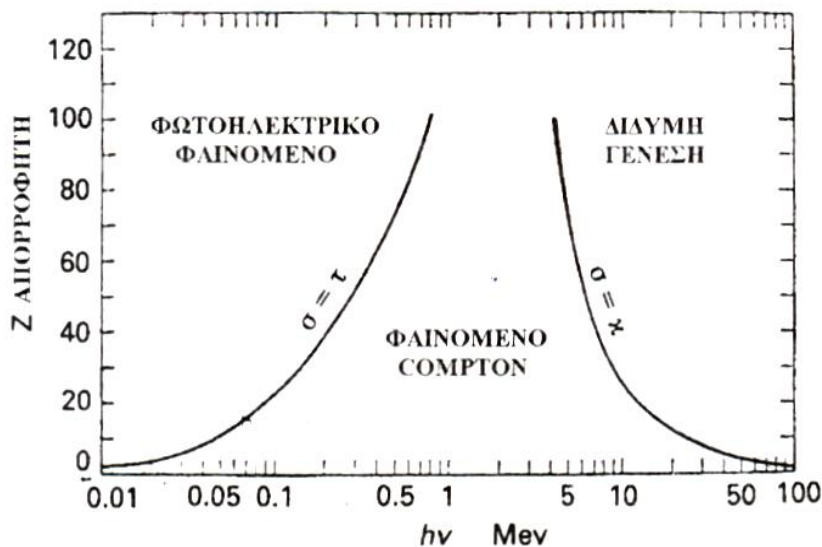
Η σκέδαση Compton συμβαίνει πιθανότερα σε φωτόνια ενέργειας 0.6-4 MeV και για αυτό είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός αλληλεπίδρασης για τις χαρακτηριστικές ακτίνες-γ των πηγών ραδιοϊσοτόπων σε απορροφητικά υλικά μεγάλου Z.

2.5.3 Δίδυμη γένεση

Για τιμές των φωτονίων που υπερβαίνουν το διπλάσιο της μάζας ηρεμίας του ηλεκτρονίου (1.022 MeV), μπορεί να σχηματισθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου, όπου το καθένα σωματίδιο κατέχει ένα πλεόνασμα ενέργειας υπό μορφή κινητικής ενέργειας. Το φαινόμενο παραγωγής ζεύγους πραγματοποιείται παρουσία ενός πεδίου Coulomb, εκείνου που δημιουργεί ο πυρήνας. Η πιθανότητα παραγωγής ζεύγους σχετίζεται με την ενέργεια της ακτινοβολίας-γ και με το Z του απορροφητή και δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$\kappa \propto \text{σταθερά} * f(E_\gamma, Z) \quad (2.26)$$

Παρακάτω παρατίθεται η σχετική συνεισφορά μεταξύ των τριών διαδικασιών αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας-γ με την ύλη:



Σχήμα 2.13: Σχετική συνεισφορά της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης, της σκέδασης Compton και της δίδυμης γένεσης ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων.[ΓΑΖ 02]

2.6 Εφαρμογές ραδιενέργειας

Η ραδιενέργεια βρίσκει πολλές εφαρμογές, καθώς η χρήση πολλών ραδιενεργών ισοτόπων δίνει σημαντικές πληροφορίες σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης ζωής. Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή της είναι η ραδιοχρονολόγηση, όπου ο κλασικός τρόπος ραδιοχρονολόγησης γίνεται με τον ραδιενεργό άνθρακα ^{14}C .

Να αναφερθεί το γεγονός ότι η χρησιμοποίηση του C ως μέθοδος ραδιοχρονολόγησης είναι ιδανική για την περίπτωση της χρονολόγησης αρχαίων ευρημάτων των ιστορικών και προϊστορικών χρόνων, ενώ στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η χρονολόγηση παλαιότερων ευρημάτων χρησιμοποιείται το ασταθές ισότοπο ^{40}K . Τέλος, για την ραδιοχρονολόγηση νερών χρησιμοποιείται το φυσικό τρίτιο ^3H , το οποίο δημιουργείται στα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας.

Μία άλλη εφαρμογή της ραδιενέργειας είναι η ιχνηθέτηση, η οποία εφαρμόζεται στην γεωργία, στη βιομηχανία και πολλές άλλες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, στον τομέα της γεωργίας με την εισαγωγή ιχνών ραδιενεργού φωσφόρου ^{32}P στα φωσφορούχα λιπάσματα μελετάται πώς αντιδρούν τα ενεργά συστατικά των λιπασμάτων στα διάφορα φυτά, οπότε με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η ακριβής ποσότητα λιπάσματος που χρειάζεται κάθε φυτό, άρα μειώνεται σημαντικά το κόστος των καλλιεργειών. Παρόμοια, ραδιενεργοί ιχνηθέτες όπως ^{35}S , σε μόρια εντομοκτόνων χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της διαδρομής τους στις τροφικές αλυσίδες. Στον τομέα της βιομηχανίας, μικρές προσμίξεις ^{32}P στο υλικό ενός ελαστικού χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της φθοράς του ελαστικού. Αλλά, και βιομηχανίες που χρησιμοποιούν επικίνδυνα υλικά για την υγεία των εργαζομένων προσθέτουν ίχνη ραδιενεργών ισοτόπων, όπως ^{197}Hg ή ^{36}Cl , στις δεξαμενές αποθήκευσης για τον έλεγχο διαρροών.

Επίσης, οι μετατροπές υλικών αποτελούν εφαρμογές της ραδιενέργειας. Η ραδιοακτινοβολία είναι μία μη καταστροφική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον πολυμερισμό υλικών. Τελευταία χρησιμοποιείται και για την κατασκευή πλαστικού ξύλου, όπως επίσης και για την εμφύτευση ιόντων για να γίνουν πιο ανθεκτικά τα μέταλλα. Χρήσιμη είναι η ακτινοβολία και στην εξάλειψη του στατικού ηλεκτρισμού στον αέρα, καθώς και στον ιονισμό του αέρα, που προκαλείται κατά τη λειτουργία ορισμένων ανιχνευτών καπνού [ΑΣΗ 02].

Στην αποστείρωση η ραδιενέργεια παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς χρησιμοποιείται για την αποστείρωση ιατρικών εργαλείων και βιολογικής λάσπης για λιπάσματα, για τη συντήρηση έργων τέχνης με τον καθαρισμό τους από υλικά βιολογικά, όπως είναι η μούχλα, καθώς και για τη συντήρηση τροφίμων. Για το τελευταίο, ακτινοβολημένες πατάτες, πουλερικά και κρέας διατηρούνται χωρίς να αλλιώνονται για περισσότερο από ένα έτος εκτός ψυγείου [YOU 91].

Όμως, η πιο σημαντική εφαρμογή της ραδιενέργειας είναι στη διαγνωστική ιατρική. Η εισαγωγή ραδιενεργών ισοτόπων στον ανθρώπινο οργανισμό προσδιορίζει τη λειτουργία ή την απεικόνιση διαφόρων οργάνων του σώματος. Η χρήση του ραδιενεργού ιωδίου ^{131}I σε διαγνωστικές μελέτες του θυρεοειδούς είναι γνωστό παράδειγμα. Στον ασθενή γίνεται χορήγηση μίας μικρής ποσότητας ιωδίου και η ταχύτητα με την οποία συγκεντρώνεται το ισότοπο αυτό στον θυρεοειδή αποτελεί ένδειξη της υγιούς ή μη λειτουργίας αυτού. Άλλα ραδιενεργά ισότοπα που χρησιμοποιούνται στη διαγνωστική ιατρική είναι ο ^{11}C που συγκεντρώνεται στους πνεύμονες, το ^{18}F στα οστά και στο πάγκρεας, ενώ το ^{67}Ga και το ^{76}As στους κακοήθεις όγκους. Βέβαια, το πιο διαδεδομένο ισότοπο στη διαγνωστική ιατρική σήμερα είναι το τεχνητό ^{99}Tc . Έχει χρόνο ημιζωής 6,01 ώρες, συγκεντρώνεται σε κακοήθεις όγκους του εγκεφάλου και παρέχει απεικόνιση του όγκου χωρίς χειρουργική επέμβαση [ΑΣΗ 02].

Βέβαια δεν θα πρέπει να ξεχνάμε τις αρνητικές επιπτώσεις που μπορεί να προκληθούν από λανθασμένη, εκούσια ή ακούσια χρήση της ραδιενέργειας. Οι βλάβες από ιοντίζουσες ακτινοβολίες μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες στους βιολογικούς οργανισμούς:

α) τα σωματικά αποτελέσματα, (εγκαύματα, καρκινογένεσεις, καταστροφή μορίων και ιστών κ.ά..) στα οποία η βλάβη εμφανίζεται στον οργανισμό που ακτινοβολείται και

β) τα κληρονομικά αποτελέσματα, τα οποία εμφανίζονται στους απογόνους του, στα γονίδια των αναπαραγωγικών κυττάρων (μετάλλαξη DNA).

2.7 Εφαρμογές ραδιενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον

Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια αφορούν σε μετρήσεις ραδιονουκλιδίων στο θαλασσινό νερό και στο ίζημα χρησιμοποιώντας τόσο την τεχνική εργαστηρίου όσο και την επιτόπια καταγραφή. Τα κυριότερα ισότοπα που μελετώνται ερευνητικά μέσω φασματοσκοπίας ακτίνων - γ είναι τα φυσικά ισότοπα του ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K και το ανθρωπογενές ^{137}Cs λόγω των πυρηνικών δοκιμών και πυρηνικών ατυχημάτων. Επίσης σημαντικοί ιχνηθέτες για τη μελέτη υπογείου και θαλασσινού νερού είναι οι θυγατρικοί πυρήνες του ραδονίου (^{222}Rn) και θορονίου (^{220}Rn) επειδή βρίσκονται σε αέρια κατάσταση και παρουσιάζουν 100% διαλυτότητα με το νερό. Παρακάτω δίνονται συνοπτικά κάποιες εφαρμογές που έχουν υλοποιηθεί σε ερευνητικά προγράμματα του ΕΛΚΕΘΕ.

α) Εκτίμηση χρόνου παραμονής και ηλικίας νερού από υποθαλάσσιες εκβολές στην παράκτια ζώνη (προγράμματα ΣΤΟΥΠΑ, submarine groundwater discharge, 2009-2010).

β) Μελέτη μεταφοράς θαλάσσιων μαζών χρησιμοποιώντας ως ιχνηθέτη το μακρόβιο ισότοπο ^{137}Cs (Διακρατική Συνεργασία Ελλάδος – Ιταλίας, 2004-2006).

γ) Εκτίμηση ρυθμού ίζηματογένεσης και απόθεσης από τις κορυφές του ^{137}Cs την περίοδο του ατυχήματος Chernobyl και των πυρηνικών δοκιμών (Πρόγραμμα ΔΟΑΕ, IAEA RER/7/003: Marine Assessment 2005-2010).

δ) Εκτίμηση χρόνου καθόδου βροχής (και ύψους νεφών) μέσω μέτρησης θυγατρικών ισοτόπων ραδονίου (^{214}Pb και ^{214}Bi) σε δείγματα βροχής (Εσωτερικό πρόγραμμα ΕΛΚΕΘΕ).

ε) Μέτρηση συγκέντρωσης/μεταβολών θυγατρικών ισοτόπων του ραδονίου πάνω σε υποθαλάσσια ρήγματα (πρόγραμμα ESONET, 2009-2011). Τα δεδομένα θα συσχετίζονται με μικροσεισμικότητα της περιοχής και θα συμβάλλουν σε σεισμολογικά μοντέλα εκτίμησης επικινδυνότητας (risk assessment).

στ) Χαρτογράφηση ραδιομόλυνσης πυθμένα παράκτιων περιοχών λόγω βιομηχανικής δραστηριότητας (εργοστάσια παραγωγής λιπασμάτων, βιομηχανία πετρελαιοειδών και άλλα, πρόγραμμα IAEA RER/7/003: Marine Assessment 2005-2010). Μελλοντική εφαρμογή η παρακολούθηση ραδιενέργειας κοντά σε παράκτιους αντιδραστήρες.

ζ) Συνεχής παρακολούθηση ραδιενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον τόσο σε περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις ισοτόπων όσο και σε περιοχές μελλοντικής

λειτουργίας παράκτιων αντιδραστήρων για την εκτίμηση του υποβάθρου (Πρόγραμμα ΠΟΣΕΙΔΩΝ).

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια έχει εστιαστεί στη συνεχή καταγραφή του ραδονίου μέσω των θυγατρικών πυρήνων (^{214}Pb και ^{214}Bi) με σκοπό τη μελέτη σεισμικών ρηγμάτων, καθώς και των γλυκών νερών που εκβάλουν στη θάλασσα. Το ραδόνιο, ως ευγενές ραδιενεργό αέριο, παρουσιάζει υψηλή διαλυτότητα στο νερό (θαλάσσιο ή υπόγειο) στο οποίο εισέρχεται μέσω του υπεδάφους με σχετικά σταθερή ροή. Ωστόσο, οι τάσεις που αναπτύσσονται στο υπέδαφος πριν και κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος επηρεάζουν την εκροή και ως εκ τούτου και τη συγκέντρωσή του στο νερό. Μελέτες στην ηπειρωτική περιοχή γύρω από τη θάλασσα Μαρμαρά, έδειξαν σημαντική μεταβολή της συγκέντρωσης ραδονίου πριν την εκδήλωση ενός αριθμού σεισμικών γεγονότων. Απώτερος σκοπός είναι ο εμπλουτισμός δεδομένων ραδονίου στις υπάρχουσες βάσεις σεισμικών δεδομένων. Η συσχέτιση συγκεντρώσεων ραδονίου με δεδομένα μικρό-σεισμικότητας (για μεγάλα χρονικά διαστήματα) θα δώσει σημαντική πληροφορία στη ερμηνεία σεισμικών φαινομένων αφού μεταβολές ραδονίου δεν μπορούν να προκληθούν από άλλες αιτίες (ιδιαίτερα στα μεγάλα βάθη όπου η επιρροή της ατμόσφαιρας και της κοσμικής ακτινοβολίας αγνοείται).

Επίσης η Σχολή ΕΜΦΕ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών αλλά και με ευρωπαίους συνεργάτες, έχει ξεκινήσει τη μελέτη διασποράς των ραδιονουκλιδίων σε κλειστές θαλάσσιες περιοχές (κλειστούς κόλπους) με τη βοήθεια υπάρχοντος λογισμικού. Η μελέτη αυτή έχει ξεκινήσει για το Θερμαϊκό κόλπο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός του ραδιενεργού ισότοπου ^{137}Cs που υπάρχει σε θαλάσσια δείγματα από διάφορες περιοχές του Αιγαίου, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της φασματοσκοπίας-γ.

Στο πρώτο μέρος αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζεται το αρχικό στάδιο της πειραματικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε. Αφορά στον τόπο και τον τρόπο συλλογής θαλασσιών δειγμάτων όγκου 20 L από διάφορα βάθη και λεκάνες του Αιγαίου, καθώς και στην επεξεργασία και προετοιμασία τους για ραδιοανίχνευση. Αρχικά παρουσιάζονται κάποια τοπολογικά στοιχεία της περιοχής. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μεθοδολογία, ο τρόπος και οι ακριβείς τοποθεσίες των δειγμάτων μας.

Στο δεύτερο τμήμα αυτού του κεφαλαίου θα περιγραφεί η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη και την ανίχνευσή της από τα υπάρχοντα ανιχνευτικά συστήματα. Αρχικά θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι βασικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας-γ με τα άτομα που συναντά κατά το πέρασ της και ο τρόπος με τον οποίο εξασθενεί. Κατόπιν παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας που διέπουν τους ανιχνευτές ακτινοβολίας-γ καθώς και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται περιληπτικά τα κυριότερα είδη ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δίνοντας έμφαση στους ανιχνευτές Ge(HP) και NaI(Tl), που είναι οι επικρατέστεροι σήμερα. Τέλος, παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, κάνοντας ιδιαίτερη αναφορά στον ανιχνευτή Ge(HP), καθώς και οι απαραίτητες βαθμονομήσεις του συστήματός μας.

Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η διαδικασία της μορφοποίησης των αρχικών μας θαλασσιών δειγμάτων σε τέτοια μορφή ώστε να είναι κατάλληλα να μετρηθούν από την ανιχνευτική μας διάταξη.

3.1 Δειγματοληψία και δειγματοποίηση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα ραδιονουκλίδια διαφέρουν από τα υπόλοιπα νουκλίδια μιας και εκπέμπουν ιοντίζουσες ακτινοβολίες, οι οποίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν βλάβες στους ζωντανούς οργανισμούς πυροδοτώντας επιβλαβείς χημικές αντιδράσεις στους ιστούς. Απαιτούνται δέκα χρόνια ημιζωής για να έχουμε απώλεια του 99.9% της ενεργότητας του ραδιονουκλιδίου. Αν ο χρόνος ημιζωής ενός ραδιενεργού νουκλιδίου είναι πολύ μικρός (δευτερόλεπτα ή λεπτά), μπορεί να θεωρηθεί μη επιβλαβές, μίας και το μεγαλύτερο ποσοστό του υλικού αυτού θα έχει αποδιεγερθεί μέχρι να εισέλθει στην τροφική αλυσίδα ή στα αποθέματα νερού. Παρομοίως, αν ο χρόνος υποδιπλασιασμού είναι πολύ μεγάλος, της τάξης μεγέθους εκατομμυρίων χρόνων, δεν θα παραχθεί σημαντικό ποσοστό ραδιενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής του ζώντος οργανισμού που το έχει απορροφήσει μέσω της τροφικής αλυσίδας. Για ραδιονουκλίδια όμως όπως το ^{137}Cs με χρόνο ημιζωής 30 χρόνια οι επιπτώσεις από τη ραδιενέργεια είναι σημαντικές, ανάλογα με την ποσότητα που έχει απορροφηθεί. Το ^{137}Cs αποτελεί έναν ισχυρό εκπομπό ακτινοβολίας-γ και αυτή του η ιδιότητα το καθιστά ως ικανοποιητικό ιχνηθέτη σε θαλάσσια και ποταμίσια δείγματα [SUS 96]. Αυτή του η εφαρμογή οφείλεται στο ότι είναι διαλυτό ραδιονουκλίδιο στο θαλασσινό νερό, καθώς και ότι έχει παραμείνει στο

θαλάσσιο περιβάλλον από προηγούμενες πυρηνικές δοκιμές και απόβλητα πυρηνικών αντιδραστήρων.

Το ^{137}Cs αποτελεί έναν από τους ραδιενεργούς ρύπους από το ατύχημα του Chernobyl οι οποίοι ρυπάνανε κατά κύριο λόγο τόσο τη Βαλτική όσο και τη Μαύρη Θάλασσα. Όσον αφορά στη Μεσόγειο, η κύρια είσοδος ραδιενεργών ρύπων από το ατύχημα ήταν η ατμοσφαιρική απόθεση (τουλάχιστον $2.8 \text{ PBq } ^{137}\text{Cs}$), ενώ η συνεισφορά της Μαύρης Θάλασσας εκτιμήθηκε να είναι περίπου 0.03 PBq .

3.1.1 Τοπολογικά χαρακτηριστικά

Το Αιγαίο πέλαγος είναι μία από τις λεκάνες της Ανατολικής Μεσογείου. Στο βόρειο μέρος του συνδέεται με τη Θάλασσα του Μαρμαρά (η οποία συνδέεται με τη Μαύρη Θάλασσα) μέσω των στενών των Δαρδανελίων. Στο νότιο μέρος του Αιγαίου πελάγους βρίσκεται το νησί της Κρήτης, όπου τα νερά και του βόρειου και του νότιου Κρητικού πελάγους παρουσιάζουν διαφορετικές (σε σχέση με τις τιμές του Βόρειου Αιγαίου) ωκεανογραφικές και γεωλογικές/γεωφυσικές παραμέτρους. Η επιφάνεια του Αιγαίου Πελάγους είναι περίπου $1.8 \times 10^{11} \text{ m}^2$ ενώ ο όγκος του είναι της τάξης $8.5 \times 10^{13} \text{ m}^3$ με μέσο βάθος τα 450m, όπως έχουμε αναφερθεί παραπάνω. Στις διαφορές ερευνητικές εργασίες το Αιγαίο Πέλαγος χωρίζεται σε Βόρειο και Νότιο Πέλαγος με «διαχωριστική γραμμή» τα νησιά των Κυκλάδων. Ωστόσο, στη βιβλιογραφία περιγράφεται ένας εναλλακτικός τρόπος τμηματοποίησης σε τρεις υποπεριοχές: το Βόρειο Αιγαίο, που καλύπτει την περιοχή βόρεια των βορείων Σποράδων έως τη Λήμνο, το κεντρικό Αιγαίο, μεταξύ των παραπάνω αναφερόμενων νησιών και των Κυκλάδων και τέλος, το Νότιο Αιγαίο φραγμένο βόρεια από το αρχιπέλαγος των Κυκλάδων και νότια από την Κρήτη. Επίσης μία εναλλαγή από βαθιές υπο-λεκάνες, ρηχές υφαλοκρηπίδες και νησιωτικά οροπέδια χαρακτηρίζουν το Αιγαίο Πέλαγος. Χαρακτηριστικές βαθιές λεκάνες για την κάθε περιοχή είναι οι λεκάνες του Άθω και της Βόρειας Σκύρου (Βόρειο Αιγαίο), η λεκάνη της Χίου (Κεντρικό Αιγαίο) και οι λεκάνες του Μυρτώου και Κρητικού Πελάγους (Νότιο Αιγαίο).

Η λεκάνη του Άθω έχει μέγιστο βάθος 980m και ανήκει στην τάφρο βυθού της θάλασσας για το Βόρειο Αιγαίο. Η τάφρος αυτή διασχίζει το Βόρειο Αιγαίο με κατεύθυνση Α προς ΝΑ και Δ προς ΝΔ. Αποτελείται από τις λεκάνες των Βορείων Σποράδων, του Άθω και της Λήμνου. Το Βόρειο Αιγαίο συνδέεται με το Κεντρικό μέσω μίας ράχης σε βάθος 400m που συνδέει τις Βόρειες Σποράδες με το νησιωτικό οροπέδιο της Λήμνου. Οι κύριες υπο-λεκάνες του Κεντρικού Αιγαίου είναι εκείνες της Βόρειας Σκύρου, της Βόρειας Χίου και της Νότιας Χίου. Το ρηχό οροπέδιο του Αρχιπέλαγους των Κυκλάδων χωρίζει το Κεντρικό από το Νότιο Αιγαίο, αν και υπάρχει για τα μεσαία βάθη μία ράχη βάθους 400m που τα συνδέει και η οποία ξεκινά από το ανατολικό άκρο του οροπεδίου των Κυκλάδων. Το Νότιο Αιγαίο αποτελείται από τις υπό-λεκάνες του Μυρτώου και Κρητικού Πελάγους και χωρίζεται από τις κύριες λεκάνες της Ανατολικής Μεσογείου, του Ιονίου και της Λεβαντίνης, μέσω των δυτικών και ανατολικών στενών του Κρητικού τόξου. Η λεκάνη της Λεβαντίνης βρίσκεται στην Ανατολική Μεσόγειο, συγκεκριμένα νότια της Ρόδου και επεκτείνεται έως και τις ανατολικές ακτές της Μεσογείου.

Έτσι στις περιπτώσεις που δεν έχουμε σημαντικές κατακόρυφες μεταφορές στις θαλάσσιες στήλες, τα νερά του Αιγαίου Πελάγους για βάθη μεγαλύτερα των 400m παραμένουν ανεπηρέαστα στις διάφορες υπο-λεκάνες. Με παρόμοιο τρόπο, το βάθος, περίπου 1000m, της θαλάσσιας ράχης των στενών του Κρητικού τόξου προσδιορίζει το μέγιστο βάθος επιρροής από το Ιόνιο και τη Λεβαντίνη στη θαλάσσια στήλη του Κρητικού Πελάγους.

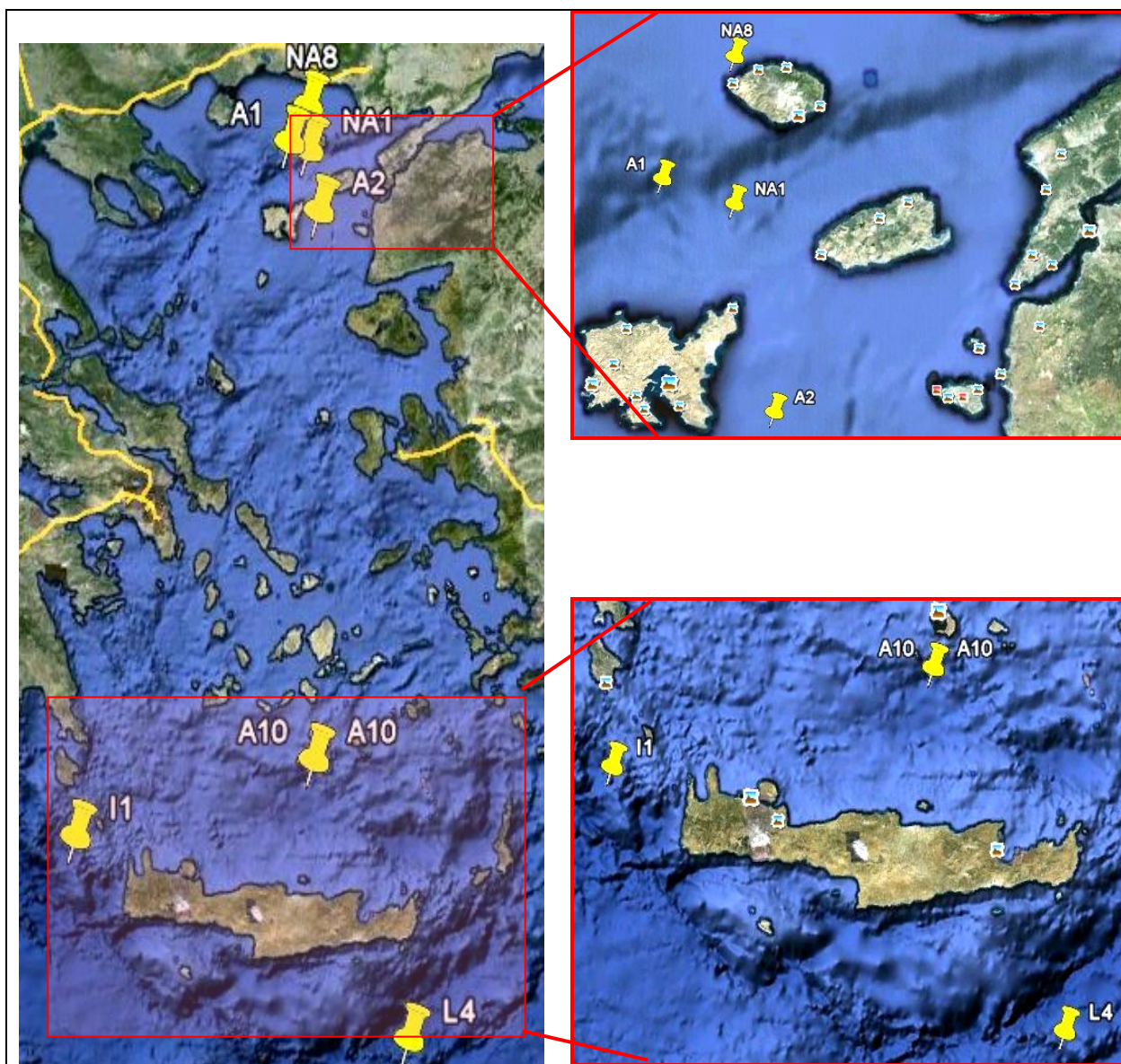
Η τοπογραφία (χωροθέτηση) του Αιγαίου Πελάγους, καθώς και η σύνδεσή του από τη μία πλευρά με τη Μαύρη Θάλασσα μέσω των στενών των Δαρδανελίων και από την άλλη με το Ιόνιο και τη Λεβαντίνη μέσω των στενών του Κρητικού τόξου προσδιορίζουν την υδρολογική δομή της περιοχής. Η έξοδος των Δαρδανελίων προμηθεύει το Αιγαίο με ένα υφάλμυρο, κρύο, ελαφρύ και πολύ λεπτό (20-40m) επιφανειακό στρώμα νερού. Το στρώμα αυτό καλύπτει το Βόρειο Αιγαίο και διαδίδεται προς τα νότια κατά μήκος των δυτικών ακτών, ακολουθώντας μία γενική (αριστερόστροφη) κυκλική κίνηση [ZER 02]. Το ενδιάμεσο στρώμα του Αιγαίου Πελάγους, στο επίπεδο των 400m, αποτελείται από νερό προερχόμενο από τη Λεβαντίνη μέσω των ανατολικών στενών του Κρητικού τόξου και ακολουθεί και αυτό μία κυκλική κίνηση. Οι θαλάσσιες μάζες αυτές εκτείνονται έως την επιφάνεια κατά μήκος των δυτικών ακτών του Κεντρικού Αιγαίου, όπου δεν έχουμε το επιφανειακό στρώμα νερού από τη Μαύρη Θάλασσα (BSW). Τα νερά που είναι πιο βαθιά από 400m, για τις διάφορες περιοχές του Αιγαίου Πελάγους, γεμίζουν τις πλευρικά απομονωμένες λεκάνες. Η κίνηση των νερών αυτών προσδιορίζεται αποκλειστικά από τις κατακόρυφες τυρβώδεις διαχύσεις κατά τη διάρκεια λιμναζουσών περιόδων [ZER 03]. Η τάση του ^{137}Cs παρουσιάζει μία μείωση από το επιφανειακό προς το μεσαίο στρώμα νερού και μία αύξηση από εκεί έως το μέγιστο βάθος της λεκάνης. Οι βαθιές θαλάσσιες μάζες χαρακτηρίζονται από τις μέγιστες συγκεντρώσεις ενεργότητας ^{137}Cs , ενώ τα νερά της Λεβαντινής έχουν τις χαμηλότερες τιμές αν συγκριθούν με τις τιμές της κατακόρυφης κατανομής.

3.1.2 Μέθοδος δειγματοληψίας

Η συλλογή θαλάσσιων δειγμάτων έγινε χρησιμοποιώντας το ερευνητικό σκάφος «ΑΙΓΑΙΟ» του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος SESAME. Οι δειγματοληψίες έγιναν από το επιστημονικό προσωπικό του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. τόσο σε βαθιές λεκάνες του Αιγαίου και του Ιονίου όσο και σε περιοχές με μεγάλο ενδιαφέρον όπως στην έξοδο των Δαρδανελίων, στη Βόρεια Λήμνο και στη Δυτική Σαμοθράκη. Οι δειγματοληψίες έγιναν σε διάφορα βάθη ανάλογα με τα είδη των θαλάσσιων μαζών που παρατηρήθηκαν από προκαταρκτική μελέτη με τους αισθητήρες αλατότητας, θερμοκρασίας και πυκνότητας του θαλασσινού νερού σε όλο το κάθετο προφίλ. Έγιναν δειγματοληψίες σε δύο περιόδους: η 1^η περίοδος ήταν η υγρή περίοδος μετά τις βροχές (Απρίλιος 2008) και η 2^η περίοδος ήταν η ξηρή περίοδος (Αύγουστος 2008). Τα σημεία της δειγματοληψίας φαίνονται στον χάρτη της Εικόνας 3.1.

Για τα παρακάτω στοιχεία χρησιμοποιήθηκε ειδικός σκελετός που περιείχε δειγματολήπτη νερού (ροζέτα) αλλά και ενσωματωμένους αισθητήρες αλατότητας, θερμοκρασίας, πυκνότητας και διαλυμένου οξυγόνου. Η ροζέτα και οι αισθητήρες ποντίστηκαν με ακρίβεια στα ζητούμενα βάθη χρησιμοποιώντας ειδικό συρματοσκόινο και βίντσι του ωκεανογραφικού σκάφους του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. Η ροζέτα (rosette) (Σχήμα 3.3) είναι μία διάταξη για λήψη δειγμάτων που αποτελείται από 12 (μικρά) ή 24 (μεγάλα) δοχεία Niskin (τα δοχεία φαίνονται στην Εικόνα 3.4 τοποθετημένα σε εργαστηριακό χώρο).

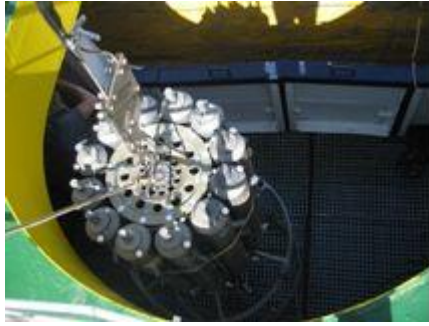
Τέλος στον Πίνακα 3.1. παρατίθενται όλα τα στοιχεία της δειγματοληψίας που έγινε στη συγκεκριμένη εργασία. Πιο συγκεκριμένα δίνονται οι συντεταγμένες των θέσεων δειγματοληψίας, το μέγιστο βάθος της περιοχής, το βάθος της δειγματοληψίας και η αντίστοιχη ημερομηνία που λήφθηκε το εκάστοτε δείγμα. Ο όγκος όλων των δειγμάτων ήταν 20L. Τα δείγματα μεταφέρθηκαν μετά το τέλος του ταξιδιού στο εργαστήριο του ΕΛΚΕΘΕ.



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση σε χάρτη των σημείων δειματοληψίας στο Αιγαίο Πέλαγος



Εικόνα 3.2: Το πλοίο του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. «Αιγαίο»



Εικόνα 3.3: Ροζέτα



Εικόνα 3.4: Δοχεία Niskin τα οποία τοποθετήθηκαν πάνω στη ροζέτα

Cruise	Σταθμός	Ημερ/νία	Γεωγραφικό μήκος [degrees_east]	Γεωγραφικό πλάτος [degrees_north]	Μέγιστο βάθος [m]	Βάθος [m]
SEASON 1						
A1						
SES_1_03_08	A01E	2008-04-04	25,25	40,26	1550	5
SES_1_03_08	A01E	2008-04-04	25,25	40,26	1550	20
SES_1_03_08	A01E	2008-04-04	25,25	40,26	1550	50
SES_1_03_08	A01E	2008-04-04	25,25	40,26	1550	200
SES_1_03_08	A01E	2008-04-04	25,25	40,26	1550	750
SES_1_03_08	A01E	2008-04-04	25,25	40,26	1550	1550
A2						
SES_1_03_08	A02A	2008-04-04	25,52	39,78	95	5
SES_1_03_08	A02A	2008-04-04	25,52	39,78	95	10
SES_1_03_08	A02A	2008-04-04	25,52	39,78	95	50
SES_1_03_08	A02A	2008-04-04	25,52	39,78	95	88
A10						
SES_1_03_08	A10E	2008-04-02	25,28	36,07	1790	4
SES_1_03_08	A10E	2008-04-02	25,28	36,07	1790	200
SES_1_03_08	A10E	2008-04-02	25,28	36,07	1790	750
SES_1_03_08	A10E	2008-04-02	25,28	36,07	1790	1000
SES_1_03_08	A10E	2008-04-02	25,28	36,07	1790	1790
NA1						
SES_1_03_08	NA1	6/4/2008	25° 26.14E	40° 12.46N	456	10
SES_1_03_08	NA1	6/4/2008	25° 26.14E	40° 12.46N	456	75
NA8						
SES_1_03_08	NA8	10/4/2008	25° 26.74E	40° 30.05N	85	10
SES_1_03_08	NA8	10/4/2008	25° 26.74E	40° 30.05N	85	50
SEASON 2						
A10						
SES_2_08_08	S2_A10F	2008-09-04	25,28	36,07	1805	4
SES_2_08_08	S2_A10F	2008-09-04	25,28	36,07	1805	200
SES_2_08_08	S2_A10F	2008-09-04	25,28	36,07	1805	750
SES_2_08_08	S2_A10F	2008-09-04	25,28	36,07	1805	1000
SES_2_08_08	S2_A10F	2008-09-04	25,28	36,07	1805	1805
I1						
SES_2_08_08	S2_I01A	2008-08-30	23	35,6	2151	8
SES_2_08_08	S2_I01A	2008-08-30	23	35,6	2151	160
SES_2_08_08	S2_I01A	2008-08-30	23	35,6	2151	250
SES_2_08_08	S2_I01A	2008-08-30	23	35,6	2151	450
SES_2_08_08	S2_I01A	2008-08-30	23	35,6	2151	1050
SES_2_08_08	S2_I01A	2008-08-30	23	35,6	2151	2151
L4						
SES_2_08_08	S2_L04	2008-08-30	26,1	34,13	2902	3
SES_2_08_08	S2_L04	2008-08-30	26,1	34,13	2902	50
SES_2_08_08	S2_L04	2008-08-30	26,1	34,13	2902	250
SES_2_08_08	S2_L04	2008-08-30	26,1	34,13	2902	1250
SES_2_08_08	S2_L04	2008-08-30	26,1	34,13	2902	2300
SES_2_08_08	S2_L04	2008-08-30	26,1	34,13	2902	2902

Πίνακας 3.1: Συντεταγμένες και στοιχεία της δειγματοληψίας

Για κάθε δείγμα λαμβάνεται συνολική ποσότητα περίπου 20 L θαλασσινού νερού, το οποίο αποθηκεύεται σε δοχεία πολυαιθυλενίου. Στο πεδίο (δηλαδή στο σημείο που έχει γίνει η δειγματοληψία) γίνεται άμεση όξυνση του δείγματος με HCl 37% w/w μέχρι pH~1-1,5 (~1ml HCl/1 l H₂O).

3.2 Χημική επεξεργασία δειγμάτων

Τα δείγματα του νερού (20 λίτρα ανά δείγμα) αφού συλλεχθούν από το θαλάσσιο χώρο, μεταφέρονται στο ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. Εκεί υφίστανται μία συγκεκριμένη χημική επεξεργασία με σκοπό τη συγκράτηση των διαφόρων ιχνοστοιχείων που υπάρχουν διαλυμένα στο θαλάσσιο νερό. Με τον τρόπο αυτό τα δείγματα παίρνουν τελικά την μορφή ιζήματος. Η μέθοδος που ακολουθείται έχει αναπτυχθεί για την συγκράτηση του καυσίου, πλην όμως κάποια επιπλέον ιχνοστοιχεία συγκρατούνται μερικώς. Η πλειονότητα όμως των υπολοίπων στοιχείων, όπως αυτά που προέρχονται από την μεταστοιχείωση του ^{238}U και του ^{232}Th , αποβάλλονται. Για την εύρεση του συντελεστή απόδοσης της μεθόδου, δηλαδή του λόγου της τελικής ποσότητας του καυσίου μετά την μετατροπή του κάθε δείγματος σε ίζημα προς την αρχική του ποσότητα στο αντίστοιχο θαλάσσιο δείγμα, χρησιμοποιείται σαν ιχνηθέτης ποσότητα ^{134}Cs ειδικής ενεργότητας 2Bq/ml. Το ισότοπο αυτό δεν υπάρχει στα συλλεγόμενα θαλάσσια δείγματα. Έτσι η ποσοτική του ανίχνευση στα τελικά δείγματα μετά την εξωτερική του προσθήκη σε κάποιο στάδιο της διαδικασίας που περιγράφεται αναλυτικά πιο κάτω, αποτελεί μία ασφαλή μέθοδο προσδιορισμού του συντελεστή απόδοσης. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για να γίνει η σχετική διόρθωση στα αποτελέσματα των μετρήσεων της περιεκτικότητας του ^{137}Cs στο νερό. Τα βήματα που ακολουθούνται για την χημική αυτή επεξεργασία είναι τα εξής:

- Στα εργαστήρια του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. η ποσότητα αυτή των 20 περίπου λίτρων ογκομετρείται και μεταφέρεται σε ανοιχτό δοχείο πολυαιθυλενίου. Ελέγχεται το pH να είναι 1-1,5 (με HCl 37% w/w) και σημειώνεται ακριβώς ο όγκος του δείγματος (εικόνα 3.8).
- Ξεκινά η ήπια μηχανική ανάδευση του δείγματος και προστίθεται 1 ml ^{134}Cs ειδικής ενεργότητας 2 Bq/ml, δηλαδή ενεργότητας ανά μονάδα όγκου (ιχνηθέτης).
- Διαλύονται 15gr AMP (Ammonium Phosphomolybdate Hydrate) σε οξυνισμένο απεσταγμένο νερό με μαγνητική ανάδευση σε ποτήρι των 50 ml.
- Διακόπτεται η ανάδευση, προστίθεται το διάλυμα του AMP και συνεχίζεται η ανάδευση για περίπου 3-4 ώρες.
- Στη συνέχεια το διάλυμα αφήνεται να ηρεμήσει (6-8 ώρες) μέχρι να καταβυθιστεί το ίζημα.
- Αποχύνεται το υπερκείμενο διαυγές διάλυμα και μεταγγίζεται το ίζημα με τη βοήθεια του οξυνισμένου απεσταγμένου νερού (pH 1) σε μικρότερο δοχείο (2ή 5 L). Ξεπλένονται προσεχτικά τα τοιχώματα του αρχικού δοχείου έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η παραλαβή όλης της ποσότητας του ιζήματος.
- Αφήνεται το ίζημα να κατακαθίσει για χρονικό διάστημα μερικών ωρών έως ότου το υπερκείμενο διάλυμα γίνει διαυγές. Το υπερκείμενο αυτό διάλυμα αποχύνεται και μεταφέρεται το ίζημα στο δοχείο στο οποίο θα γίνει και η τελική μέτρηση.
- Τοποθετείται το τελικό διάλυμα στο φούρνο στους 40⁰C μέχρι να ξηρανθεί τελείως. Η τελική ποσότητα του ιζήματος που προκύπτει από τα δείγματα των 20 L θαλασσινού νερού είναι περίπου 15g (εικόνα 3.9) [DUT 70].



Εικόνα 3.9(αριστερά): Αρχική μορφή δειγμάτων. Στην εικόνα φαίνεται και το δοχείο ογκομέτρησης.



Εικόνα 3.10(δεξιά): Τα 15 gr AMP και στο πίσω μέρος συσκευή για τη μαγνητική ανάδευση.



Εικόνα 3.11 (αριστερά): Το 1ml ^{134}Cs που χρησιμοποιούμε ως έλεγχο για τη χημική απόδοση της μεθόδου μας.



Εικόνα 3.12 (δεξιά): Τελική μορφή δειγμάτων. Έχει προστεθεί πούδρα (talk) ώστε να γεμίσει το τελικό δοχείο και να μην χαλάσει η γεωμετρία του δείγματος.

Στην Εικόνα 3.12 φαίνεται η τελική γεωμετρία των δειγμάτων μας. Χρησιμοποιήθηκε αυτό το δοχείο προκειμένου να εφαρμόζει στο παράθυρο του ανιχνευτή, το οποίο έχει και αυτό κυκλική διατομή και το δείγμα μας να τοποθετηθεί σε όσο το δυνατόν ευρεία επιφάνεια για να αποφύγουμε μεγάλες ενδοαπορροφήσεις. Η τοποθέτηση πάνω από το δείγμα μας με πούδρα μέχρι να συμπληρωθεί πλήρως το δοχείο, έγινε κυρίως για λόγους διατήρησης της γεωμετρίας του δείγματος για το ανιχνευτικό σύστημα του εργαστηρίου του Ε.Μ.Π., στο οποίο τα δείγματα τοποθετούνται σε οριζόντια και όχι σε κατακόρυφη θέση. Επίσης επιλέχθηκε η πούδρα, διότι είναι το υλικό το οποίο περιέχει τη λιγότερη δυνατή φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια. Τέλος, πρέπει να προστεθεί ότι η βαθμονόμηση του ανιχνευτικού μας συστήματος έγινε και με βάση τη γεωμετρία του δοχείου, χρησιμοποιώντας πηγή ^{152}Eu όπως περιγράφεται παρακάτω.

3.3 Ανιχνευτική διάταξη

Πριν προχωρήσουμε στη μετέπειτα χημική επεξεργασία και ανάλυση των δειγμάτων μας είναι ωφέλιμο να αναφερθούμε στο σύστημα με το οποίο έγιναν οι λήψεις των μετρήσεων και σε κάποια στοιχεία θεωρίας του ανιχνευτικού μας συστήματος.

3.3.1 Ανιχνευτές ακτινοβολίας

Οι ανιχνευτές είναι ειδικές διατάξεις με τη βοήθεια των οποίων γίνεται αντιληπτή η παρουσία της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Η βασική αρχή κατασκευής ενός ανιχνευτή είναι η μεταφορά μέρους ή όλης της ενέργειας της ακτινοβολίας ή ενός φορτισμένου σωματιδίου στον κύριο όγκο του ανιχνευτή για τη μετατροπή της σε ορατό ή αναγνωρίσιμο φαινόμενο. Μπορούν να μας δώσουν πληροφορίες για το χρόνο άφιξης, τη θέση, την ενέργεια και την ταυτότητα της ακτινοβολίας.

Οι ανιχνευτικές διατάξεις σχεδιάζονται για κάθε ακτινοβολία που αλληλεπιδρά με συγκεκριμένο υλικό μέσο και παράγει κάποιο ανιχνεύσιμο σήμα. Είναι συστήματα που αποτελούνται από ένα θάλαμο με αέριο ή κρύσταλλο που αποτελεί το υλικό ανίχνευσης της ακτινοβολίας, τα ηλεκτρόδια συλλογής του παραγόμενου φορτίου από την ακτινοβολία, το οποίο μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, καθώς και διατάξεις ελέγχου των παραμέτρων της διάταξης [ΓΑΖ 02].

3.3.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανιχνευτών

Οι βασικοί μετρήσιμοι παράγοντες, που αποτελούν βασικό στοιχείο για κάθε ανιχνευτικό σύστημα και καθορίζουν την επιλογή ενός ανιχνευτή για ένα συγκεκριμένο πείραμα, είναι τρεις : η απόδοση, η διακριτική ικανότητα και ο νεκρός χρόνος του ανιχνευτή.

α) ανιχνευτική ικανότητα (efficiency)

Η απόδοση ή ανιχνευτική ικανότητα (efficiency) είναι το μέτρο της ικανότητας του ανιχνευτή να ανιχνεύει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό της εκπεμπόμενης από μία πηγή ακτινοβολία ανά μονάδα χρόνου σε μια συγκεκριμένη απόσταση. Η ανιχνευτική ικανότητα εξαρτάται από τρεις παράγοντες:

1. Τον γεωμετρικό παράγοντα (ϵ_{Ω}).

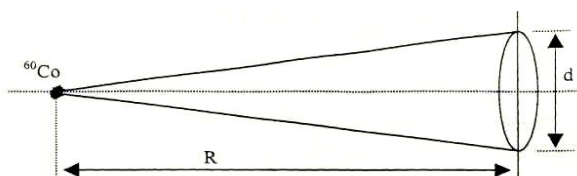
Ο παράγοντας αυτός ορίζεται ως η στερεά γωνία Ω που σχηματίζεται μεταξύ της πηγής που εκπέμπει και της επιφάνειας του ανιχνευτή διαιρεμένη με 4π , δηλαδή

$$\epsilon_{\Omega} = \Omega/4\pi \quad (3.1)$$

Η στερεά γωνία Ω εξαρτάται από τη θέση της πηγής σε σχέση με τον ανιχνευτή και δίνεται από τη σχέση:

$$\Omega = \int_S \frac{\cos \phi}{R^2} dS \quad (3.2)$$

όπου S η επιφάνεια του ανιχνευτή, R η απόσταση μεταξύ πηγής και ενός στοιχειώδους τμήματος dS της επιφάνειας του ανιχνευτή και ϕ είναι η γωνία μεταξύ της καθέτου στο dS και της κατεύθυνσης της πηγής.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία πηγής ισοτόπου και ανιχνευτή με επιφάνεια S σε απόσταση R ορίζοντας στερεά γωνία $\Omega = S/R^2$. [ΒΛΑ 03]

2. Την (ολική) εσωτερική ανιχνευτική ικανότητα (Total Intrinsic Efficiency)

Η ολική εσωτερική απόδοση ορίζεται ως το κλάσμα του αριθμού των σωματιδίων που ανιχνεύονται προς τον αριθμό των σωματιδίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή, δηλαδή

$$\varepsilon_{\text{εσωτερική}} = \frac{N_{\text{ανιχνεύμενα}}}{N_{\text{εισερχόμενα}}} \quad (3.3)$$

3. Την εσωτερική απόδοση της φωτοκορυφής (Internal Peak Efficiency)

Ο παράγοντας αυτός ισχύει μόνο για την περίπτωση ανίχνευσης φωτονίων. Ορίζεται ως το κλάσμα του αριθμού των φωτονίων που ανιχνεύονται στη φωτοκορυφή προς τον αριθμό των φωτονίων που ανιχνεύτηκαν γενικά, δηλαδή

$$\varepsilon_{\text{φωτοκορυφή}} = \frac{N_{\text{φωτοκορυφή}}}{N_{\text{εισερχόμενα}}} \quad (3.4)$$

Σε ένα φάσμα των ακτίνων-γ μέρος των γεγονότων καταγράφονται πλήρως (φωτοκορυφή) ενώ το υπόλοιπο αποτελεί το υπόβαθρο Compton. Επομένως η ολική ή απόλυτη απόδοση (Absolute Efficiency) είναι το γινόμενο των τριών παραγόντων και ορίζεται ως το κλάσμα του αριθμού των σωματιδίων που ανιχνεύονται στη φωτοκορυφή προς τον αριθμό αυτών που εκπέμπει η πηγή, δηλαδή

$$\varepsilon_{\text{ολική}} = \varepsilon_{\Omega} \varepsilon_{\text{εσωτερική}} \varepsilon_{\text{φωτοκορυφή}} = \frac{N_{\text{φωτοκορυφή}}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}} \quad (3.5)$$

Για τον προσδιορισμό της ταυτότητας ενός ανιχνευτή φωτονίων, η ολική ανιχνευτική του ικανότητα δίνεται για ορισμένη γεωμετρία (απόσταση πηγής-ανιχνευτή 25cm) και για καθορισμένη ενέργεια φωτονίων (φασματική γραμμή 1.33 MeV του ^{60}Co). Για ορισμένα είδη ανιχνευτών, όπως των σπινθηριστών, δίνεται η απόλυτη ανιχνευτική ικανότητα, ε χαρακτηριστικό παράδειγμα την απόλυτη ανιχνευτική ικανότητα ενός σπινθηριστή NaI(Tl) διαστάσεων 7.6 x 7.6 cm (3' x 3'), που είναι 1.2×10^{-3} . Αντίθετα, σε ανιχνευτές ημιαγωγών όπως οι HPGe, δίνεται η σχετική ανιχνευτική ικανότητα ως προς ένα σπινθηριστή NaI(Tl) διαστάσεων 7.6 x 7.6 cm. Για παράδειγμα, εάν ένας HPGe έχει σχετική ανιχνευτική ικανότητα 80%, η απόλυτη ολική του ανιχνευτική ικανότητα είναι $0.8 \times 1.2 \times 10^{-3}$ [EYΣ 04].

Παράλληλα ορίζονται και άλλες δύο μετρήσιμες ποσότητες :

- Λόγος κορυφής προς σύνολο (Peak to Total Ratio) – (P.T.R.) = $\frac{N_{\text{φωτοκορυφή}}}{N_{\text{ανιχνευομενα}}}$

Των φωτονίων που συνεισέφεραν σε οποιαδήποτε κορυφή ενέργειας του φάσματος προς αυτών που ανιχνεύτηκαν σε ένα ορισμένο χρόνο.

- Σχετική ανιχνευτική ικανότητα Ge (Relative Efficiency)-

$$(\text{R.E.})_{\text{Ge}} = \frac{(\varepsilon_{\text{ολ}})_{\text{Ge}}}{(\varepsilon_{\text{ολ}})_{\text{NaI}}} = \frac{N_{\text{φωτοκορυφή}}^{\text{Ge}}}{N_{\text{ανιχνευομενα}}^{\text{NaI}}} \quad (3.6)$$

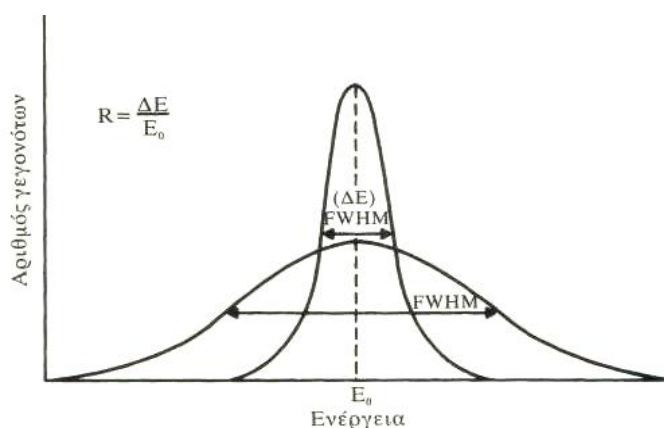
των φωτονίων που συνεισέφεραν στην κορυφή ενέργειας 1.33 MeV του φάσματος πηγής ^{60}Co σε ανιχνευτή Ge προς αυτών με ίδια γεωμετρία σε ανιχνευτή NaI, σύμφωνα με το καθιερωμένο μέτρο έκφρασης της ανιχνευτικής ικανότητας ενός ανιχνευτή Ge που αναφέρθηκε παραπάνω.

β) διακριτική ικανότητα (resolution)

Η ενεργειακή διακριτική ή διαχωριστική (resolution) ικανότητα ενός ανιχνευτή εκφράζει την ικανότητά του να ξεχωρίζει φωτόνια ή σωματίδια τα οποία έχουν γειτονική ενέργεια. Μέτρο της ικανότητας αυτής είναι το FWHM (Full Width at Half Maximum) της φωτοκορυφής που καταγράφεται και ορίζεται ως το πλάτος της κατανομής ΔE στο ενεργειακό φάσμα των φωτονίων σε ύψος ακριβώς στο μέσο της κορυφής. Ο ορισμός αυτός επιβάλλει την αναγκαία συνθήκη ότι οποιοδήποτε υπόβαθρο θεωρείται αμελητέο μπροστά στην κορυφή. Η σχετική διακριτική ικανότητα ορίζεται ως:

$$\text{Relative Resolution} = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{FWHM}{E_0} \quad (3.7)$$

όπου E_0 είναι η μέση τιμή του ύψους.



Σχήμα 3.2: Ενεργειακή διακριτική ικανότητα για έναν ανιχνευτή παλμών [EHM & VAN 91].

γ) νεκρός χρόνος (dead time)

Ο νεκρός χρόνος ή χρόνος απόκρισης (dead time) του ανιχνευτικού συστήματος είναι η ελάχιστη χρονική διάρκεια που απαιτείται ώστε το σύστημα να μπορέσει να ανακάμψει μετά την πρόπτωση μίας ακτίνας και να αποκριθεί στην επόμενη. Ο νεκρός χρόνος εξαρτάται από τις ιδιότητες του ανιχνευτή και του συστήματος καταγραφής.

Ως επιπλέον χαρακτηριστικά ενός ανιχνευτή θεωρούνται: η ευαισθησία και η απόκριση του ανιχνευτή.

Ως ευαισθησία (sensitivity) ενός ανιχνευτή θεωρείται η ικανότητα του να παράγει ένα χρήσιμο σήμα για ένα συγκεκριμένο τύπο ακτινοβολίας και ενέργειας. Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω κάθε ανιχνευτής κατασκευάζεται για συγκεκριμένη ακτινοβολία και συγκεκριμένο εύρος ενεργειών. Η «παράβαση» αυτών των ορίων οδηγεί είτε σε μη επαρκές σήμα είτε σε μεγάλη μείωση της ανιχνευτικής ικανότητας.

Η απόκριση του ανιχνευτή (detector response) δηλώνει την ικανότητα κάποιων ανιχνευτών να δώσουν πληροφορίες για την ενέργεια της ακτινοβολίας. Αυτό ισχύει για τις περιπτώσεις που ένα ποσοστό από τον ιονισμό που θα προκληθεί λόγω της ακτινοβολίας είναι αναλογικό με την απώλεια ενέργειας στον κύριο όγκο του ανιχνευτή. Εάν ο ανιχνευτής είναι επαρκώς μεγάλος ώστε να έχουμε πλήρη απορρόφηση, τότε ο ιονισμός αποτελεί ένα μέτρο της ενέργειας της ακτινοβολίας. Βέβαια δεν είναι πάντοτε γραμμική η σχέση μεταξύ του ύψους του παλμού και της

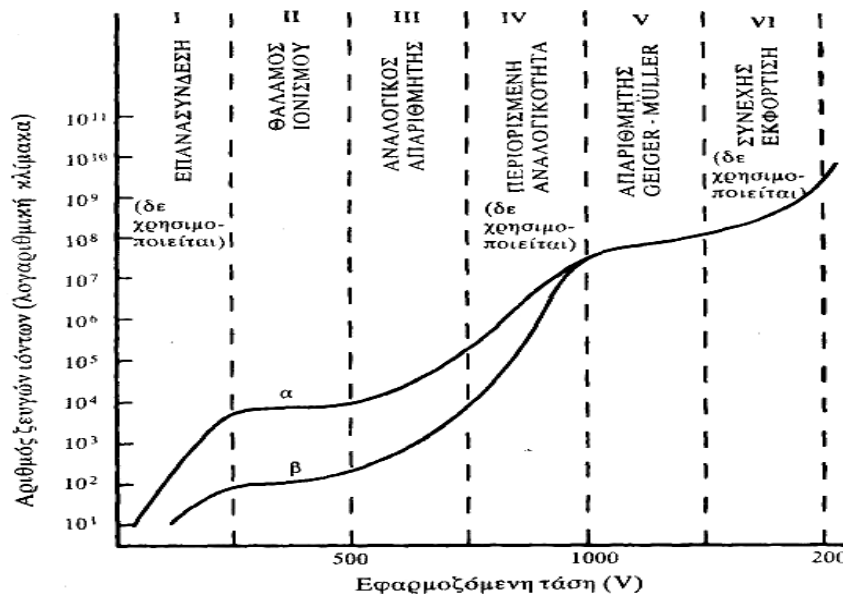
ενέργειας, για τους περισσότερους ανιχνευτές η γραμμικότητα ισχύει για ορισμένο εύρος ενεργειών [LEO 08].

3.3.1.2 Είδη ανιχνευτών

Οι ανιχνευτικές διατάξεις χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται για να καταγράψουν την τροχιά της ακτινοβολίας, ανάλογα με το είδος και την ενέργεια της ακτινοβολίας που μπορούν να ανιχνεύσουν ή ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται. Υπάρχουν, λοιπόν, οι ανιχνευτές αέριας, υγρής και στερεάς κατάστασης, οι ανιχνευτές άλφα, βήτα και γάμμα ακτινοβολίας, οι ανιχνευτές μέτρησης ενέργειας των αδρονίων (αδρονικά καλορίμετρα), οι ανιχνευτές μέτρησης ενέργειας των ηλεκτρονίων και φωτονίων (ηλεκτρομαγνητικά καλορίμετρα), οι ανιχνευτές ειδικοί για εφαρμογές στην ιατρική κ.α. [GAZ 02]. Παρακάτω παρατίθενται τα διάφορα είδη ηλεκτρονικών ανιχνευτών, που χρησιμοποιούνται για φορτισμένα σωμάτια και ακτινοβολία- γ , που μας ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία, δίνοντας έμφαση στους ανιχνευτές Ge και NaI, που είναι οι συνηθέστεροι στην ανίχνευση ακτίνων- γ ραδιενεργών πυρήνων.

α) ανιχνευτές αερίων

Η λειτουργία των ανιχνευτών αερίων στηρίζεται στη συλλογή των ιόντων συνολικά, που παράγονται μέσα στον ειδικό θάλαμο του ανιχνευτή, ο οποίος είναι γεμάτος με αέριο, εξαιτίας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο θάλαμος είναι δυνατόν να είναι κλειστός ή να επιτρέπει τη συνεχή ροή του αερίου μετρήσης. Όταν η ακτινοβολία προσπέσει στο θάλαμο αλληλεπιδρά με τα άτομα του αερίου ionίζοντάς τα. Εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου που έχει εφαρμοστεί στα άκρα του θαλάμου, τα θετικά φορτισμένα ιόντα έλκονται από τον αρνητικό πόλο της πηγής (κάθοδο) και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται προς τον θετικό πόλο (άνοδος). Ο αριθμός των ιόντων που παράγονται στο θάλαμο και καταφθάνουν στα ηλεκτρόδια συλλογής εξαρτάται από το σχεδιασμό του θαλάμου, το αέριο πλήρωσης, την εφαρμοζόμενη τάση και την ενέργεια της ionτίζουσας ακτινοβολίας. Η απώλεια ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας για το σχηματισμό ενός ζεύγους ιόντων σε ένα αέριο είναι περίπου 30-35 eV. Η πραγματική τιμή διαφέρει λίγα eV ανάλογα με τον τύπο του αερίου, καθώς επίσης με το είδος και την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στο σχήμα που ακολουθεί διακρίνονται οι έξι περιοχές λειτουργίας των ανιχνευτών αερίων για της καμπύλες α - και β -διάσπασης.



Σχήμα 3.3: Περιοχές λειτουργίας ενός ανιχνευτή αερίων [EHM & VAN 91]

Στην περιοχή I, που λέγεται περιοχή επανασυνδέσεων, δεν λειτουργεί ο ανιχνευτής γιατί γίνεται επανασύνδεση ιόντων με τα αφόρτιστα μόρια πριν γίνει η συλλογή τους από τα ηλεκτρόδια του θαλάμου, οπότε ο αριθμός των ιόντων που καταφέρνουν να συλληχθούν είναι αρκετά μικρός. Προφανώς αυτή η περιοχή δεν είναι χρήσιμη για την ανίχνευση.

Στην περιοχή II, περιοχή λειτουργίας των θαλάμων ιονισμού, ο αριθμός των ιόντων που συλλέγονται είναι σταθερός ανεξάρτητα από την τάση που εφαρμόζεται για να εξαναγκασθούν τα ιόντα να κινηθούν προς τα ηλεκτρόδια. Αυτό συμβαίνει γιατί η τάση που εφαρμόζεται είναι 50-500V, αρκετή για να συλληχθούν όλα τα ζεύγη ιόντων που σχηματίζονται από απλά φαινόμενα ιονισμού αλλά όχι αρκετή για να επιταχυνθούν τα ιόντα και να προκαλέσουν δευτερογενή ιόντα.

Στην περιοχή III, περιοχή λειτουργίας του αναλογικού απαριθμητή, ο αριθμός των ιόντων που συλλέγονται είναι ανάλογος της εφαρμοζόμενης τάσης και εκτείνεται σε τάσεις των 500-750V.

Στην περιοχή IV, η γραμμική σχέση μεταξύ ενέργειας και ακτινοβολίας και παραγόμενου σήματος, αρχίζει να χειροτερεύει. Αυτή η περιοχή περιορισμένης αναλογικότητας, δεν χρησιμοποιείται για ανίχνευση.

Στην περιοχή V, παρατηρείται κορεσμός στα ζεύγη των παραγόμενων ιόντων που συλλέγονται και το δυναμικό του ανιχνευτή αυξάνει ώστε ένα απλό γεγονός ιονισμού να προκαλεί την ηλεκτρική εκκένωση του σωλήνα. Η περιοχή αυτή ονομάζεται Geiger-Muller, μιας και αυτή είναι η περιοχή λειτουργίας του απαριθμητή.

Στην περιοχή VI, όπου έχουμε πολύ υψηλό δυναμικό, συμβαίνει συνεχής εκκένωση του αερίου, επομένως δε χρησιμεύει στην ανίχνευση της ακτινοβολίας.

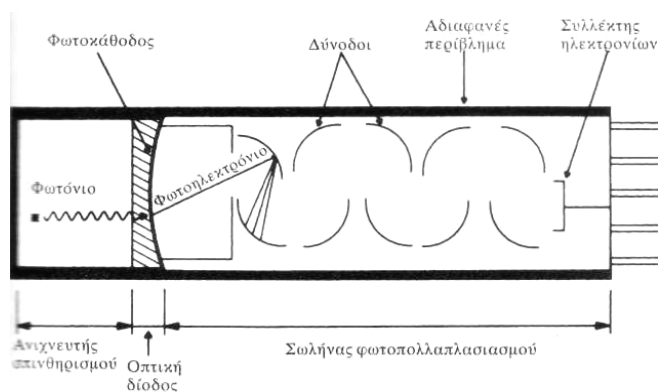
Γνωστά παραδείγματα ανιχνευτών αερίου είναι οι θάλαμοι ιονισμού, οι αναλογικοί απαριθμητές και οι απαριθμητές Geiger-Muller. Ανιχνευτές αυτού του είδους είναι εύκολο να κατασκευαστούν (απλότητα σχεδιασμού και χαμηλό κόστος), χειρίζονται εύκολα, είναι ανθεκτικοί και χρειάζονται μικρό εξοπλισμό για να λειτουργήσουν. Πλεονεκτήματά τους είναι η κατασκευή τους σε διάφορα μεγέθη και σχήματα και η ευαισθησία τους σε μεγάλο φάσμα ακτινοβολιών. Από την άλλη μεριά, τα μειονεκτήματά τους είναι η έλλειψη ικανότητας παροχής πληροφοριών για την ενέργεια και το είδος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και ο μεγάλος νεκρός χρόνος

(100-500 μ s), στην περίπτωση των υψηλών περιοχών τάσης, που απαιτείται για την εκκαθάριση πολλών θετικών ιόντων τα οποία σχηματίζονται.

β) ανιχνευτές σπινθηρισμών ή σπινθηριστές

Ο σπινθηριστής είναι ένα σύστημα που μετατρέπει την ακτινοβολία σε φωτόνια ορατού φωτός (σπινθήρες). Τα παραγόμενα φωτόνια οδηγούνται μέσω κυματοδηγών στους φωτοπολλαπλασιαστές (ΦΠ). Οι ΦΠ μετατρέπουν το εισερχόμενο φως σε ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό σήμα. Η διαδικασία είναι η εξής: Το πρώτο μέρος του ΦΠ, που λέγεται φωτοκάθοδος, έχει την ιδιότητα να εκπέμπει ηλεκτρόνια όταν το φως προσπέσει πάνω στην επιφάνειά του. Τα ηλεκτρόνια αυτά, λόγω της έλξης από την άνοδο του ΦΠ, διέρχονται από μία σειρά παραλλήλων τοποθετημένων δυνόδων. Μόλις το ηλεκτρόνιο προσπέσει στην επιφάνεια της πρώτης δυνόδου, παράγεται ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων, τα οποία λόγω ηλεκτρικού πεδίου χτυπούνε στην επόμενη δυνόδο, όπου παράγονται ακόμα περισσότερα ηλεκτρόνια. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι την τελευταία δυνόδο, όπου πλέον ο ηλεκτρικός παλμός είναι αρκετές τάξεις μεγέθους ισχυρότερος από τον αρχικό. Έτσι τα ηλεκτρόνια ανιχνεύονται από την άνοδο και ανιχνεύεται ο παλμός [ΓΑΖ 02].

Σχήμα 3.4 : Σχηματικό διάγραμμα στερεού κρυστάλλου σπινθηριστού συνδεδεμένου μέσω οπτικής διόδου με ένα φωτοπ/λασιαστή [EHM &VAN 91]



γ) ανιχνευτές ημιαγωγών

Στους ημιαγωγούς, τα ηλεκτρόνια συνήθως βρίσκονται στη ζώνη σθένους και δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας, η οποία διαχωρίζεται από τη ζώνη σθένους λόγω ενεργειακού χάσματος. Το ενεργειακό χάσμα είναι 1,12 eV για το Πυρίτιο (Si) και 0,67 eV για το Γερμάνιο (Ge), σε θερμοκρασία δωματίου. Τα υλικά Si και Ge αποτελούν τα βασικά υλικά κατασκευής ημιαγωγικών διατάξεων ανίχνευσης. Τα υλικά αυτά έχουν μικρή αγωγιμότητα, αλλά από πλευράς ανίχνευσης όταν εισέρχεται στο υλικό ιοντίζουσα ακτινοβολία, ηλεκτρόνια ανέρχονται στη ζώνη αγωγιμότητας και το σύστημα γίνεται στιγμιαία αγωγίμο. Αν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται στη διάταξη με κατάλληλα ηλεκτρόδια, τα παραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών διαχωρίζονται και κινούνται προς τα ηλεκτρόδια όπου εμφανίζεται ηλεκτρικό σήμα [ΓΑΖ 02].

Τα πλεονεκτήματα των ανιχνευτών Si και Ge είναι ο ταχύς διαχωρισμός και η ταχεία συλλογή των φορτίων (για το δεύτερο της τάξης μεγέθους των nsec). Η δημιουργία έως και δεκαπλάσιων φορέων φορτίων για συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας που χάνει ένα ιονίζον σωματίδιο. Και τέλος, η εξαιρετική διακριτική ικανότητα, το μικρό μέγεθος και η εύκολη προσαρμογή σε πολλών ειδών πειράματα.

Τρεις είναι οι βασικοί τύποι ημιαγωγικών ανιχνευτών και διαφέρουν κυρίως στον τρόπο δημιουργίας της p-n :

α) οι ανιχνευτές επιφανειακού φράγματος ,δηλαδή ανιχνευτές Si n-τύπου που οξειδώνονται επιφανειακά δημιουργώντας μία p-περιοχή. Οι ανιχνευτές αυτοί είναι πολύ ακριβοί, έχουν καλή διακριτικότητα ενέργειας αλλά δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί και προτιμώνται για τη μέτρηση σωματιδίων-α ή άλλων βαρέων φορτισμένων σωματιδίων μικρής εμβέλειας.

β) οι ημιαγώγιμοι ανιχνευτές διασποράς Λιθίου, οι οποίοι στηρίζονται στην διασπορά μεταλλικού Li. Συχνά χρησιμοποιούνται προσμίξεις στα ημιαγώγιμα υλικά με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας περιοχής υψηλής ευαισθησίας για ανίχνευση των ακτινοβολιών. Συνήθως χρησιμοποιείται Λίθιο (Li) και έτσι έχουμε τους Si(Li) και Ge(Li) με τους πρώτους να είναι κατάλληλοι για ανίχνευση των ακτίνων-X και τους δεύτερους για ακτίνες-γ. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι εμφανίζουν καλή διακριτική ικανότητα και λογική απόδοση για ακτίνες-γ ή ακτινοβολία σωματιδίων υψηλής ενέργειας. Επίσης όλοι οι ημιαγώγιμοι ανιχνευτές έχουν χαμηλούς νεκρούς χρόνους και δεν είναι ευαίσθητοι στα μαγνητικά πεδία. Τα μειονεκτήματα τους περιλαμβάνουν την αναγκαιότητα ψύξεως με υγρό άζωτο (είτε βρίσκονται σε λειτουργία είτε εκτός λειτουργίας, διαφορετικά το Li επιστρέφει στην εξωτερική επιφάνεια που αρχικά τοποθετείται με αποτέλεσμα να καταστρέφεται η λειτουργικότητα της συσκευής. Η χαμηλή αυτή θερμοκρασία επιτυγχάνεται με τροφοδοσία του ανιχνευτή με υγρό άζωτο σε τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς το υγρό άζωτο βαθμιαία εξατμίζεται αφού το σημείο βρασμού βρίσκεται στους 77K). Επιπλέον μειονεκτήματα είναι το μικρό ύψος του παραγόμενου σήματος, το οποίο συνεπάγεται την αναγκαιότητα μεγαλύτερης ενισχύσεως και το υψηλότερο κόστος τους, σε σύγκριση με τους στερεούς σπινθηριστές για φασματοσκοπία ακτίνων-γ.

γ) οι ενδογενείς ανιχνευτές γερμανίου (HPGe), είναι ανιχνευτές Ge ικανοποιητικής καθαρότητας (λιγότερο από 10^{10} άτομα προσμίξεως ανά cm^3), που πλησιάζουν τις ιδιότητες του θεωρητικά πραγματικού ενδογενούς (καθαρού) ημιαγώγιμου Ge. Το μεγάλο πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να φυλάσσονται σε θερμοκρασία δωματίου επειδή δεν υπάρχει Li να διαχυθεί προς τα έξω στον κρύσταλλο, όμως πρέπει να ψύχονται σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους λόγω της θερμικής διεγέρσεως των ηλεκτρονίων. Οι ενδογενείς ανιχνευτές (HPGe) είναι όμοιοι με τους Ge(Li) ως προς τα χαρακτηριστικά αποδόσεως και διακριτικής ικανότητας, ενώ, μερικοί από αυτούς τους φέρονται να έχουν σχετικές αποδόσεις μεγαλύτερες από 100%. Βασικό μειονέκτημα είναι το μεγάλο κόστος παραγωγής τους.

3.3.1.3 Σύγκριση Ανιχνευτή Ημιαγωγών HPGe με Σπινθηριστών

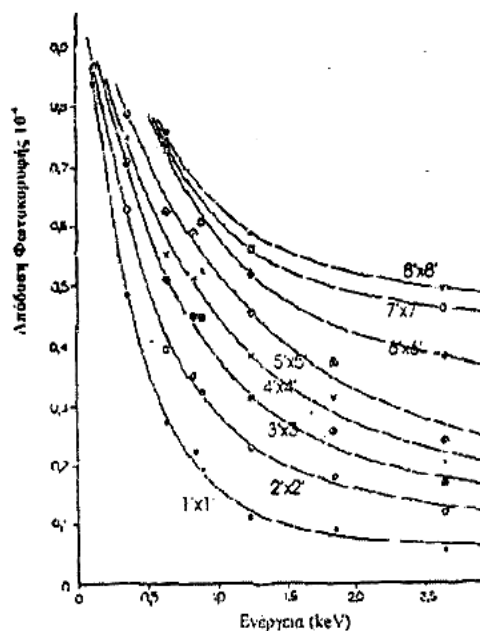
NaI(Tl)

Οι επικρατέστεροι ανιχνευτές για την ανίχνευση ακτινοβολίας-γ είναι ο σπινθηριστής NaI με διασπορά Tl (NaI(Tl)) και ο ανιχνευτής ημιαγωγών Ge υψηλής καθαρότητας (HPGe), τον οποίο χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία.

Για έναν ιδανικό ανιχνευτή, η απόδοση σπινθηρισμού είναι ανάλογη της προσπίπτουσας ενέργειας και η απόκριση του σπινθηριστή είναι απόλυτα γραμμική. Όμως, η γραμμικότητα αυτή, λόγω του ότι οι μονοενεργειακές ακτίνες-γ δημιουργούν διάφορους συνδυασμούς από δευτερογενή ηλεκτρόνια με μεγάλο εύρος ενεργειών, αίρεται αρκετά. Παρόλα αυτά, στην βαθμονόμηση του ανιχνευτή NaI(Tl) με πρότυπες πηγές, χρησιμοποιείται η γραμμική σχέση $E = ax + \beta$, όπου a και β συντελεστές που προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις και x ο αριθμός του καναλιού που θα αποδοθεί η ενέργεια, με πολύ καλή προσέγγιση για ενέργειες μεγαλύτερες των 100keV

[KNO 89]. Στον κρύσταλλο NaI(Tl) η μετατροπή της ιοντίζουσας ακτινοβολίας σε φως είναι της τάξης του 100%. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής του κρυστάλλου σε μεγάλες διαστάσεις η οποία αυξάνει την πιθανότητα αλληλεπίδρασης του με μία ακτίνα-γ κατά πολύ, χάρη στη μεγάλη πυκνότητα του υλικού. Επιπλέον μπορεί πρακτικά να εξασφαλιστεί η απορρόφηση μεγάλου ποσοστού της ενέργειας των αλληλεπιδρώντων ακτίνων-γ εξαιτίας του σχετικά μεγάλου ατομικού αριθμού του Ιωδίου. Όλα αυτά συντελούν στο να έχει μεγάλη απόδοση φωτοκορυφής, δηλαδή το ποσοστό καταγραφής των γεγονότων στην ενεργειακή περιοχή της φωτοκορυφής να είναι μεγάλο, όπως φαίνεται εμφανές στο κάτωθι σχήμα:

Σχήμα 3.5: Εξάρτηση της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή NaI(Tl) σε συνάρτηση με την ενέργεια των ανιχνευόμενων ακτίνων-γ για διάφορες διαστάσεις του κρυστάλλου [KN 89].



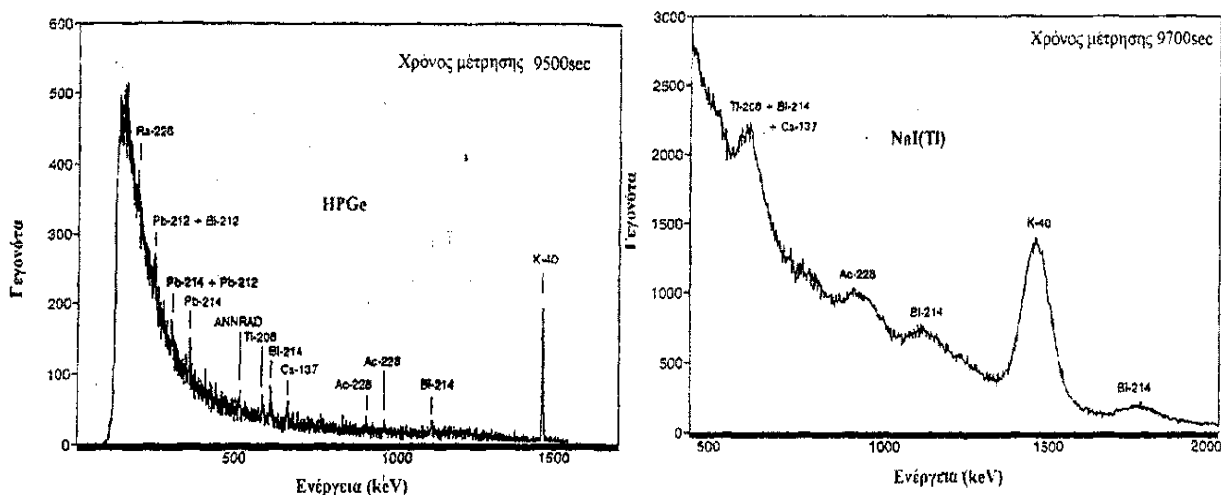
Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι τα πλεονεκτήματα του ανιχνευτή NaI(Tl) είναι η μεγάλη ανιχνευτική ικανότητα, η εξαιρετική απόδοση φωτός και το χαμηλό κόστος. Από την άλλη πλευρά τα μειονεκτήματά του είναι η κακή διακριτική του ικανότητα, η μη δυνατότητα χρήσης του σε μετρήσεις με μεγάλο ρυθμό γεγονότων, διότι είναι σχετικά αργός και η υγροσκοπικότητα του κρυστάλλου, εξαιτίας της οποίας πρέπει να φυλάσσεται σε ένα αεροστεγές περίβλημα. Τέλος στα μειονεκτήματα πρέπει να προστεθούν η ευαισθησία του σε μηχανικά και θερμικά αίτια, γεγονός που το κάνει δύσχρηστο για ορισμένα πειράματα και ο νεκρός χρόνος του (0.25msec), οποίος θεωρείται αρκετά μεγάλος.

Όσο αφορά στον ανιχνευτή Γερμανίου (HPGe), είναι μία δίοδος p-n γερμανίου και λειτουργεί στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης. Για χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (~85K), το φράγμα δυναμικού που δημιουργείται στην επαφή, μειώνει την διαρροή ρεύματος σε αρκετά χαμηλές τιμές με αποτέλεσμα να απαιτείται εφαρμογή σχετικά μικρής αντίστροφης τάσης για τη λειτουργία του ως ανιχνευτή σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιείτε στις φωτοκαθόδους του NaI(Tl).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο HPGe, παρουσιάζει ταχύ διαχωρισμό και ταχεία συλλογή των φορτίων, γεγονός που οφείλεται στο ότι ο νεκρός χρόνος του είναι της τάξης των nsec. Παρατηρείται επιπλέον μεγάλη πολλαπλασιαστική δυνατότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με την δημιουργία ως και δεκαπλάσιων φορέων φορτίων για συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας που χάνει ένα ιοντίζον σωματίδιο, μικρό μέγεθος και εύκολη προσαρμογή σε πολλών ειδών πειράματα.

Το βασικό του χαρακτηριστικό που τον καθιστά ανταγωνιστικό έναντι του NaI(Tl) είναι η εξαιρετική διακριτική ικανότητα. Χρησιμοποιώντας τους καλύτερους

κρυστάλλους μπορούν να επιτευχθούν διακριτικότητες μέχρι 1.5 keV, δηλαδή εμφανίζει φωτοκορυφές με δέκα φορές μικρότερο εύρος (FWHM) σε σχέση με αυτές του NaI(Tl). Παρόλα αυτά παρουσιάζει χαμηλή σχετική απόδοση της τάξης του 15% - 80%, συγκρινόμενο με ένα πρότυπο κυλινδρικό ανιχνευτή NaI(Tl) 3'×3' για σημειακή πηγή ^{60}Co (της κορυφής των 1332 keV) σε απόσταση 25 cm. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά διακρίνονται και στα πειραματικά φάσματα που ακολουθούν:



Σχήμα 3.6: Σύγκριση φασμάτων ίδιου δείγματος από ανιχνευτή HPGe και NaI(Tl). [KNO 89]

Συμπερασματικά ο ανιχνευτής NaI(Tl) έχει σαν πλεονέκτημα την σχετικά μεγάλη απόδοση και το χαμηλό κόστος σε σχέση με τον HPGe, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις μεγάλου χρόνου σε εξωτερικό και υδάτινο περιβάλλον (ανοιχτή θάλασσα, ποτάμια κ.τ.λ.), λόγω της χαμηλής του ηλεκτρικής κατανάλωσης. Ο ανιχνευτής HPGe από την άλλη, έχει καλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα και κατά συνέπεια εξαιρετική αναγνώριση ραδιενεργών στοιχείων. Εντούτοις παρά την όλη την ανθεκτική κατασκευή του, την αυτονομία και την μικρή κατανάλωση ρεύματος, έχει μικρότερη απόδοση σε σχέση με τον NaI(Tl). Επιπλέον η απαίτηση ψύξης με υγρό άζωτο, τον καθιστά δύσχρηστο στις μετακινήσεις και την χρήση του για επιτόπου μετρήσεις στο φυσικό περιβάλλον.

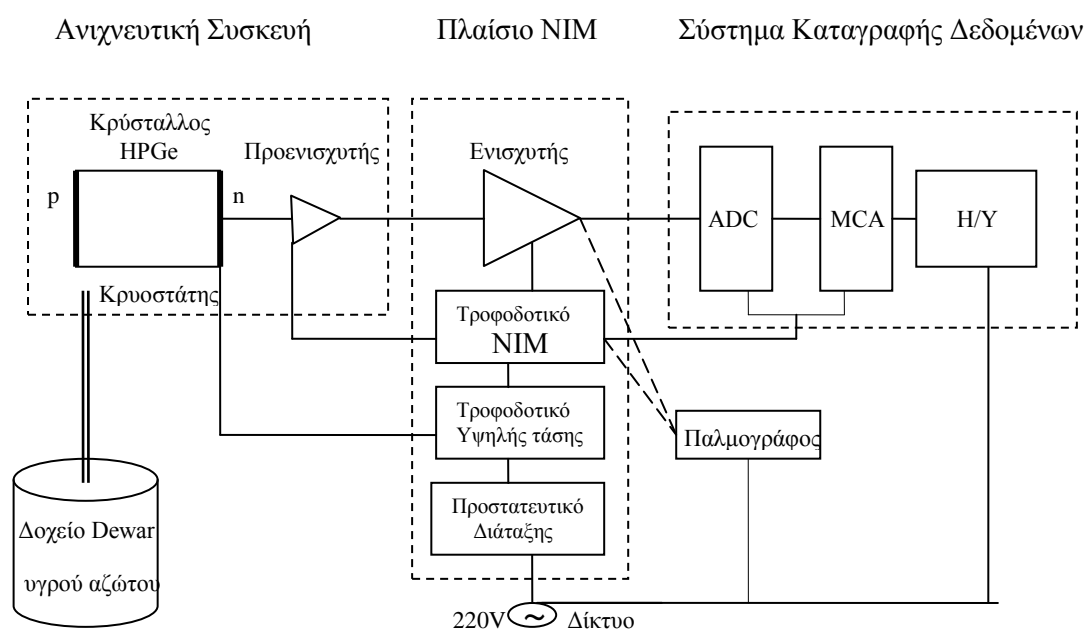
3.3.1.4 Πειραματική διάταξη ανίχνευσης

Στο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση του συγκεκριμένου πειράματος. Αποτελείται από έναν ανιχνευτή ημιαγωγού HPGe για την ανίχνευση της ακτινοβολίας-γ, έναν προενισχυτή με τάση τροφοδοσίας $\pm 12V$ με σκοπό την ενίσχυση του παλμού σε ισχύ, ώστε να περιορισθούν οι απώλειες κατά τη μεταφορά του σήματος, και έναν ενισχυτή ο οποίος συμβάλλει στην ενίσχυση και μορφοποίηση των παλμών, με στόχο τη βελτίωση του λόγου του σήματος προς τον θόρυβο (σήματος/θόρυβο). Τέλος απαιτείται ένας ADC που μετατρέπει την πληροφορία από αναλογική σε ψηφιακή και ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής που καταγράφει την πληροφορία. Για να λειτουργήσει ο ανιχνευτής σε συνθήκες ελαχίστου ρεύματος διαρροής (leakage current) χορηγείται σε αυτόν υγρό άζωτο κάθε 2 μέρες. Αν δεν ψυχόταν η ανιχνευτική συσκευή ο κρύσταλλος μακροπρόθεσμα θα καταστρεφόταν μιας και θα αυξανόταν η θερμοκρασία του κρυστάλλου λόγω της μεγάλης κινητικότητας που αποκτούν οι φορείς. Η κινητικότητα των φορέων οφείλεται στην εφαρμογή

της υψηλής ανάστροφης τάσης (3,5kV) που θέτουμε προκειμένου να επιτύχουμε την ευαισθησία του κρυστάλλου.

α) σύστημα ανίχνευσης

Το σύστημά μας μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, τα τρία μέρη είναι η ανιχνευτική συσκευή, το πλαίσιο NIM (Nuclear Instrument Module), που περιλαμβάνει ξεχωριστές ηλεκτρικές μονάδες υπό μορφή ειδικών πλαισίων και το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής δεδομένων. Επιπλέον η διάταξη περιλαμβάνει έναν παλμογράφο, προκειμένου να ελέγχουμε τις επιμέρους ηλεκτρικές συσκευές. Τέλος όλα τα συστατικά του συστήματος συνδέονται μεταξύ τους με καλώδια που χρησιμοποιούνται για συνεχείς (dc) υψηλές και χαμηλές τάσεις ή σήματα κατάλληλα επιλεγμένα και προσαρμοσμένα στο κύκλωμα με το οποίο συνδέονται.



Σχήμα 3.7: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των δειγμάτων

Όπως βλέπουμε από το σχήμα ο προενισχυτής βρίσκεται μέσα στην ανιχνευτική συσκευή. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής και ο παλμογράφος τροφοδοτούνται κατευθείαν από το δίκτυο ενώ οι κάρτες ADC/MCA από το πλαίσιο NIM.

β) ανιχνευτική συσκευή HPGe (High Purity Germanium)

Η ανιχνευτική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε είναι HPGe, της Ortec για τα δείγματα της πρώτης περιόδου (Απρίλιος 2008) και της Canberra Detector Product Group (Meriden CT) για τη δεύτερη περίοδο (Αύγουστος 2008). Ακολουθεί στο κεφάλαιο 4 πιο αναλυτική περιγραφή των δύο ανιχνευτών.

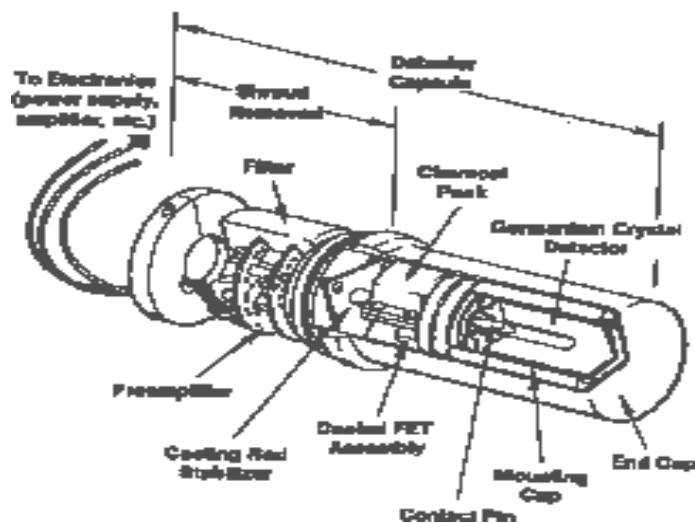
Η θωράκιση που τοποθετήθηκε στον ανιχνευτή αποσκοπεί στη μείωση του θορύβου από την ακτινοβολία υποβάθρου του περιβάλλοντα χώρου. Στο εργαστήριο εκτός από την φυσική ραδιενέργεια από το περιβάλλον και την κοσμική ακτινοβολία έχουμε μεγάλη συνεισφορά από τα οικοδομικά υλικά κατασκευής των κτιρίων όπως το ασβέστιο, το βηρύλλιο κ.ά.



Εικόνα 3.6: Αριστερά η πειραματική ανιχνευτική συσκευή HPGe του ΕΜΠ στην οποία μετρήθηκαν τα δείγματα της δεύτερης περιόδου (Αύγουστος 2008).

Εικόνα 3.7: Δεξιά η πειραματική ανιχνευτική συσκευή HPGe του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., στην οποία μετρήθηκαν τα δείγματα της πρώτης περιόδου (Απρίλιος 2008).

Το σύστημα του κρυστάλλου και του προενισχυτή βρισκόταν ενσωματωμένο μέσα σε μεταλλικό κύλινδρο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Στο μπροστινό μέρος βρίσκεται ο κρύσταλλος του ανιχνευτή που χωρίζεται από τον προενισχυτή με ένα σταθεροποιητή ψύξης σε θήκη από άνθρακα και φίλτρο για το άζωτο. Το όλο σύστημα συνδέεται με μικρό επαναφοδιαζόμενο κρυστάττη υγρού αζώτου (30.5 λίτρα). Επιπλέον στην απόληξη του κυλίνδρου βρίσκονται και τα καλώδια τροφοδοσίας του προενισχυτή και του κρυστάλλου καθώς και η καλωδίωση εξόδου του ανιχνευτή.

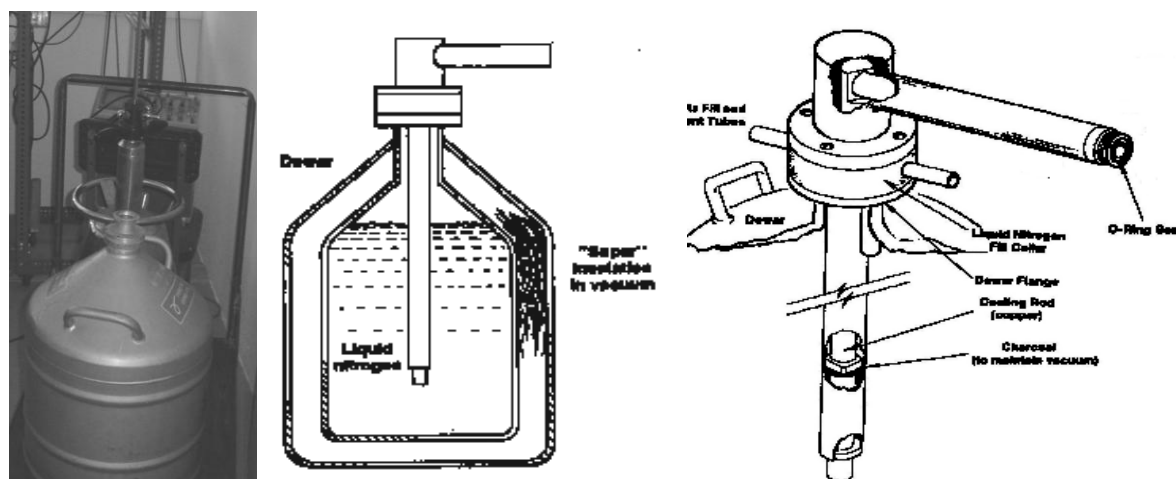


Σχήμα 3.8: Γράφημα διατομής κρυστάλλου Ge με ενσωματωμένο προενισχυτή.[KNO 89]

Στον προενισχυτή γίνεται η αρχική ενίσχυση του σήματος εξόδου από τον ανιχνευτή. Μέσω αυτής της ηλεκτρονικής μονάδας γίνεται η απομόνωση του σήματος εξόδου του ανιχνευτή από την υψηλή τάση τροφοδοσίας του, δηλαδή πραγματοποιείται η ανεξάρτητη λήψη του σήματος. Επιπλέον ο προενισχυτής συμβάλλει στην ενίσχυση του παλμού σε ισχύ (ενίσχυση κατά ρεύμα), χωρίς να μορφοποιείται ο παλμός, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις απώλειες στη γραμμή μεταφοράς ως τον ενισχυτή. Αυτή η ενίσχυση έχει σαν αποτέλεσμα να εξαφανίζει τα παράσιτα κατά την διέλευση του σήματος από το τερματικό, γιατί η ισχύς τους είναι αμελητέα συγκριτικά με την ισχύ του σήματος. Στην περίπτωση που ο παλμός δεν

είχε ενισχυθεί αρχικά κατά ρεύμα, οι απώλειες του θα ήταν σχετικά μεγάλες. Επιπλέον με την προενίσχυση αποφεύγονται οι ανακλάσεις του σήματος μεταξύ προενισχυτή και ενισχυτή, ενώ παράλληλα διευκολύνεται η προσαρμογή των κυκλωματικών στοιχείων του ανιχνευτή με τον κυρίως ενισχυτή δίνοντας τη δυνατότητα χρήσης μικρής αντίστασης εξόδου. Ο προενισχυτής είναι απαραίτητο να τοποθετείται όσο πιο κοντά γίνεται με τον ανιχνευτή ώστε να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν μικρότερη υποβάθμιση της λειτουργίας του συστήματος.

Για λόγους πληρότητας παραθέτουμε το γενικό σχεδιάγραμμα του κρουστάτη ανατροφοδότησης του ανιχνευτή:



Σχήμα 3.9 : Φωτογραφία και γενικό σχεδιάγραμμα του κρουστάτη (δοχείο Dewar) ανατροφοδότησης του ανιχνευτή. Σε τoμές διακρίνονται διάφορες λεπτομέρειες [KNO 89].

γ) πλαίσιο NIM (Nuclear Instrument Module)

Το πλαίσιο NIM που χρησιμοποιήθηκε (σχήμα 3.12) αποτελείται από ένα κιβώτιο πολλών θέσεων παροχής τάσης για τις επιμέρους μονάδες. Περιλαμβάνει ενσωματωμένο τροφοδοτικό που δέχεται τάση από το δίκτυο (~220 V) και παρέχει συνεχή τάση ± 12 και ± 24 Volts εναλλακτικά στις επιμέρους συσκευές αλλά και στον προενισχυτή του ανιχνευτή απευθείας ($\pm 12V$). Εξωτερικά στη δεξιά πλευρά του υπάρχουν 5 ακροδέκτες, ένας από τους οποίους είναι η γείωση, ώστε να γίνεται έλεγχος των εξόδων του με έναν παλμογράφο. Πάνω στο πλαίσιο, από αριστερά προς τα δεξιά στην φωτογραφία, είναι προσαρμοσμένα ένα προστατευτικό της διάταξης, ένα τροφοδοτικό υψηλής τάσης, ένας ενισχυτής και δεξιότερα το τροφοδοτικό του πλαισίου με τον διακόπτη λειτουργίας του.

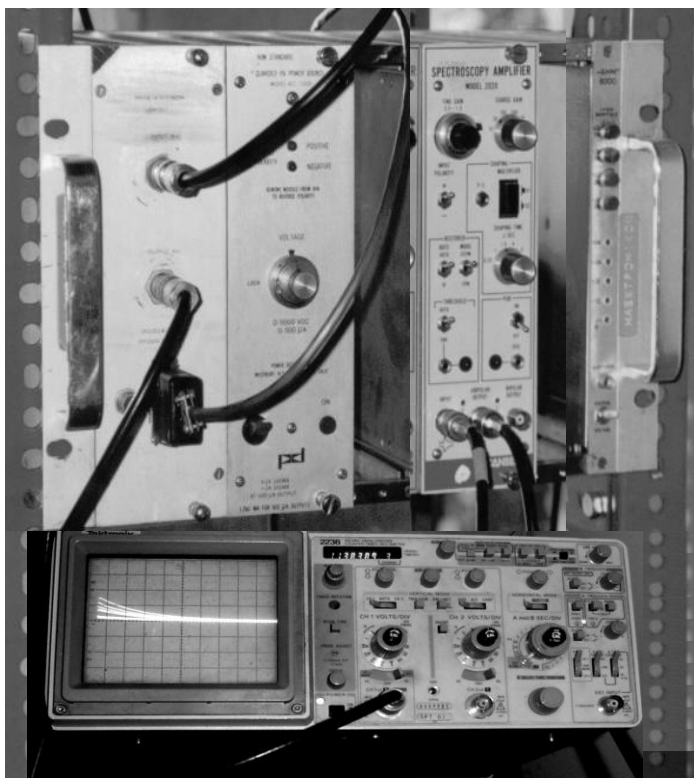
Το προστατευτικό της διάταξης είναι ένας πυκνωτής μεγάλης και μεταβαλλόμενης χωρητικότητας. Τοποθετείται παράλληλα με το τροφοδοτικό υψηλής τάσης και ρόλος του είναι να εξουδετερώνει την επαγόμενη τάση στα άκρα του ανιχνευτή, προστατεύοντας τον, σε περίπτωση απότομων αυξομειώσεων ή διακοπής της τάσης του δικτύου.

Το τροφοδοτικό υψηλής τροφοδοσίας μετατρέπει την τάση των 24 V σε ρυθμιζόμενη υψηλή τάση, που αποτελεί την τροφοδοσία της p-n επαφής του ανιχνευτή.

Στο κάτω μέρος της φωτογραφίας διακρίνεται και ο παλμογράφος, που χρησιμεύει για τον έλεγχο των τάσεων εξόδου του πλαισίου, καθώς και για την παρατήρηση της μορφής των παλμών της εξόδου του προενισχυτή και του ενισχυτή.

Ο ενισχυτής είναι η επόμενη συσκευή της διάταξής μας και αποτελεί την βασικότερη βαθμίδα διαμόρφωσης των αναλογικών παλμών. Η κυριότερη

λειτουργία ενός ενισχυτή είναι η βασική ενίσχυση του σήματος (μετατροπή του σήματος σε καταλληλότερη μορφή ώστε να μετρηθεί), η διαμόρφωση των σταθερών χρόνου, η μορφοποίηση των παλμών και η αποκοπή με κατάλληλα κυκλώματα φίλτρων ορισμένων συχνοτήτων τους. Με την μορφοποίηση του παλμού από τον ενισχυτή, ο παλμός αποκτά καλύτερη μορφή ώστε να διατηρείται η γραμμική απόκριση και να βελτιώνεται ο λόγος σήματος θορύβου [ELE 05].



Εικόνα 3.8: Φωτογραφία του πειραματικού πλαισίου NIM με τον πυκνωτή, το τροφοδοτικό υψηλής τάσης και τον ενισχυτή. Στο κάτω μέρος φαίνεται ο παλμογράφος [ELE 05]

δ) σύστημα καταγραφής δεδομένων

Το σύστημα καταγραφής είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα μετατροπής της ηλεκτρικής εισόδου σε ψηφιακά δεδομένα που αποθηκεύονται σε δυαδική μορφή στο τερματικό σύστημα. Η βαθμίδα αυτή της ανιχνευτικής διάταξης περιλαμβάνει έναν αναλογικό προς ψηφιακό μετατροπέα (analog to digital converter, ADC), που δέχεται το αναλογικό σήμα του ενισχυτή και το μετατρέπει σε ψηφιακά δεδομένα. Κατόπιν αυτά τα δεδομένα κατατάσσονται και φυλάσσονται σε έναν πολυδιαυλικό αναλυτή (multichannel analyzer, MCA). Ανάλογα με την ενέργεια της ακτινοβολίας που εναποτίθεται στον ανιχνευτή, ο αναλογικός παλμός έχει διαφορετικό ύψος και τοποθετείται σε διαφορετικό κανάλι (διάυλος-channel), δημιουργώντας έτσι το φάσμα ακτινοβολίας που ανιχνεύεται. Ο ADC και ο MCA βρίσκονται ενσωματωμένα σε μορφή ηλεκτρονικής κάρτας που προσαρμόζεται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y). Η επεξεργασμένη πληροφορία καταγράφεται και αποθηκεύεται σε μορφή φάσματος ώστε να προβληθεί στη οθόνη του τερματικού και να αναλυθεί περαιτέρω με το κατάλληλο λογισμικό.

Σε άμεση σύνδεση με τον ADC είναι ο πολυδιαυλικός αναλυτής (MCA) που θα πρέπει να είναι σε συμβατότητα με αυτόν. Εκτελεί τις λειτουργίες της συλλογής των στοιχείων, της παροχής ενός οπτικού οργάνου ελέγχου, και της παραγωγής της

εξόδου, είτε υπό μορφή τελικών αποτελεσμάτων είτε στοιχείων για την μετέπειτα ανάλυση. Υπάρχουν με την μορφή ενσωματωμένων καρτών σε υπολογιστές είτε ως ξεχωριστή συσκευή του πλαισίου NIM.

3.3.2 Βαθμονομήσεις ανιχνευτικής διάταξης

Πριν το στάδιο των μετρήσεων των 36 δειγμάτων, πρέπει η πειραματική διάταξη να βαθμονομηθεί ενεργειακά, να γίνει δηλαδή η αντιστοίχιση καναλιών και ενέργειας, και να γίνει η βαθμονόμηση της διακριτικής ικανότητας και ανιχνευτικής ικανότητας του συστήματος. Οι τιμές αυτές αποτελούν ενδογενές χαρακτηριστικό του ανιχνευτικού συστήματος και χρησιμοποιούνται στην αριθμητική επεξεργασία των αποτελεσμάτων μας. Κατόπιν τούτου η διάταξη είναι έτοιμη για μέτρηση των δειγμάτων και εμείς σίγουροι ότι τα αποτελέσματα που θα συλλέξουμε από αυτόν είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερα και ομογενοποιημένα ως προς τις συνθήκες μέτρησης. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με την τοποθέτηση πρότυπης γνωστής πηγής ^{152}Eu (με πρόσμιξη ^{154}Eu) υπό μορφή σκόνης, η οποία έχει πληρώσει ένα κυλινδρικό δοχείο ίδιων διαστάσεων με αυτό των δειγμάτων (2 cm ύψος, 6.9 cm διάμετρος, 2 mm πάχος (το καπάκι)) και σε απόσταση $\sim 25\text{cm}$ και σε θέση επαφής με το παράθυρο του ανιχνευτή ($\sim 5\text{mm}$ από τον κρύσταλλο του ανιχνευτή).

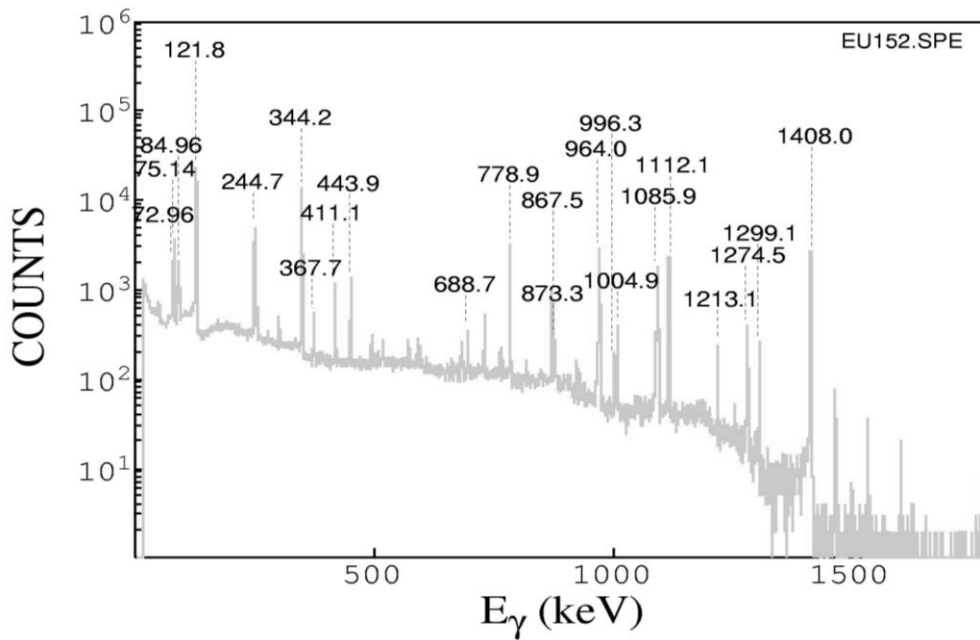
Για την πραγματοποίηση των βαθμονομήσεων, χρησιμοποιήθηκε πρότυπη πηγή κατασκευασμένη και μετρημένη από την ομάδα Πυρηνικής Φασματοσκοπίας του ΙΠΦ του ΕΚΕΦΕ 'Δημόκριτος', με την γεωμετρία που αναφέραμε παραπάνω. Πρόκειται για μείγμα ^{152}Eu (92,5%) και ^{154}Eu (7,5%) γνωστής ενεργότητας (1.21 μCi). Η κοινή γεωμετρία και ομοιογένεια της πρότυπης πηγής και των δειγμάτων έχει το πλεονέκτημα ότι οι πηγές παρουσιάζουν τον ίδιο βαθμό ενδοαπορρόφησης και συνεπώς κοινή απόδοση του ανιχνευτικού συστήματος.

Το ^{152}Eu (Ευρώπιο) είναι ασταθής πυρήνας που μπορεί να αποδιεγερθεί είτε με β^- -διάσπαση προς το θυγατρικό πυρήνα ^{152}Gd (Γαδολίνιο) είτε με β^+ - διάσπαση ή EC στον θυγατρικό πυρήνα ^{152}Sm (Σαμάριο). Όλες αυτές οι αποδιεγέρσεις πραγματοποιούνται με μια σειρά δυνατών εκπομπών ακτίνων- γ συγκεκριμένης ενέργειας και με ορισμένη πιθανότητα εκπομπής, όπως φαίνονται σχηματικά και στο διάγραμμα ενεργειακών σταθμών του ^{152}Eu παρακάτω. Αντίστοιχα το ^{154}Eu αποδιεγείρεται με β^- - διάσπαση και β^+ - διάσπαση ή EC στους θυγατρικούς ^{154}Gd και ^{154}Sm , αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 3.2. δίνονται οι κυριότερες (όσον αφορά την έντασή τους) ενέργειες εκπεμπόμενων ακτίνων γάμμα των ραδιοϊσοτόπων $^{152,154}\text{Eu}$, με την αντίστοιχη πιθανότητα εκπομπής τους (ένταση φωτοκορυφής). Οι τονισμένες τιμές είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή για τις βαθμονομήσεις του συστήματος. Παρακάτω παραθέτουμε ως παράδειγμα το φάσμα μέτρησης των φωτοκορυφών, το οποίο που προέκυψε με την τοποθέτηση της πηγής αναφοράς του $^{152,154}\text{Eu}$ σε επαφή με τον ανιχνευτή και για χρόνο μέτρησης 2h. Η μέτρηση έγινε σε δύο στάδια: κατά το 1^ο στάδιο συλλέχθηκαν δεδομένα με την κάτω πλευρά του δείγματος να είναι σε επαφή με τον ανιχνευτή και το κατά 2^ο στάδιο με την πάνω πλευρά. Η διάρκεια μέτρησης για το κάθε στάδιο ήταν 1h.

¹⁵² Eu		¹⁵⁴ Eu	
Ενέργεια (keV)	Σχετική Ένταση (ανά 100 διασπάσεις)	Ενέργεια (keV)	Σχετική Ένταση (ανά 100 διασπάσεις)
39.52	21.00	42.31	7.20
40.12	38.00	43.00	13.00
45.51	14.80	49.00	5.15
121.78	28.40	123.07	40.50
244.70	7.50	247.97	6.90
295.94	0.44	582.00	0.84
344.28	26.52	591.81	5.20
367.79	0.86	692.49	1.80
411.13	2.25	723.36	20.00
443.97	2.84	756.81	4.54
488.66	0.41	873.23	12.20
564.02	0.47	996.33	10.52
586.29	0.46	1004.78	18.17
678.58	0.47	1246.20	0.90
688.68	0.85	1274.54	35.00
778.92	12.94	1593.00	1.03
810.46	0.32	1596.58	1.82
867.39	4.23		
919.40	0.44		
964.05	14.60		
1005.28	0.65		
1085.84	10.09		
1089.77	1.74		
1112.09	13.56		
1212.97	1.42		
1299.15	1.63		
1408.02	20.80		
1457.63	0.50		

Πίνακας 3.2: Κυριότερες ενέργειες ακτίνων-γ με την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης ανά 100 διασπάσεις κατά τη διάσπαση των ραδιονουκλιδίων ¹⁵²Eu και ¹⁵⁴Eu. Οι έντονες τιμές χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του συστήματος της εργασίας αυτής.



Σχήμα 3.10: Το πειραματικό ενεργειακό φάσμα, της πηγής βαθμονόμησης Eu, με σημειωμένες τις ευκρινότερες φωτοκορυφές με τις αντίστοιχες ενέργειες, μετά την ενεργειακή του βαθμονόμηση [ELE 05].

Η ανάλυση του παραπάνω φάσματος πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα SPECTRW και περιλαμβάνει των προσδιορισμό των κεντροειδών και την εμβαδομέτρηση για τις 10 πιο ισχυρές κορυφές του ^{152}Eu . Η επιλογή αυτών των ενεργειών έγινε με κριτήριο την μεγάλη τους σχετική ένταση και συνεπώς την μεγαλύτερη ευκρίνεια τους στο φάσμα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ανάλυση του φάσματος για τις κορυφές αυτές.

```

==>                                DATA FROM FILE: EubackNETSUMa.SPE                                <==
STARTED ON ATE UNKNOWN, ELAPSED LIVE TIME:   7200 s, A= -26.34 B= 0.46737 C=-.131e-08
=====
=====
CENTROID +-   FWHM   NET AREA   +-   BACKGROUND   DATE/TIME   CENTROID   CHI   FWER
   keV   keV     keV     Counts  Error        Counts
=====
=====
145.500 0.07   1.28     2127   9762        47041   28-04/19:25   155.146  0.7  0.16
121.78  0.01   1.35    595338  1108        45208   27-04/20:24   318.258 31.7  0.01
244.70  0.01   1.37    120676   541        25559   27-04/20:25   581.033  3.6  0.01
344.28  0.01   1.39    364381   802        17983   27-04/20:29   794.005  6.1  0.01
778.90  0.01   1.71    105421   492        12631   27-04/20:29  1723.861  1.2  0.01
867.39  0.01   1.91     23299   7417        13823   28-04/13:50  1913.271  1.0  0.02
964.05  0.01   1.92    100004   5735         8624   28-04/13:52  2120.076  2.4  0.01
1085.84 0.01   2.20     67339   338         8006   27-04/23:01  2381.165  1.3  0.01
1112.09 0.01   2.29     84052   395         7693   27-04/23:03  2437.327  2.7  0.01
1408.02 0.01   2.52    106427   424         1311   28-04/00:11  3070.811  3.1  0.01
=====
=====

```

Πίνακας 3.3 : Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του φάσματος των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu .

Σε αυτό το σημείο πρέπει να παρατηρήσουμε ότι στη δεύτερη κορυφή, θα έπρεπε να είναι στα 122.0 keV ουσιαστικά, μιας και συνεισφέρουν δύο κορυφές, σε ποσοστό 92.5% ^{152}Eu στα 121.78 keV και σε ποσοστό 7.5% ^{154}Eu στα 123.07 keV. Έτσι την έχουμε αναλύσει ως διπλή κορυφή, αυτή του ^{152}Eu για την ενεργειακή βαθμονόμηση, τη βαθμονόμηση της διακριτικής ικανότητας και για την βαθμονόμηση της απόδοσης που περιγράφονται πιο κάτω.

α) ενεργειακή βαθμονόμηση

Στην ενεργειακή βαθμονόμηση γίνεται η αντιστοίχιση του κάθε καναλιού καταγραφής των γεγονότων σε μία συγκεκριμένη ενέργεια. Από την βιβλιογραφία, η προσαρμογή αυτή είναι γραμμική ή για μεγαλύτερη ακρίβεια δευτέρου βαθμού και δίδεται από την σχέση :

$$E = a + b * x + c * x^2 \quad (3.8)$$

όπου E είναι η ενέργεια και x το αντίστοιχο κανάλι εμφάνισής της.

β) βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας

Η βαθμονόμηση της διακριτικής ικανότητας γίνεται για να βεβαιωθούμε ότι ο ανιχνευτής λειτουργεί σωστά, ώστε να είναι σε θέση να αναλύσει και κοντινές ενεργειακά κορυφές. Ακολουθεί την ενεργειακή βαθμονόμηση και για την πραγματοποίηση αυτής της βαθμονόμησης γίνεται γραμμική προσαρμογή στο FWHM των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu που αναλύθηκαν στη διαδικασία της ενεργειακής βαθμονόμησης. Η συνάρτηση προσαρμογής είναι γραμμική, σύμφωνα με τη σχέση:

$$FWHM = a + b * E \quad (3.9)$$

Άρθρο I. όπου E είναι η ενέργεια και FWHM το πλάτος της φωτοκορυφής σε ύψος ακριβώς στο μέσο της κορυφής αυτής, μετρημένο σε keV.

γ) βαθμονόμηση ανιχνευτικής ικανότητας

Η βαθμονόμηση της ανιχνευτικής ικανότητας ισοδυναμεί με τον προσδιορισμό της απόλυτης τιμής της απόδοσης του για οποιαδήποτε ενέργεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό του απόλυτου ρυθμού εκπομπής των ακτίνων-γ – και όχι σε σχέση με μια παρόμοια πηγή γνωστής ενεργότητας – οποιουδήποτε αγνώστου δείγματος. Ο ρυθμός εκπομπής για μια σημειακή πηγή μπορεί τότε να υπολογισθεί μετρώντας το πλήρες εμβαδόν της φωτοκορυφής της για κάθε ακτίνα-γ σε έναν καθορισμένο χρόνο και προσδιορίζοντας την στερεά γωνία του ανιχνευτή από τις διαστάσεις του και την απόσταση πηγής – ανιχνευτή.

Για την βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε γεωμετρία όμοια με αυτή των δειγμάτων. Η πρότυπη πηγή Eu τοποθετήθηκε σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή και προσαρμόστηκε σε αυτόν εφόσον οι διαστάσεις του κυκλικού τους μέρους ήταν κοινές. Θεωρούμε ως παραδοχή ότι η πηγή μας είναι ισοδύναμη με σημειακή στο κέντρο του δοχείου που τοποθετήθηκε (πράγμα που σημαίνει ότι η στερεά γωνία είναι γνωστή και εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοχείου), έτσι μπορούμε να προσδιορίσουμε την απόλυτη απόδοση για τις 10 ισχυρές φωτοκορυφές του ^{152}Eu .

Από τον πειραματικό πίνακα μεταξύ της ενέργειας των ισχυρών φωτοκορυφών και την απόλυτης απόδοσής της συσκευής μας για αυτές τις κορυφές (βλ. κεφ. 4),

πραγματοποιήσαμε την προσαρμογή στη θεωρητική καμπύλη εξάρτησης της απόλυτης ανιχνευτικής ικανότητας από την ενέργεια (E), που είναι της μορφής:

$$efficiency = \frac{a * E^b}{c + E^d} \quad (3.10)$$

όπου a,b,c,d σταθερές. Η μορφή της συνάρτησης στηρίζεται στην εμπειρία αναλύσεως πολλών φασμάτων από την ομάδα πυρηνικής φασματοσκοπίας του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε., σύμφωνα και με την αντίστοιχη βιβλιογραφία.

3.3.3 Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ενεργότητα (MDA)

Ένα κριτήριο για τη φασματοσκοπία ακτίνων-γ είναι η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ενεργότητα (Minimum Detectable Activity-MDA) που ορίζεται ποιοτικά ως το ελάχιστο ποσό ενεργότητας ραδιονουκλιδίου που μπορεί να ανιχνευθεί αξιόπιστα από το σύστημα λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες μέτρησης. Η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ενεργότητα σε μονάδες Bq/m³ δίνεται από τον τύπο:

$$MDA = \frac{YIELD}{e_{ff} * rec * t * V * I_{\gamma}} \quad (3.11)$$

- όπου YIELD το όριο ανίχνευσης (detection limit) και δίνεται από τον τύπο $YIELD = 3 * \sqrt{B}$ όπου B ο αριθμός των γεγονότων του υποβάθρου στην περιοχή ενδιαφέροντος.
- e_{ff} , η ανιχνευτική ικανότητα (απόδοση) του ανιχνευτικού συστήματος
- rec , η χημική απόδοση της μεθόδου (chemical efficiency)
- t , ο χρόνος μέτρησης του φάσματος (86400 sec)
- I_{γ} , η ένταση της ακτίνας-γ (για το ¹³⁷Cs 85.20% στα 661.66 keV που μελετάμε)
- V , ο όγκος κάθε δείγματος (20L)

Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές ότι το MDA εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Πρώτα από όλα είναι αντιστρόφως ανάλογο του χρόνου μέτρησης του φάσματος, όπως επίσης εξαρτάται έμμεσα από το χρόνο μέτρησης, διότι είναι ανάλογο του YIELD το οποίο εξαρτάται ως μέγεθος από το χρόνο. Επομένως για διαφορετικούς χρόνους μέτρησης θα υπολογίζονται και διαφορετικές τιμές MDA. Επίσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόδοσης του συστήματος, οπότε ένας ανιχνευτής με μεγάλη απόδοση θα παρουσιάζει μικρότερο MDA. Τέλος, η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ενεργότητα εξαρτάται και από διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, διότι το YIELD εξαρτάται από τον αριθμό των καναλιών δεξιά (N κανάλια) και αριστερά (N κανάλια) της περιοχής ενδιαφέροντος [ΜΠΑ 08].

Από όλα τα ανωτέρω θα λάβουμε υπόψη το όριο ανίχνευσης, την ανιχνευτική απόδοση και τη χημική απόδοση ως τις παραμέτρους που θα επιφέρουν σφάλματα στο MDA. Το ότι δεν λαμβάνουμε καθόλου υπ' όψιν τις υπόλοιπες παραμέτρους, συμβαίνει διότι ο χρόνος μέτρησης είναι ίδιος για όλες τις μετρήσεις (86400sec), μελετούμε μόνο την κορυφή 661.66 keV του ¹³⁷Cs, επομένως η I_{γ} παραμένει η ίδια, και ο όγκος όλων των δειγμάτων μας είναι ο ίδιος (20L).

Ο αριθμός των καναλιών για τον οποίο θα μετρηθεί το υπόβαθρο δεξιά και αριστερά της περιοχής ενδιαφέροντος, δίνεται από τον τύπο:

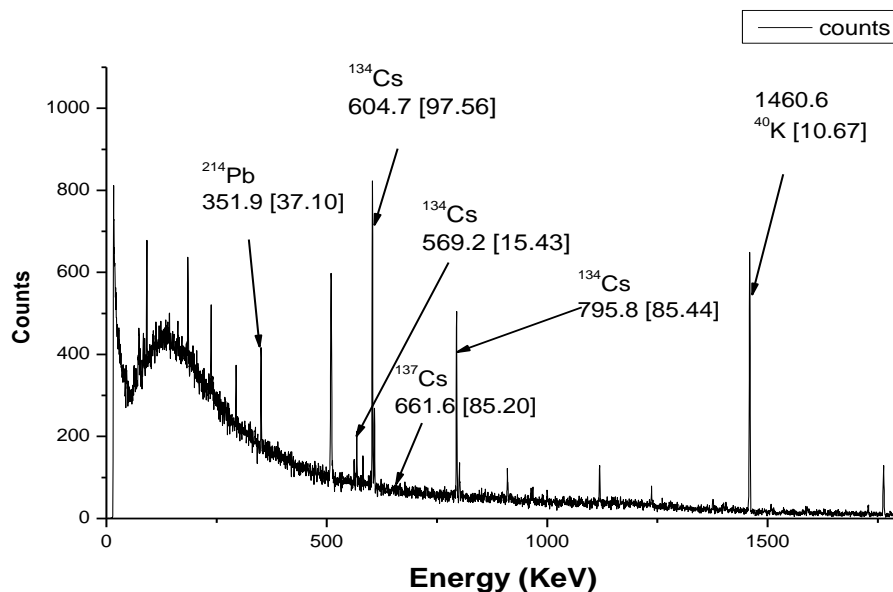
$$N = \frac{2 * FWHM}{b} \quad (3.12)$$

όπου FWHM είναι η διακριτική ικανότητα του συστήματός μας για την περιοχή ενδιαφέροντος και b η ενέργεια ανά κανάλι που δίνεται από τη σχέση της ενεργειακής βαθμονόμησης όπως έχει αναφερθεί παραπάνω ($E = a + b * x + c * x^2$).

Ο προσδιορισμός της χημικής απόδοσης (rec) της μεθόδου μας έγινε μέσω των κορυφών (569.2, 604.7, 795.8 keV) του ^{134}Cs , όπως αυτές φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα. Για κάθε μία από αυτές τις κορυφές υπολογίσαμε τη χημική απόδοση

μέσω της σχέσης: $\frac{C_{deigma}}{C_{blank}}$, όπου ο αριθμητής είναι ο αριθμός των γεγονότων του

δείγματος που μετράμε σε κάθε κορυφή και ο παρανομαστής ο αριθμός των γεγονότων για την αντίστοιχη κορυφή του blank. Ως blank εννοούμε ένα δείγμα της ίδιας γεωμετρίας με αυτή των δειγμάτων μας στο οποίο έχουμε προσθέσει τα 15gr AMP και τα 2Bq ^{134}Cs (βλ. 3.2 χημική επεξεργασία δειγμάτων), χωρίς να πραγματοποιήσουμε αποχύσεις, όπως στα υπόλοιπα δείγματα. Πρακτικά το blank είναι το δείγμα αναφοράς μας όσον αφορά στη χημική απόδοση. Από τους τρεις διαφορετικούς λόγους που προσδιορίσαμε για τις τρεις κορυφές του ^{134}Cs υπολογίζουμε το μέσο όρο αυτών, ως τη χημική απόδοση του κάθε δείγματος. Για λόγους πληρότητας αναφέρουμε ότι το ^{137}Cs έχει χρόνο ημιζωής 30.5y ενώ το ^{134}Cs μόνο 2.1y. Λόγω αυτής της διαφοράς στους χρόνους ημιζωής παρατηρούμε μεγαλύτερες κατανομές γεγονότων στις κορυφές του ^{134}Cs .



Σχήμα 3.11: Χαρακτηριστικό φάσμα των μετρήσεών μας στο οποίο φαίνονται οι κορυφές $^{134/137}\text{Cs}$ τις οποίες αναλύσαμε και οι κορυφές ^{40}K και ^{214}Pb με τις οποίες κάναμε την ενεργειακή βαθμονόμηση του φάσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

4.1 Ανιχνευτές HPGe

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά των δύο ανιχνευτικών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις μας. Στη συνέχεια παραθέτουμε τον τρόπο ανάλυσης των φασμάτων μας με το πρόγραμμα SPECTRW, καθώς και τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων του ανιχνευτικού μας συστήματος, τα οποία αποτελούν ένα μέτρο εξακρίβωσης της αξιοπιστίας του συστήματος. Τέλος ακολουθούν τα αποτελέσματα από την ανάλυση που κάναμε προκειμένου να υπολογίσουμε την ελάχιστη ανιχνευόμενη ενεργότητα των δειγμάτων μας.

4.1.1 Εργαστήριο ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

Για τα σημεία της πρώτης περιόδου (season 1) όπως έχει αναφερθεί κατά περιπτώσεις ανωτέρω, οι μετρήσεις έγιναν με την ανιχνευτική διάταξη γερμανίου στο Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Ραδιενέργειας του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. Ο ανιχνευτής είναι υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe), μοντέλο GEM-FX8530P4 της Ortec. Η σχετική απόδοση του ανιχνευτή έχει προσδιοριστεί στο 50% με διακριτική ικανότητα 1.77 keV (αιχμή 1.33MeV ^{60}Co), ενώ στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται και τα υπόλοιπα βασικά τεχνικά του χαρακτηριστικά.

Τύπος αισθητήρα	HPGe
Μοντέλο	GEM-FX8530P4 (Ortec)
Τύπος κρυστάλλου	ομοαξονικός p-τύπου
Διάμετρος	85mm
Μήκος	31.9mm
Απορροφητικό εμπρόσθιο κάλυμμα (En Cap)	στρώμα απορρόφησης ανθρακονήματος (carbon fiber)
Απόσταση από τον κρύσταλλο	5mm
Πάχος	0.76mm
Ενδεδειγμένη τάση λειτουργίας (Bias)	+ 4800V
Χαρακτηριστικά Απόδοσης	μέτρηση με ^{60}Co (^{57}Co), ρυθμός γεγονότων 1000cps, χρόν διαμόρφωσης ενισχυτή 6μ
Διακριτική ικανότητα (FWHM) σε 1.33MeV	1.77keV
Λόγος Φωτοκορυφής-Compton	62:1
Σχετική απόδοση σε 1.33MeV	50.5%
Μορφή Φωτοκορυφής (FWTM/FWHM)	1.90
Μορφή Φωτοκορυφής (FWFM/FWHM)	2.56
Διακριτική ικανότητα (FWHM) σε 122MeV	709keV
Διακριτική ικανότητα (FWHM) σε 14.4MeV	528keV
Λόγος 22:88	15.5

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή HPGe GEM-FX8530P4

Ο βέλτιστος χρόνος μέτρησης καθορίστηκε πειραματικά στις 24 h για κάθε δείγμα, ενώ τα πειραματικά φάσματα καθορίστηκαν να έχουν 4096 κανάλια που καλύπτουν ενεργειακό εύρος από 0 έως 2000 keV περίπου. Η επιλογή αυτή της

ενεργειακής διακριτοποίησης είχε να κάνει με την προσπάθεια βελτίωσης της στατιστικής των μετρήσεων. Τα πειραματικά φάσματα κατόπιν αναλύονταν με την βοήθεια του προγράμματος φασματοσκοπίας SPECTRW, στο οποίο γίνεται αναφορά παρακάτω.



Εικόνα 4.1: Η πειραματική ανιχνευτική συσκευή HPGe του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (αριστερά), στην οποία μετρήθηκαν τα δείγματα της πρώτης περιόδου (Απρίλιος 2008). Στη δεξιά εικόνα φαίνεται η κατακόρυφη θωράκιση του ανιχνευτή.

Το ανιχνευτικό σύστημα του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. ήταν κατακόρυφα προσαρμοσμένο και τα δείγματα τοποθετούνταν σε επαφή με τον ανιχνευτή. Στην επιφάνεια του παραθύρου του ανιχνευτή τοποθετήθηκε κατάλληλο κάλυμμα από πλαστικό μικρού πάχους ώστε να προστατευθεί το υπέρλεπτο παράθυρο από τυχόν επιμολύνσεις (contaminations), αλλά ταυτόχρονα να περιορίζει την απώλεια των χαμηλής ενέργειας φωτονίων λόγω ενδοαπορρόφησης. Η τροφοδοσία σε άζωτο πραγματοποιούνταν κάθε 15-20 μέρες καθώς το Dewar ήταν μεγάλης περιεκτικότητας.

Στη διάταξη του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., χρησιμοποιήθηκαν δύο σειρές τούβλων Pb πάχους 58.5 mm, δημιουργώντας ένα τετράγωνο “τείχος” γύρω από το δείγμα ύψους 23 mm και πλάτους 31 mm. Το πάνω μέρος κλείστηκε με μολύβδινο καπάκι έτσι ώστε να μειωθεί περαιτέρω το υπόβαθρο από την κοσμική και φυσική ακτινοβολία. Πρέπει επιπλέον να σημειωθεί ότι το εργαστήριο του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. βρίσκονταν στο επίπεδο της θάλασσας και μάλιστα σε μερικά μέτρα απόσταση από αυτήν.

4.1.2 Εργαστήριο ΕΜΠ

Η ανιχνευτική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε είναι HPGe, μοντέλο GC5021 της Canberra Detector Product Group (Meriden CT). Η σχετική του απόδοση- ως προς τον ανιχνευτή NaI 3'×3'- δίδεται από τον κατασκευαστή στο 50%. Η διακριτική του ικανότητα, εκφρασμένη από το FWHM, δίδεται στα 1.2 keV και 2.3 keV για τις φωτοκορυφές ενέργειας 122 keV και 1332 keV αντίστοιχα. Η ενδεδειγμένη τάση λειτουργίας είναι +3500V.

Όμοια ο βέλτιστος χρόνος μέτρησης καθορίστηκε πειραματικά στις 24 h για κάθε δείγμα, ενώ τα πειραματικά φάσματα καθορίστηκαν να έχουν 4096 κανάλια που καλύπτουν ενεργειακό εύρος από 0 έως 2000 keV περίπου. Η επιλογή αυτή της ενεργειακής διακριτοποίησης είχε να κάνει με την προσπάθεια βελτίωσης της στατιστικής των μετρήσεων. Τα πειραματικά φάσματα κατόπιν αναλύονταν με την βοήθεια του προγράμματος φασματοσκοπίας SPECTRW, στο οποίο γίνεται αναφορά παρακάτω.



Εικόνα 4.2: Η πειραματική ανιχνευτική συσκευή HPGe του ΕΜΠ (αριστερά), στην οποία μετρήθηκαν τα δείγματα της πρώτης περιόδου (Αύγουστος 2008). Στη δεξιά εικόνα φαίνεται η κατακόρυφη θωράκιση του ανιχνευτή.

Σε αυτή την περίπτωση του ανιχνευτικού συστήματος ο ανιχνευτής ήταν τοποθετημένος οριζόντια στην επιφάνεια του εργαστηριακού τραπεζιού του Ε.Μ.Π. και η ανατροφοδότηση σε άζωτο γίνονταν κάθε 2-3 μέρες. Τα δείγματα τοποθετούνταν και πάλι σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή με βοήθεια πλαστικών υποστυλωμάτων.

Η θωράκιση στο σύστημα του Ε.Μ.Π. ήταν ένας οριζόντιος κύλινδρος με εσωτερική οπή, όπου ο ανιχνευτής σύρονταν έως ότου το δείγμα να τοποθετηθεί πλήρως μέσα σε αυτόν. Ο κύλινδρος αποτελούταν από ένα εξωτερικό στρώμα μολύβδου Pb πάχους 50 mm, κατόπιν ένα καδμίου Cd 2.5 mm και τέλος στο εσωτερικό του ένα χαλκού Cu 2.5 mm. Πρέπει επιπλέον να σημειωθεί ότι το εργαστήριο του Ε.Μ.Π. βρίσκεται στο δεύτερο όροφο κτιρίου σε υψόμετρο ~500 m και μακριά από την θάλασσα.

4.1.3 Σύγκριση των δύο ανιχνευτικών διατάξεων

Για συγκριτικούς λόγους παραθέτουμε τα υπόλοιπα επιμέρους ηλεκτρονικά συστήματα για την τροφοδοσία του συστήματος με κατάλληλο συνεχές ρεύμα λειτουργίας, την ενίσχυση και μετατροπή του ηλεκτρικού παλμού εξόδου του προενισχυτή, της μετέπειτα μετατροπής του σε ψηφιακό σήμα και καταγραφή του και την τελική του επεξεργασία σε μορφή φάσματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Ανιχνευτική Διάταξη	Πλαίσιο NIM	Τροφοδοτικό Υψηλής Τάσης	Ενισχυτής	ADC/MCA	Πρόγραμμα Καταγραφής
Ε.Μ.Π.	2100-Canberra	659-Ortec	672-Ortec	8715- Canberra	Genie2000-Canberra
ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ.	1400-Canberra	TC950A-Tennelec	2020-Canberra	UC530- Spectech	Spectech Driver

Πίνακας 4.2: Τα ηλεκτρονικά που χρησιμοποιήθηκαν με τον ανιχνευτή HPGe για τις δύο ανιχνευτικές διατάξεις.

Τα δύο ανιχνευτικά συστήματα διαφέρουν στα ηλεκτρονικά, τη διάταξη των συστημάτων, τη θωράκιση και την ακτινοβολία υποβάθρου. Το τελευταίο επηρεάζεται τόσο από τη διαφορετική θωράκιση όσο και από τη διαφορετική τοποθεσία των δύο εργαστηρίων.

Από την σύγκριση των συστημάτων διαπιστώνεται ότι η διάταξη στο Ε.Μ.Π. αν και είναι σε οριζόντια θέση υπερτερεί λόγω της καλής θωράκισης του ανιχνευτικού συστήματος και είναι ενδεδειγμένη για περιβαλλοντικές μετρήσεις χαμηλής ενεργότητας. Η κάθετη όμως διάταξη και η μεγάλη αυτονομία σε άζωτο του ανιχνευτικού συστήματος στο ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ. δίνει ένα σαφές πλεονέκτημα στην

διαδικασία μέτρησης πολλών δειγμάτων χωρίς τον συχνό έλεγχο και εποπτεία του συστήματος. Ενδεικνύεται λοιπόν η ανάπτυξη της θωράκισης για αυτή την γεωμετρία, ώστε να κλείνει περιμετρικά, ενώ ένα σύστημα κυκλοφορίας αερίου αζώτου κατά την διάρκεια των μετρήσεων, για την αφαίρεση του ^{222}Rn και των θυγατρικών του πυρήνων από την περιοχή μέτρησης, θα βελτιώνει την μέτρηση των δειγμάτων [ELE 10].

4.2 Φασματική ανάλυση δειγμάτων

Οι αναλύσεις μας έγιναν με το λογισμικό SPECTRW το οποίο αποτελεί βελτιωμένη έκδοση του SPECTRG, λογισμικό που αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του ερευνητικού κέντρου ‘Δημόκριτος’ από τον Δρ. Κάλφα το 1995. Έχει δυνατότητες ανάλυσης από οποιονδήποτε πολυδιαυλικό αναλυτή (MCA) και δέχεται αρχεία με διαμόρφωση τύπου ΙΕΚ, τα οποία τροποποιούνται αυτόματα σε αναγνώσιμη μορφή τύπου SPE όταν τα ανοίγουμε με το λογισμικό.

Στο ξεκίνημα ανάλυσης απαραίτητη είναι η βαθμονόμηση κάθε φάσματος μέσω επιλογής δύο τουλάχιστον ενεργειακών κορυφών και καθορισμού της ενεργειακής τους τιμής (εντολή “calibrate”). Χρησιμοποιούμε τις κορυφές του, ^{214}Pb στα 351.9 keV του ^{40}K στα 1460.8 keV, και του ^{214}Bi στα 609.3 keV για τις ενδιάμεσες ενέργειες. Η γραμμική σχέση ενέργειας-καναλιού που προαναφέρθηκε επιτρέπει την αναγωγή οποιουδήποτε σημείου του φάσματος σε ενέργεια. Μπορούμε να αναλύσουμε ταυτόχρονα μέχρι οχτώ φάσματα τα οποία εμφανίζονται είτε μεμονωμένα είτε και ταυτόχρονα. Η ανάλυση των φωτοκορυφών μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, είτε με εφαρμογή της κατανομής Gaussian (εντολή “fit”), είτε με ολοκλήρωση ανάμεσα σε δύο προεπιλεγμένα ενεργειακά σημεία του φάσματος (εντολή “integrate”), δίνοντας έτσι το αποτέλεσμα (αριθμός counts) με το αντίστοιχο σφάλμα μέτρησης.

Έχουμε τη δυνατότητα ανάλυσης δύο κοντινών κορυφών μέσω της κατανομής Gaussian fit, μιας και αυτή η εντολή μας επιτρέπει να ορίσουμε παραπάνω από μία κορυφές. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο ειδικά σε περιπτώσεις που δύο ενεργειακές κορυφές «μπλέκονται» η μία μέσα στην άλλη, όπως στην περίπτωση του ^{152}Eu για τα 122keV. Με την εντολή “individual view” μετά από κάθε πολλαπλό fit μας επιτρέπεται να εξετάσουμε τα επιμέρους fit κάθε κοντινής κορυφής και να αποφασίσουμε να κρατήσουμε το αντίστοιχο αποτέλεσμα. Το μέγεθος FWHM (Full Width at Half Maximum) μπορεί να οριστεί από το χρήστη (εντολή “set FWHM”), και καθορίζει το εύρος της γκαουσιανής καμπύλης που αναλύει μία φωτοκορυφή. Για τον HP-Ge, η σχέση της τιμής του προς τον άξονα ενεργειών είναι γραμμική.

Περαιτέρω δυνατότητες του SPECTRW είναι η ταυτοποίηση των ισχυρότερων ή και όλων των ενεργειακών κορυφών του φάσματος, η δυνατότητα εστίασης σε όποια περιοχή του φάσματος επιθυμούμε και η εμφάνιση του φάσματος σε λογαριθμική κλίμακα (για τον άξονα των γεγονότων / counts). Τα παραπάνω επιτυγχάνονται μέσω των εντολών “peak find – set level” (με 5 επίπεδα ταυτοποίησης ανάλογα με τον αριθμό γεγονότων σε καθεμία), “expand – select limits” και “Y-scale – Log plot” οι οποίες βοήθησαν στις αναλύσεις και χρίζουν μεγάλης σημασίας. Βασικό ρόλο στις εφαρμογές των εντολών “fit” και “integrate” είναι η δυνατότητα εμφάνισης του επιπέδου υποβάθρου στο φάσμα που αναλύουμε μέσω της εντολής “BGR – select channels” κατά την οποία μαρκάρουμε το φάσμα γύρω από την ενεργειακή κορυφή που θέλουμε να αναλύσουμε «απαλλάσσοντας» έτσι τα μετρούμενα counts από επιπρόσθετα γεγονότα υποβάθρου κατά τη μέτρηση μέσω των εντολών “fit” και “Integrate”.

Επιπλέον μπορούμε να προσθέσουμε (“sum”) ή και να αφαιρέσουμε φάσματα (“subtract”), εφόσον έχει γίνει σωστή βαθμονόμηση (calibrate), καθώς και να δούμε από τι στοιχεία αποτελείται το φάσμα μας (εντολή “info” και επιλέγουμε γ -ray peaks ή isotope γ -rays). Τέλος μία νέο-προσθεθείσα δυνατότητα είναι ο υπολογισμός της ανιχνευτικής και της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή μας, αλλά και η γραμμικότητα των στοιχείων του ανιχνευτικού μας συστήματος (εντολή “evaluate” επιλέγοντας detector efficiency, FWHM plot και detector linearity αντίστοιχα).

Το τελικό αποτέλεσμα που δίνει το SPECTRW είναι ο αριθμός των γεγονότων που καταμετρώνται στον ανιχνευτή μέσα στις φωτοκορυφές που επιλέγουμε να αναλύσουμε, ώστε να υπολογίσουμε την ενεργότητα (activity).

4.3 Βαθμονομήσεις (αποτελέσματα)

Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω οι μετρήσεις έγιναν στον ανιχνευτή της Ortec για τα δείγματα της πρώτης περιόδου (season1-A1, A2, A10, NA1, A8) και με Canberra της δεύτερης (season2-A10, I1, L4). Όσον αφορά τον πρώτο η βαθμονόμηση έγινε από τον Δρ. Κάλφα ερευνητή του ‘Δημοκρίτου’ και τα αποτελέσματα αυτής θα παρουσιάσουμε με αναφορά τον ανιχνευτή της Canberra.

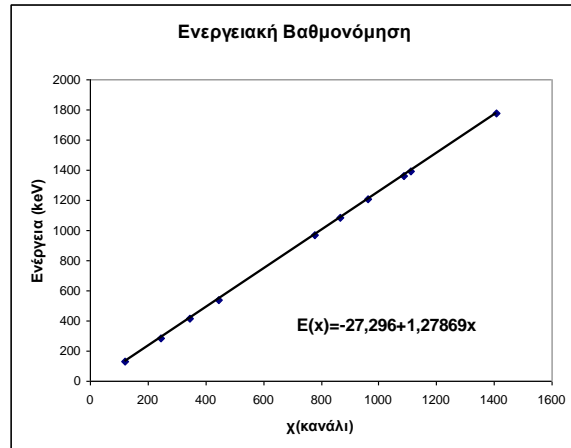
4.3.1 Ανιχνευτικό Σύστημα ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

α) ενεργειακή βαθμονόμηση

Για την βαθμονόμηση της ενέργειας και της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή της Ortec χρησιμοποιήσαμε δεδομένα από την αναφορά [ELE 10]. Η βαθμονόμηση του συστήματος έγινε με σημειακή πηγή ^{152}Eu όπου τοποθετήθηκε σε απόσταση 25 cm πάνω από το παράθυρο του ανιχνευτή (στην προέκταση του άξονά του). Η πηγή ήταν $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ σε αναλογία 97% και 3% αντίστοιχα ενεργότητας $2.11 \pm 0.03 \mu\text{Ci}$ ($78.1 \pm 1.1 \text{ keV}$) την ημέρα παρασκευής της (28/10/2009). Προσαρμόστηκε με κατάλληλη βάση σε απόσταση 25 cm από το κέντρο συμμετρίας του παραθύρου του ανιχνευτή και καταγράφηκε πειραματικό φάσμα δύο ωρών, αφού προηγουμένως είχε καταγραφεί το φάσμα υποβάθρου ίδιου χρόνου. Την στιγμή της μέτρησης η ενεργότητα του ^{152}Eu υπολογίστηκε να είναι $7.7 \pm 1.9 \text{ kBq}$, εξαιτίας της εξασθένησης της πηγής λόγω ραδιενεργού αποδιέγερσης.

Στα πειραματικά φάσματα που προέκυψαν αφαιρέθηκε το κατάλληλο φάσμα υποβάθρου και αναλύθηκαν 10 φωτοκορυφές του ^{152}Eu με την μεγαλύτερη ένταση, που καλύπτουν όλο το ενεργειακό φάσμα από τα 120 keV έως τα 1400 keV. Στο Σχήμα 4.1. αναπαρίσταται η ενέργεια συναρτήσεως των καναλιών του πολυδιαυλικού αναλυτή που εμφανίζεται η κάθε φωτοκορυφή.

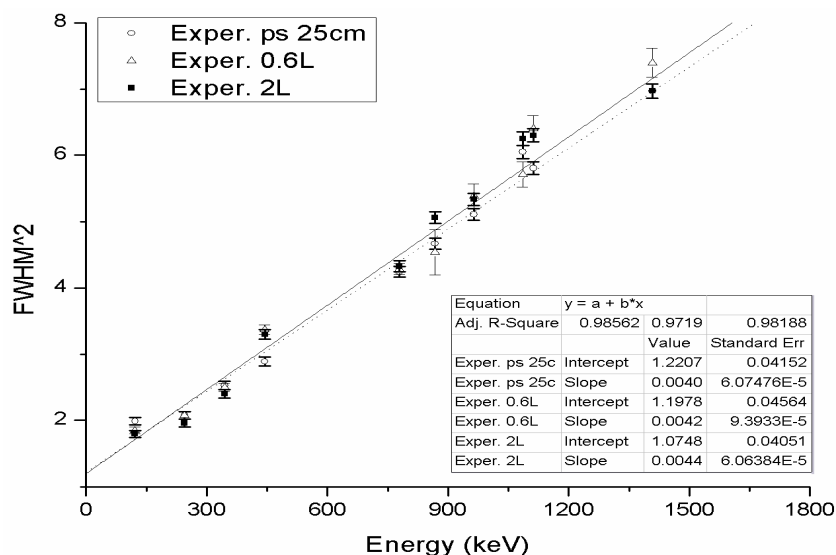
Ενέργεια (keV)	χ(κανάλι)
121,78	128,4232
244,7	285,5998
344,28	412,9317
443,96	540,3916
778,92	968,7016
867,39	1081,827
964,05	1205,425
1085,84	1361,157
1112,09	1394,723
1408,02	1773,125



Σχήμα 4.1: Γραφική παράσταση της ενέργειας των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει του αντίστοιχου καναλιού. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτή, για σημειακή πηγή σε απόσταση 25 cm.

β) βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας

Η διακριτική ικανότητα, αντίθετα, ήταν ελαφρά χειρότερη για τις φιάλες με μικρή διαφορά μεταξύ τους, ενώ και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε γραμμική προσαρμογή των δεδομένων του FWHM^2 ως προς την ενέργεια. Συγκεκριμένα στα 1332.5 keV η διακριτική ικανότητα για την σημειακή πηγή ήταν 2.58 keV φανερά μεγαλύτερη από την αναμενόμενη τιμή 1.77 keV (Πίνακας 4.1). Ο ηλεκτρονικός θόρυβος (electronic noise) προσδιορίστηκε στα 1.07 ± 0.05 keV, ενώ ο ποιοτικός παράγοντας κατάστασης του κρυστάλλου (fano factor) ήταν 0.3 ± 0.7 . Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται και οι βαθμονομήσεις για μπουκάλι 2L και 0,6L οι οποίες όμως δεν μας ενδιαφέρουν για τη γεωμετρία που έχουμε. Στο Σχήμα 4.2. αναπαρίστανται οι τιμές του FWHM^2 συναρτήσει της ενέργειας ακτίνων γ και η προσαρμογή των δεδομένων με γραμμική συνάρτηση.



Σχήμα 4.2: Καμπύλη ενεργειακής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτικού συστήματος για σημειακή πηγή σε απόσταση 25 cm και για εκτεταμένες πηγές νερού 2 L και 0.6 L σε επαφή με τον ανιχνευτή.

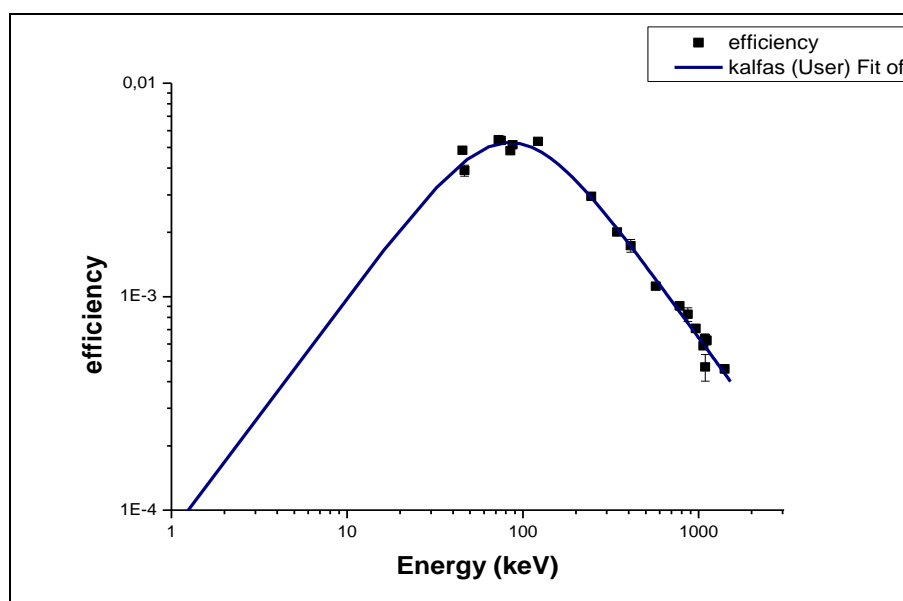
γ) βαθμονόμηση ανιχνευτικής ικανότητας

Για την βαθμονόμηση της ανιχνευτικής ικανότητας του ανιχνευτή της Ortec χρησιμοποιήσαμε δεδομένα από την αναφορά [ΦΙΑ 09]. Οι μετρήσεις που πραγματοποιούμε για να πιστοποιήσουμε την ορθότητα χρήσης των παραμέτρων που αντιστοιχούν στη γεωμετρία μας αφορά εκ νέου την εξαγωγή τιμών απόδοσης του συστήματος χρησιμοποιώντας δύο πηγές αναφοράς γνωστής ενεργότητας: το ^{152}Eu και το ^{207}Bi . Οι πηγές ήταν σημειακές και για τη μέτρηση στον ανιχνευτή τοποθετήθηκαν σε απόσταση 25 cm από τον κρύσταλλο. Η πηγή του ^{207}Bi που διαθέτουμε αυτή τη φορά προσθέτει το πλεονέκτημα των παραπάνω ενεργειακών κορυφών κοντά στην ενεργειακή περιοχή των 100 keV. Συγκεκριμένα, το ^{207}Bi «δίνει» ενεργειακές κορυφές στα 72.81, 74.97, 84.77 και 87.35 keV με συνέπεια η χάραξη της καμπύλης να γίνεται πιο αντιπροσωπευτική για την ενεργειακή περιοχή μέχρι τα 100 keV.

Παρακάτω παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας υπολογισμών της ανιχνευτικής ικανότητας από τις μετρήσεις των δύο σημειακών πηγών.

Κορυφες (keV)	Πηγή	counts	Absolute efficiency ϵ	Intensity%	$\delta\epsilon$	Πηγή	T1/2 (years)	Διάρκεια Μετρησης (sec)
45,38	Eu-152	8587	0,004848686	11,09	0,000165655	Eu152	13,33	501,493
46,61	Eu-152	2056	0,003901425	3,3	0,000232132	Bi207	31,55	300
72,805	Bi-207	57565	0,005426317	19,7	0,000109426			
74,969	Bi-207	96768	0,005396354	33,3	0,000106555			
84,77	Bi-207	32460	0,004822269	12,5	0,000100329			
87,35	Bi-207	10254	0,005146411	3,7	0,00012839			
121,782	Eu-152	24181	0,005331753	28,4	0,000165047			
244,699	Eu-152	3549	0,002947466	7,54	0,000112457			
344,281	Eu-152	8506	0,002008473	26,52	6,63467E-05			
411,126	Eu-152	622	0,001734182	2,246	0,000120317			
569,702	Bi-207	58954	0,001119405	97,8	2,23592E-05			
778,92	Eu-152	1873	0,000906395	12,94	3,95949E-05			
867,39	Eu-152	558	0,000826053	4,23	6,00177E-05			
964,055	Eu-152	1655	0,000709838	14,6	3,16377E-05			
1063,662	Bi-207	23686	0,00058725	74,9	1,23421E-05			
1085,842	Eu-152	1023	0,00063489	10,09	3,36975E-05			
1089,767	Eu-152	130	0,00046866	1,737	6,63674E-05			
1112,087	Eu-152	1350	0,000623431	13,56	2,95972E-05			
1408,022	Eu-152	1523	0,000458512	20,8	2,00765E-05			

Πίνακας 4.3: Στην αριστερή στήλη φαίνονται οι ενεργειακές κορυφές του ^{207}Bi και ^{152}Eu , και πιο δίπλα τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την απόδοση με το πειραματικό σφάλμα που τους αναλογεί.



Εικόνα 4.3: Τα πειραματικά σημεία των ενεργειακών κορυφών του ^{152}Eu όπως μετρήθηκαν από τον ανιχνευτή, και η αντίστοιχη μορφή της καμπύλης της απόδοσης.

Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων αντίστοιχα για κάθε περίπτωση:

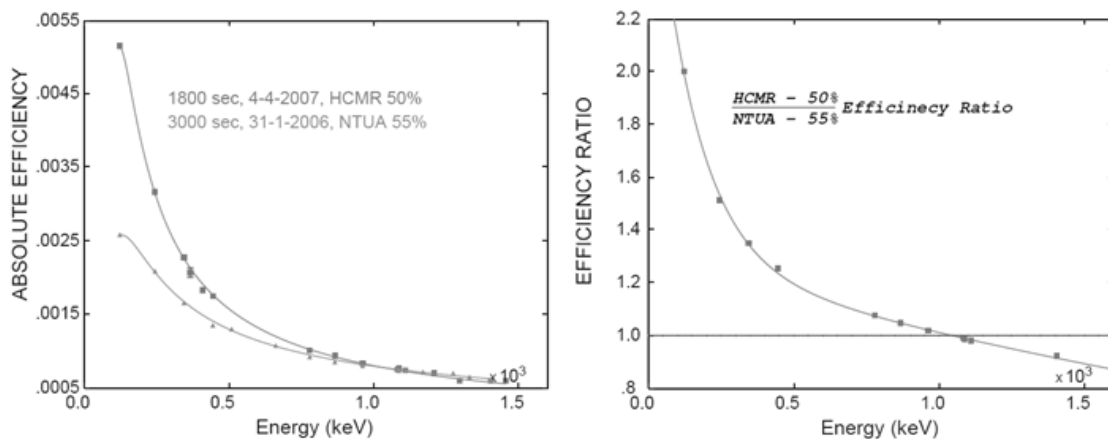
Παράμετρος	a	b	c	d
Γεωμετρία big container	22,742378	4,0829	1946538	5,1619724

Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικός πίνακας για τις παραμέτρους της απόδοσης της γεωμετρίας που μελετάμε.

Επομένως η σχέση που μας δίνει την απόδοση είναι:

$$Efficiency = \frac{a \cdot E^b}{1000 \cdot c + E^d} \rightarrow \frac{22,74 \cdot E^{4,0829}}{1000 \cdot 1946538 + E^{5,1619}} \dots\dots\dots(4.1)$$

Για καλύτερη ποσοτική εκτίμηση παρακάτω παρατίθεται διάγραμμα συγκρίσεων του ανιχνευτή GEM-FX8530P4 με τον ανιχνευτή γερμανίου που διέθετε το Μετσόβιο Πολυτεχνείο για τις μετρήσεις της δεύτερης περιόδου (απόδοσης 55%):



Εικόνα 4.4: Αριστερά φαίνονται οι καμπύλες των αποδόσεων για τους δύο ανιχνευτές, ενώ δεξιά ο λόγος τους για τους ανιχνευτές HCMR / NTUA [ΦΙΑ 09].

Από τη σύγκριση παρατηρούμε την υπεροχή του GEM-FX8530P4 στις ενέργειες κάτω των 1000 keV. Η διαφορά οφείλεται στο υπέρλεπτο παράθυρο ανίχνευσης που διαθέτει το οποίο τον καθιστά αξιόπιστο σε μετρήσεις αντίστοιχων ενεργειών. Για μεγαλύτερες ενέργειες επίσης η απόδοση του δεν υστερεί σημαντικά από τον ανιχνευτή του Πολυτεχνείου.

4.3.2 Ανιχνευτικό Σύστημα ΕΜΠ

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αναγκαστήκαμε να κλείσουμε τον ανιχνευτή, λόγω των διακοπών του Πάσχα. Παρατηρήσαμε στη μετέπειτα ανάλυση των φασμάτων ότι είχε τροποποιηθεί ελαφρά η ανιχνευτική και διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή προ και μετά το Πάσχα. Τα φάσματα που λήφθηκαν προ του Πάσχα αφορούσαν στην θαλάσσια λεκάνη A10, ενώ τα μετά Πάσχα στις Π1 και L4. Για τις βαθμονομήσεις που έγιναν με τη πρότυπη πηγή μας ¹⁵²Eu (6.7 ± 0.2 kBq | 20/2/2001) ο χρόνος μέτρησης στην πρώτη περίπτωση ήταν 7200min (2h) ενώ στη δεύτερη 16min, λίγος αλλά αρκετός για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα.

A) 1^η Περίοδος Μέτρησης (Απρίλιος 2011)

Παρακάτω παραθέτουμε το φάσμα των φωτοκορυφών που προέκυψε με την τοποθέτηση της πηγής σε επαφή με τον ανιχνευτή και για χρόνο μέτρησης 2h (Για τη λήψη των φασμάτων τοποθετήσαμε το δείγμα μας για μία με το κάτω μέρος του δείγματος στο παράθυρο του ανιχνευτή και για άλλη μία ώρα με την πάνω πλευρά του δείγματος).

```

==>                                DATA FROM FILE: EubackNETSUMa.SPE                                <==
STARTED ON ATE UNKNOWN, ELAPSED LIVE TIME:   7200 s, A= -26.34 B= 0.46737 C=-.131e-08
=====
=====
CENTROID +-   FWHM   NET AREA   +-   BACKGROUND   DATE/TIME   CENTROID   CHI   FWER
   keV   keV   keV   Counts   Error   Counts
   CHANNELS   keV
=====
=====
45.500 0.07   1.28     2127   9762     47041   28-04/19:25   155.146  0.7  0.16
121.78 0.01   1.35    595338  1108     45208   27-04/20:24   318.258 31.7  0.01
244.70 0.01   1.37    120676   541     25559   27-04/20:25   581.033  3.6  0.01
344.28 0.01   1.39    364381   802     17983   27-04/20:29   794.005  6.1  0.01
778.90 0.01   1.71    105421   492     12631   27-04/20:29  1723.861  1.2  0.01
867.39 0.01   1.91     23299   7417     13823   28-04/13:50  1913.271  1.0  0.02
964.05 0.01   1.92    100004   5735     8624    28-04/13:52  2120.076  2.4  0.01
1085.84 0.01  2.20     67339   338     8006    27-04/23:01  2381.165  1.3  0.01
1112.09 0.01  2.29     84052   395     7693    27-04/23:03  2437.327  2.7  0.01
1408.02 0.01  2.52    106427   424     1311    28-04/00:11  3070.811  3.1  0.01

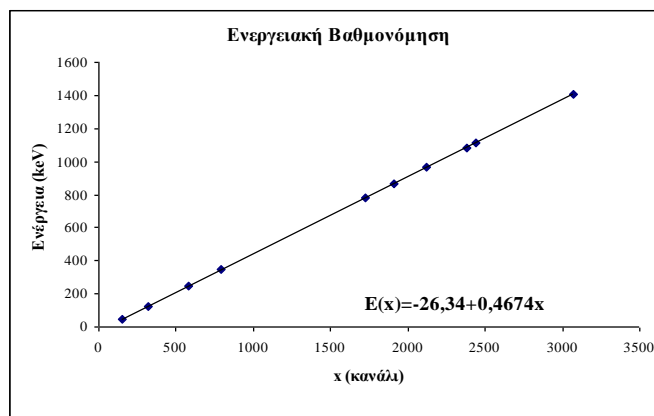
```

Πίνακας 4.6 : Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του φάσματος των 10 ισχυρότερων κορυφών του ¹⁵²Eu.

α) ενεργειακή βαθμονόμηση

Η ενεργειακή περιγράφεται από τη σχέση $E = a + b \cdot x + c \cdot x^2$, όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω, όπου E είναι η ενέργεια και x το αντίστοιχο κανάλι εμφάνισης της

x(κανάλι)	Ενέργεια(keV)
155,146	45,50
318,258	121,78
581,033	244,70
794,005	344,28
1723,861	778,90
1913,271	867,39
2120,076	964,05
2381,165	1085,84
2437,327	1112,09
3070,811	1408,02



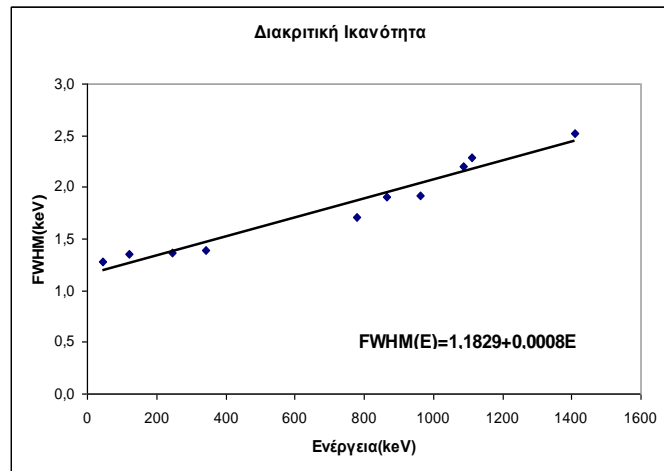
Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση της ενέργειας των 10 ισχυρότερων κορυφών του ¹⁵²Eu συναρτήσει του αντίστοιχου καναλιού. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτή.

Όπως παρατηρούμε από τη γραφική παράσταση η εξάρτηση της ενέργειας από το κανάλι εντοπισμού της είναι γραμμική με σταθερές $a=-26,34$ και $b=0,4674$ ενώ ο συντελεστής του καναλιού στο τετράγωνο της συνάρτησης που μας δίνει την ενέργεια είναι πολύ μικρός και για αυτό θεωρείται αμελητέος.

β) βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας

Η βαθμονόμηση της διακριτικής ικανότητας είναι γραμμική συνάρτηση σύμφωνα με τη σχέση, $FWHM = a + b * E$, όπου E είναι η ενέργεια και $FWHM$ το πλάτος της φωτοκορυφής σε ύψος ακριβώς στο μέσο της κορυφής αυτής, μετρημένο σε keV. Η γραφική παράσταση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα και τις σταθερές της βαθμονόμησης της διακριτικής ικανότητας φαίνονται παρακάτω.

Ενέργεια (keV)	FWHM (keV)
45,50	1,28
121,78	1,35
244,70	1,37
344,28	1,39
778,90	1,71
867,39	1,91
964,05	1,92
1085,84	2,20
1112,09	2,29
1408,02	2,52



Άρθρο II.

Άρθρο III.

Σχήμα 4.4: Γραφική παράσταση του FWHM των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει της ενέργειας τους. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση της βαθμονόμησης της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

Από την παραπάνω γραφική παράσταση βρίσκουμε ότι οι συντελεστές της βαθμονόμησης της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή είναι $a=1,1829$ και $b=0,0008$. Έτσι, βρίσκουμε το FWHM όχι μόνο για την συγκεκριμένη κορυφή που μας ενδιαφέρει, αλλά για οποιαδήποτε φωτοκορυφή. Γνωρίζοντας τους συντελεστές a και b μπορούμε να ελέγξουμε το FWHM βάζοντας μια οποιαδήποτε άλλη πηγή.

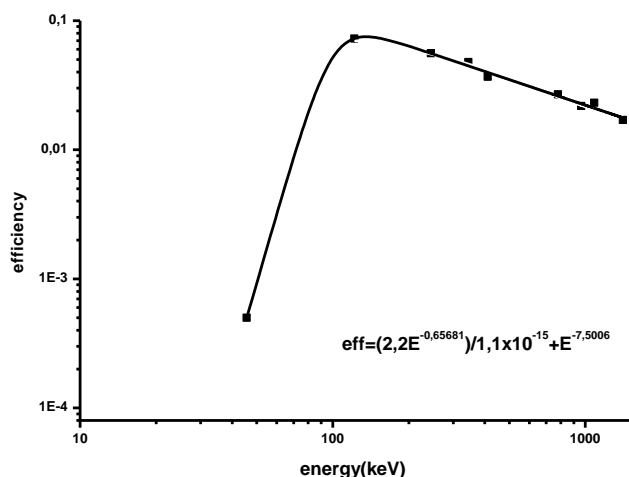
γ) βαθμονόμηση ανιχνευτικής ικανότητας

Από τον πειραματικό πίνακα μεταξύ της ενέργειας των ισχυρών φωτοκορυφών και την απόλυτης απόδοσής της συσκευής μας για αυτές τις κορυφές, πραγματοποιήσαμε την προσαρμογή στη θεωρητική καμπύλη εξάρτησης της απόλυτης ανιχνευτικής ικανότητας από την ενέργεια (E), που είναι της μορφής:

$$efficiency = \frac{a * E^b}{c + E^d} \quad (4.2)$$

όπου a, b, c, d σταθερές. Με την προσαρμογή που κάνουμε προκύπτουν συντελεστές που μπορούν να μας δώσουν την απόδοση για οποιαδήποτε ενέργεια στον συγκεκριμένο ανιχνευτή, όπως φαίνεται και παρακάτω.

Ενέργεια (keV)	Απόλυτη απόδοση
45,50	0,0005
121,78	0,0728
244,70	0,0559
344,28	0,0477
778,90	0,0269
867,39	0,0244
964,05	0,0219
1085,84	0,0232
1112,09	0,0209
1408,02	0,0170



Σχήμα 4.5: Γραφική παράσταση της απόλυτης απόδοσης των 10 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει της ενέργειας τους. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση της βαθμονόμησης της ανιχνευτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

A) 2^η Περίοδος Μέτρησης (Μάιος 2011)

Το φάσμα των φωτοκορυφών που προέκυψε με την τοποθέτηση της πηγής σε επαφή με τον ανιχνευτή και για χρόνο μέτρησης 16 min φαίνεται παρακάτω.

```

==> DATA FROM FILE: Eu_16min-02.SPE <==
STARTED ON 05/05/11 ,ELAPSED LIVE TIME: 1000 s, A= -23.07 B= 0.40571 C=-.205e-07
=====
CENTROID +- FWHM NET AREA +- BACKGROUND DATE/TIME CENTROID CHI FWER
keV keV keV Counts Error Counts CHANNELS keV
=====
121.74 0.01 1.23 71596 500 8614 06-05/12:10 358.106 9.3 0.01
244.56 0.01 1.80 19672 210 5454 05-05/15:15 661.310 5.2 0.02
344.13 0.01 1.87 58613 326 4118 05-05/15:16 906.686 6.9 0.01
778.81 0.01 2.20 15047 176 2754 05-05/15:17 1977.803 1.9 0.02
964.01 0.01 2.38 16115 179 1710 05-05/15:23 2434.115 2.0 0.02
1112.04 0.01 2.52 13794 161 1317 06-05/12:23 2798.996 1.6 0.02
1408.01 0.01 2.73 17379 172 199 06-05/12:24 3528.771 1.6 0.02

```

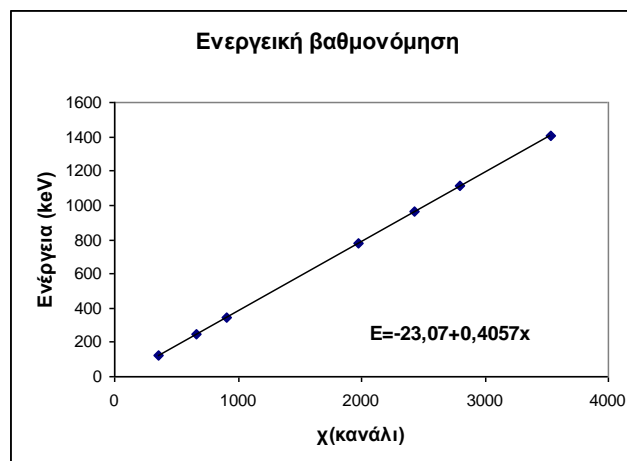
Πίνακας 4.6 : Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του φάσματος των 7 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu .

Παρατηρούμε ότι η ανάλυση έχει γίνει μόνο για 7 κορυφές και αυτό εξαιτίας της χαμηλής στατιστικής, μιας και ο χρόνος μέτρησης ήταν μόνο 16min.

α) ενεργειακή βαθμονόμηση

Η ενεργειακή περιγράφεται από τη σχέση $E = a + b * x + c * x^2$, όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω, όπου E είναι η ενέργεια και x το αντίστοιχο κανάλι εμφάνισής της.

Ενέργεια(keV)	x(κανάλι)
121,74	358,106
244,56	661,310
344,13	906,686
778,81	1977,803
964,01	2434,115
1112,04	2798,996
1408,01	3528,771



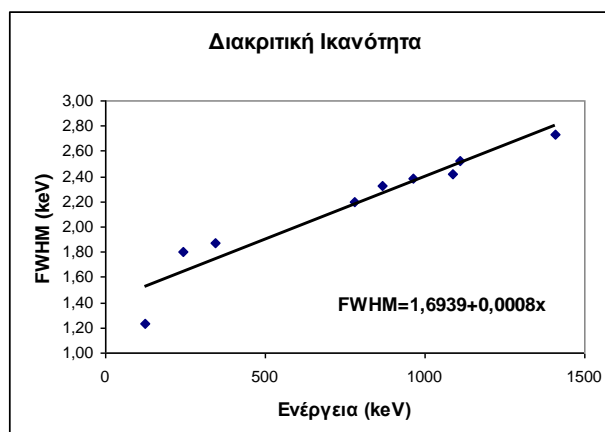
Σχήμα 4.6: Γραφική παράσταση της ενέργειας των 7 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει του αντίστοιχου καναλιού. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτή.

Όπως παρατηρούμε από τη γραφική παράσταση η εξάρτηση της ενέργειας από το κανάλι εντοπισμού της είναι γραμμική με σταθερές $a = -23,07$ και $b = 0,4057$ ενώ ο συντελεστής του καναλιού στο τετράγωνο της συνάρτησης που μας δίνει την ενέργεια είναι πολύ μικρός και για αυτό θεωρείται αμελητέος.

β) βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας

Η βαθμονόμηση της διακριτικής ικανότητας είναι γραμμική συνάρτηση σύμφωνα με τη σχέση, $FWHM = a + b * E$, όπου E είναι η ενέργεια και FWHM το πλάτος της φωτοκορυφής σε ύψος ακριβώς στο μέσο της κορυφής αυτής, μετρημένο σε keV. Η γραφική παράσταση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα και τις σταθερές της βαθμονόμησης της διακριτικής ικανότητας φαίνονται παρακάτω.

Ενέργεια(keV)	FWHM
121,74	1,23
244,56	1,80
344,13	1,87
778,81	2,20
867,31	2,33
964,01	2,38
1085,79	2,42
1112,04	2,52
1408,01	2,73



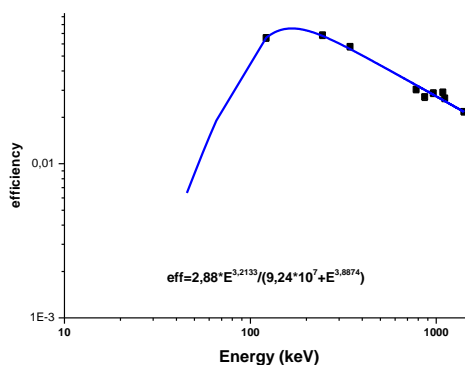
Σχήμα 4.7: Γραφική παράσταση του FWHM των 7 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει της ενέργειας τους. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση της βαθμονόμησης της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

Από την παραπάνω γραφική παράσταση βρίσκουμε ότι οι συντελεστές της βαθμονόμησης της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή είναι $a=1,6939$ και $b=0,0008$. Έτσι, βρίσκουμε το FWHM όχι μόνο για την συγκεκριμένη κορυφή που μας ενδιαφέρει, αλλά για οποιαδήποτε φωτοκορυφή. Γνωρίζοντας τους συντελεστές a και b μπορούμε να ελέγξουμε το FWHM βάζοντας μια οποιαδήποτε άλλη πηγή.

γ) βαθμονόμηση ανιχνευτικής ικανότητας

Από τον πειραματικό πίνακα μεταξύ της ενέργειας των ισχυρών φωτοκορυφών και την απόλυτη απόδοσή της συσκευής μας για αυτές τις κορυφές, πραγματοποιήσαμε την προσαρμογή στη θεωρητική καμπύλη εξάρτησης της απόλυτης ανιχνευτικής ικανότητας από την ενέργεια (E), που είναι της μορφής Σχέση 4.2. Με την προσαρμογή που κάνουμε προκύπτουν συντελεστές που μπορούν να μας δώσουν την απόδοση για οποιαδήποτε ενέργεια στον συγκεκριμένο ανιχνευτή, όπως φαίνεται και παρακάτω.

Ενέργεια(keV)	Απόλυτη απόδοση
121,74	0,0657
244,56	0,0683
344,13	0,0576
778,81	0,0304
867,31	0,0271
964,01	0,0287
1085,79	0,0291
1112,04	0,0266
1408,01	0,0218



Σχήμα 4.8: Γραφική παράσταση της απόλυτης απόδοσης των 7 ισχυρότερων κορυφών του ^{152}Eu συναρτήσει της ενέργειας τους. Αριστερά παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα ενώ στο γράφημα διακρίνεται η εξίσωση της βαθμονόμησης της ανιχνευτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

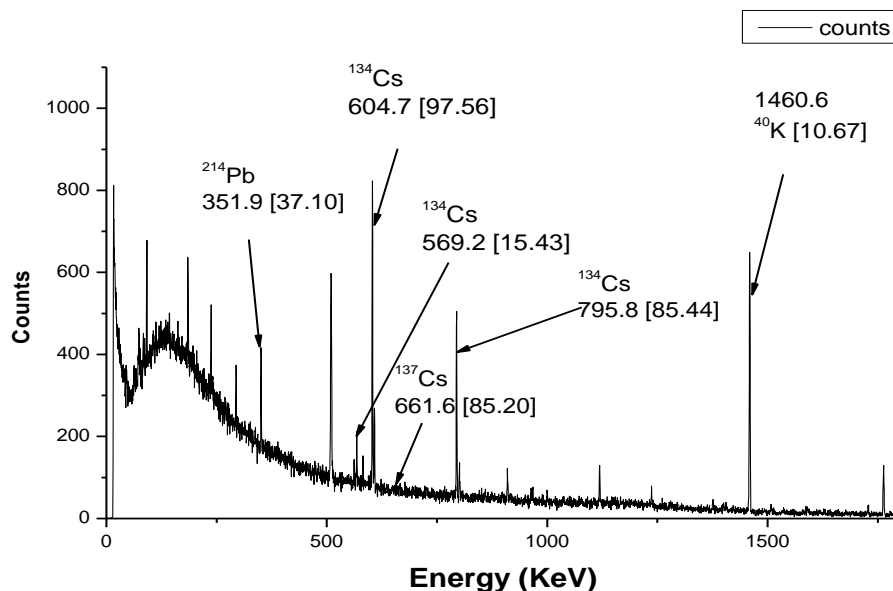
4.4 Αποτελέσματα MDA

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα που αφορούν σε μαθηματικούς υπολογισμούς για τον καθορισμό της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ενεργότητας (MDA). Όπως παρατηρούμε στον παρακάτω πίνακα τα δεδομένα από την ανάλυση των φασμάτων (πέμπτη στήλη) που έχει προηγηθεί από εκείνη της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ενεργότητας (τρίτη στήλη), είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα παραπάνω από το MDA. Αυτό πρακτικά μας δηλώνει ότι μπορούν να παρατηρηθούν και να μετρηθούν. Τα μόνα προβληματικά δεδομένα είναι εκείνα του Ιονίου Πελάγους (βαθιά λεκάνη II) για την οποία μπορούμε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο για τα βάθη 1050m και 2151m, μιας και για τα υπόλοιπα η ανάλυσή μας δίνει αποτελέσματα κάτω της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ενεργότητας. Εξαιρέση αποτελούν τα 250m όπου η ανάλυση της κορυφής κατέστη αδύνατη μίας και δεν διακρινόταν από το υπόβαθρο.

Βάθος(m)	Ενέργεια (keV)	MDA (Bq/m ³)	error	Αποτέλεσμα ανάλυσης (Bq/m ³)	error
ΠΕΡΙΟΔΟΣ 1		SEASON 1			
A10					
2	661,6	3,2	0,6	4,2	0,7
200	661,55	3,2	0,6	4,2	0,7
750	661,93	3,2	0,6	3,2	0,7
1000	661,21	3,2	0,6	3,6	0,9
1790	661,58	3,2	0,6	3,9	0,8
A1					
2	662,03	2,6	0,5	3,4	0,7
20	661,27	2,6	0,5	8,2	1,1
50	661,62	2,6	0,5	6,5	0,9
200	661,59	2,6	0,5	4,5	1,1
750	661,94	2,6	0,5	4,7	1,0
1550	661,59	2,5	0,5	4,5	0,8
A2					
2	661,59	2,6	0,5	2,7	0,4
10	662,01	2,6	0,5	3,5	0,4
50	661,21	2,6	0,5	5,5	0,5
88	661,57	2,6	0,5	4,7	0,5
NA1					
10	661,91	2,6	0,5	6,1	0,6
75	661,9	2,6	0,5	7,4	0,8
NA8					
10	661,21	2,6	0,5	6,9	0,8
50	661,4	2,6	0,5	6,0	0,8
ΠΕΡΙΟΔΟΣ 2		SEASON 2			
A10					
2	661,31	2,5	0,5	5,3	0,9
200	660,73	1,8	0,4	2,9	0,5
750	661,23	1,8	0,4	2,9	0,5
1000	660,81	1,9	0,4	2,6	0,5
1805	662,18	1,8	0,4	3,0	0,5
I1					
surf	661,38	1,6	0,3	0,8	0,3
160	661,11	1,6	0,3	1,0	0,4
250	661,79	1,5	0,3		
450	661,23	1,6	0,3	1,3	0,5
1050	662,13	1,6	0,3	2,2	0,5
2151	661,76	1,6	0,3	3,1	0,6
L4					
0	662,55	1,5	0,3	2,2	0,5
50	661,73	1,6	0,3	2,6	0,5
250	661,73	1,5	0,3	2,8	0,7
1250	660,98	1,6	0,3	3,3	0,8
2300	661,23	1,6	0,3	2,7	0,6
2902	661,22	1,6	0,3	3,1	0,6

Πίνακας 4.7: Τα θεωρητικά αποτελέσματα της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ενεργότητας για τα δείγματά μας.

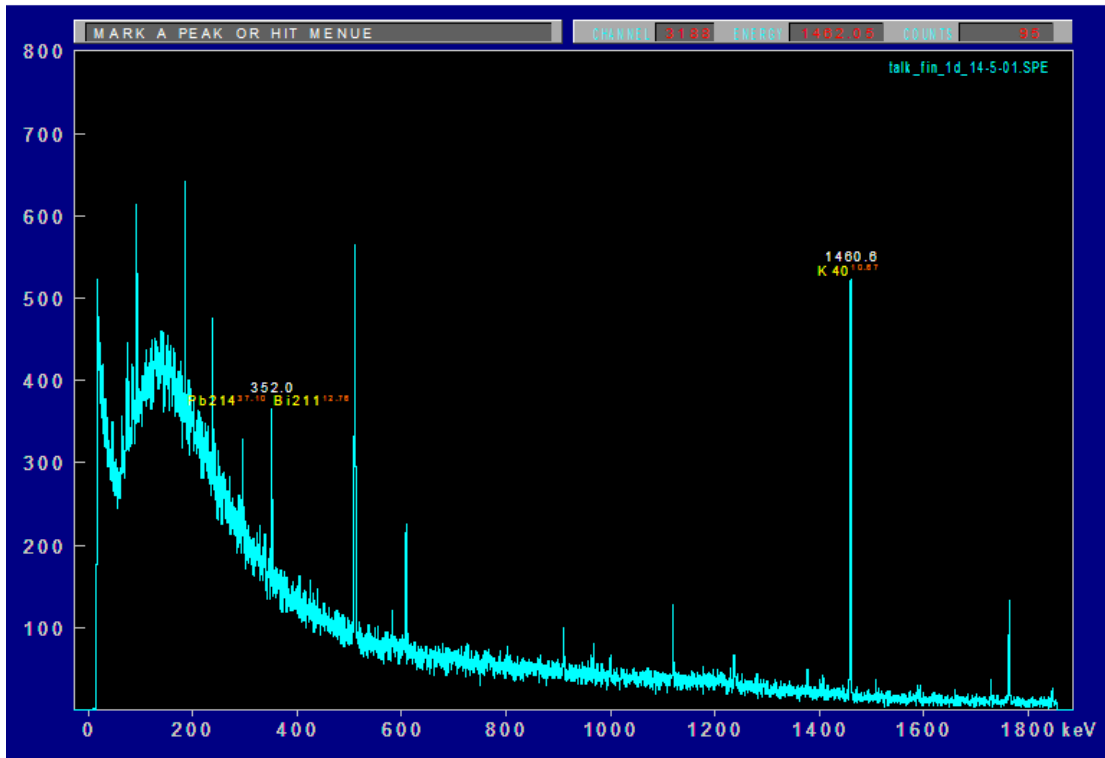
Για τον υπολογισμό της ελάχιστης ανιχνεύομενης ενεργότητας (βλ. 3.3.3 Ελάχιστη Ανιχνεύομενη Ενεργότητα (MDA)) αναλύσαμε την κορυφή του ^{137}Cs , η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



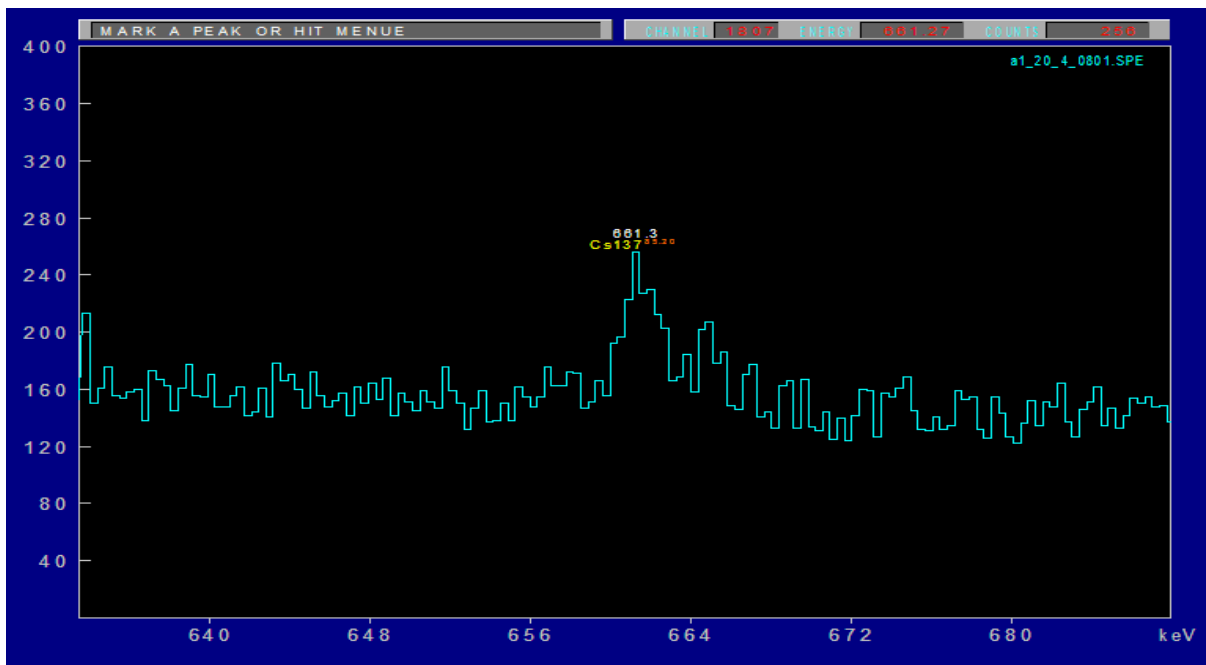
Σχήμα 4.9: Χαρακτηριστικό φάσμα των μετρήσεών μας, στο οποίο φαίνονται η κορυφή ^{137}Cs την οποία αναλύσαμε και οι κορυφές ^{40}K και ^{214}Pb με τις οποίες κάναμε την ενεργειακή βαθμονόμηση του φάσματος.

Παρακάτω παραθέτουμε κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα των φασμάτων που αναλύσαμε. Πιο συγκεκριμένα παραθέτουμε το φάσμα του υποβάθρου (σχήμα 4.10), δύο φάσματα για τον υπολογισμό της ελάχιστης ανιχνεύομενης ενεργότητας (στο ένα με καθαρή την κορυφή του ^{137}Cs (σχήμα 4.11) και το άλλο με μη τόσο καθαρή (σχήμα 4.12)) και ένα συγκριτικό σχήμα στο οποίο παρουσιάζονται τα φάσματα των μετρήσεων που έχουν ληφθεί στο εργαστήριο του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε και του Ε.Μ.Π. (σχήμα 4.13).

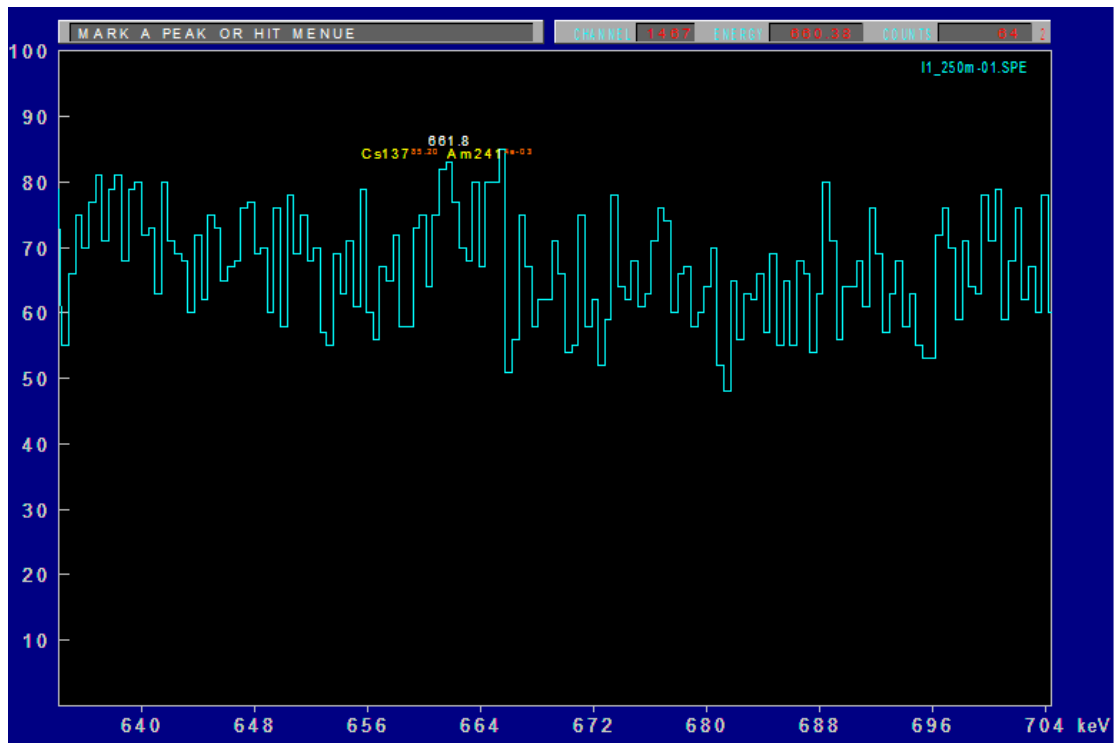
Στο φάσμα του υποβάθρου που παρατίθεται παρακάτω δεν είναι εμφανείς οι κορυφές του ^{134}Cs , μιας και το στοιχείο αυτό προστέθηκε κατά τη διάρκεια της προσυγκέντρωσης των δειγμάτων και δεν υπάρχει στο φυσικό περιβάλλον πια, λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής του (2.1y). Είναι δυνατόν να παρατηρήσουμε τις κορυφές του ^{40}K και ^{214}Pb , με τις οποίες πραγματοποιήσαμε την ενεργειακή βαθμονόμηση του φάσματος.



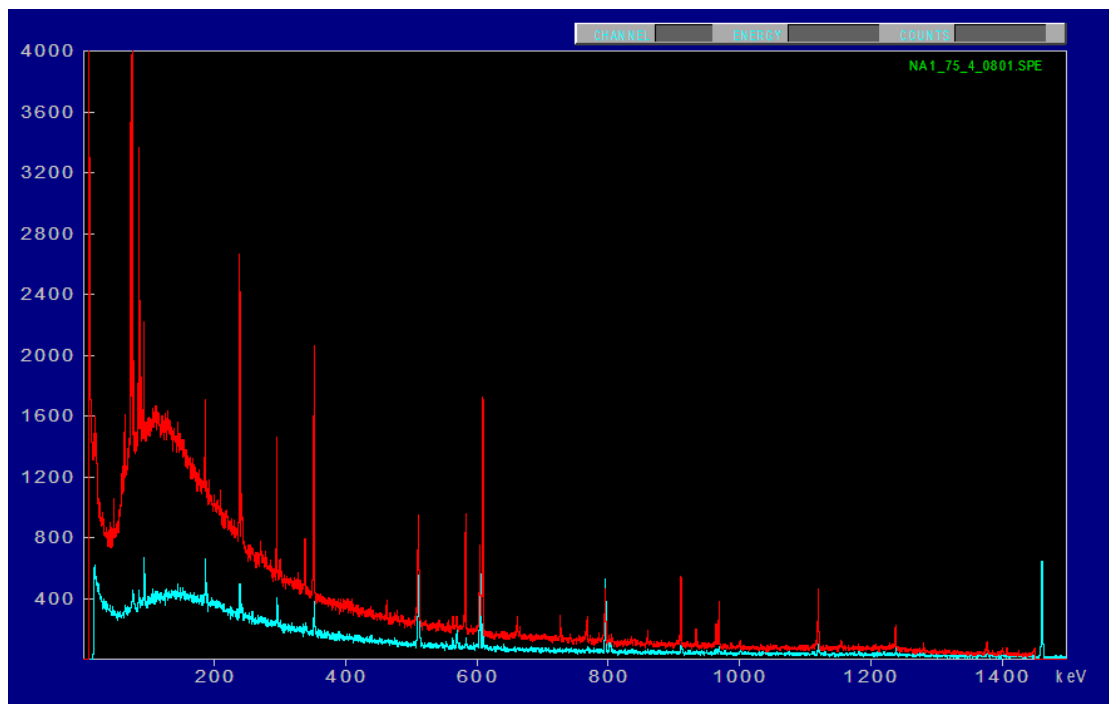
Σχήμα 4.10: Το φάσμα του υποβάθρου.



Σχήμα 4.11: Φάσμα στο οποίο φαίνεται η κορυφή του ^{137}Cs (καθαρά) πάνω από το υπόβαθρο.



Σχήμα 4.12: Φάσμα στο οποίο δεν φαίνεται καθαρά η κορυφή του ^{137}Cs πάνω από το υπόβαθρο.



Σχήμα 4.13: Στο άνωθεν σχήμα φαίνονται τα φάσματα των μετρήσεων από το εργαστήριο του Ε.Μ.Π. και του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ.. Το φάσμα των μετρήσεων που έγιναν στο Ε.Μ.Π. παρουσιάζει μικρότερο υπόβαθρο λόγω της καλύτερης θωράκισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μέχρι αυτό το σημείο παρουσιάστηκαν αναλυτικά η περιοχή μελέτης, οι εργασίες πεδίου, η οργανολογία, οι τεχνικές δειγματοληψίας και ανάλυσης των δεδομένων που αφορούν την μελέτη αυτή. Από την ανάλυση προέκυψε ένα πλήθος ποιοτικών και ποσοτικών αποτελεσμάτων από την ευρύτερη περιοχή μελέτης, που αφορούν πέρα από ραδιονουκλίδια και άλλες φυσικές παραμέτρους για την ωκεανογραφία. Το σύνολο των δεδομένων μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικά αντιπροσωπευτικό, καθώς καλύπτει δύο περιόδους ενός πλήρους υδρολογικού κύκλου και διάφορες περιοχές των Ελληνικών Θαλασσών. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και η ερμηνεία των παρατηρήσεων, που αφορούν την ραδιενέργεια λόγω ^{137}Cs σε θέματα ωκεανογραφίας και ραδιοπροστασίας.

Αρχικά, στο πειραματικό μέρος των αποτελεσμάτων, παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ραδιενεργού συγκέντρωσης του ^{137}Cs και ελέγχθηκαν οι τιμές τους από άποψη ραδιοπροστασίας, στο σύνολο των καταγραφών και δειγμάτων νερού πυρηνικής φασματοσκοπίας. Ακολουθεί η παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων και η σύγκρισή τους με άλλες ωκεανογραφικές παραμέτρους όπως αλατότητα, θερμοκρασία και πυκνότητα. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων δίνεται σε σχέση με τα είδη του θαλασσινού νερού και γίνεται μια προσπάθεια ταυτοποίησή τους από τα δεδομένα της εργασίας αυτής.

5.1 Ποσοτικοποίηση δεδομένων

Η μέτρηση του αριθμού των γεγονότων από τη φασματική ανάλυση των φωτοκορυφών αποτελεί μέρος του προσδιορισμού της ενεργότητας (activity) σε Bq/m^3 , η οποία για κάθε δείγμα δίνεται από τη σχέση:

$$Activity = \frac{Counts}{e_{ff} * rec * t * I_{\gamma} * V} \quad (5.1)$$

- όπου Counts ο αριθμός των γεγονότων που μετρούμε στην προς μελέτη κορυφή
- e_{ff} , η ανιχνευτική ικανότητα (απόδοση) του ανιχνευτικού συστήματος
- rec, η χημική απόδοση της μεθόδου (chemical efficiency)
- t, ο χρόνος μέτρησης του φάσματος (86400 sec)
- I_{γ} , η ένταση της ακτίνας- γ (για το ^{137}Cs 0.8520 στα 661.66 keV που μελετάμε)
- V, ο όγκος κάθε δείγματος (20L)

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας της ανάλυσης:

Λεκάνη	Βάθος (m)	counts	δcounts	χημική απόδοση (recovery)	δrec	Activity (Bq/m ³)	δA (Bq/m ³)
SEASON 1							
A1	2	95	18	0,94	0,04	3,4	0,7
	20	223	28	0,90	0,04	8,2	1,2
	50	185	25	0,95	0,04	6,5	1,0
	200	125	30	0,92	0,04	4,5	1,1
	750	121	25	0,86	0,04	4,7	1,0
	1550	112	20	0,82	0,04	4,5	0,9
A2	2	70	16	0,85	0,04	2,7	0,4
	10	90	18	0,85	0,04	3,5	0,4
	50	136	20	0,81	0,04	5,5	0,6
	88	120	20	0,85	0,04	4,7	0,5
A10	2	123	20	0,97	0,05	4,2	0,7
	200	124	20	0,97	0,05	4,2	0,7
	750	91	20	0,95	0,05	3,2	0,7
	1000	101	24	0,92	0,05	3,6	1,0
	1790	110	20	0,93	0,05	3,9	0,8
NA1	10	167	12	0,91	0,05	6,1	0,6
	75	213	16	0,95	0,05	7,4	0,8
NA8	10	193	20	0,93	0,05	6,9	0,9
	50	174	20	0,97	0,05	6,0	0,8
SEASON 2							
A10	2	223	34	0,98	0,04	5,3	0,9
	200	115	20	0,93	0,04	2,9	0,5
	750	120	20	0,96	0,04	2,9	0,5
	1000	109	20	0,99	0,04	2,6	0,5
	1805	115	20	0,91	0,04	3,0	0,5
I1	0	<mda	<mda	0,90	0,04	<mda	<mda
	160	<mda	<mda	0,94	0,04	<mda	<mda
	250	<mda	<mda	0,92	0,04	<mda	<mda
	450	<mda	<mda	0,91	0,04	<mda	<mda
	1050	93	20	0,97	0,04	2,2	0,5
	2151	120	20	0,90	0,04	3,1	0,6
L4	0	90	20	0,95	0,04	2,2	0,5
	50	110	20	0,99	0,04	2,6	0,5
	250	110	25	0,92	0,04	2,8	0,7
	1250	125	30	0,90	0,04	3,3	0,8
	2300	110	25	0,95	0,04	2,7	0,6
	2902	128	22	0,96	0,04	3,1	0,6

Πίνακας 5.1: Οι ενεργότητες που προσδιορίστηκαν για τα διάφορα βάθη και η χημική απόδοση της μεθόδου μας.

Η τρίτη στήλη του πίνακα περιλαμβάνει τον αριθμό των γεγονότων (counts), τα οποία έχουν προκύψει με την αφαίρεση των γεγονότων του υποβάθρου για την κορυφή αυτή. Αυτό γίνεται διότι λαμβάνουμε υπόψη το υπόβαθρο του εργαστηρίου των μετρήσεων (κλειστός χώρος με τοίχους που εμπεριέχουν ποσότητες ¹³⁷Cs οι οποίες έχουν παραμείνει στον αέρα από της πυρηνικές δοκιμές και το ατύχημα του Chernobyl).

5.2 Υπολογισμός αβεβαιοτήτων

Γενικά οι αβεβαιότητες που θα θεωρηθούν στην παραπάνω διαδικασία αφορούν την αβεβαιότητα στον υπολογισμό του αριθμού των γεγονότων, στην τιμή της ανιχνευτική ικανότητας (απόδοση) και στην τιμή της χημικής απόδοσης της μεθόδου. Δεν λαμβάνουμε υπόψη καθόλου τις αβεβαιότητες του χρόνου, του όγκου και της έντασης της ακτίνας-γ, διότι οι τιμές τους είναι 86400 sec, 20L και 0.85 αντίστοιχα, σταθερές για όλα τα δείγματα και τις μετρήσεις.

Το πρόγραμμα ανάλυσης SPECTRW εξάγει αυτόματα την αβεβαιότητα στον προσδιορισμό των γεγονότων ως την τετραγωνική ρίζα του συνολικού καταγεγραμμένου αριθμού για την ενεργειακή κορυφή που αναλύουμε. Οι αβεβαιότητες λοιπόν των παραμέτρων: αριθμός καθαρών γεγονότων, χημική απόδοση μεθόδου και απόλυτη απόδοση ανιχνευτή υπολογίζονται από τη διάδοση σφαλμάτων όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις κάνοντας χρήση του σφάλματος αυτού που δίνεται από το πρόγραμμα.

Το σφάλμα ($\delta counts$) των καθαρών γεγονότων που μετρούμε είναι:

$$\delta counts = \sqrt{\delta deim^2 + \delta bgr^2} \quad (5.2)$$

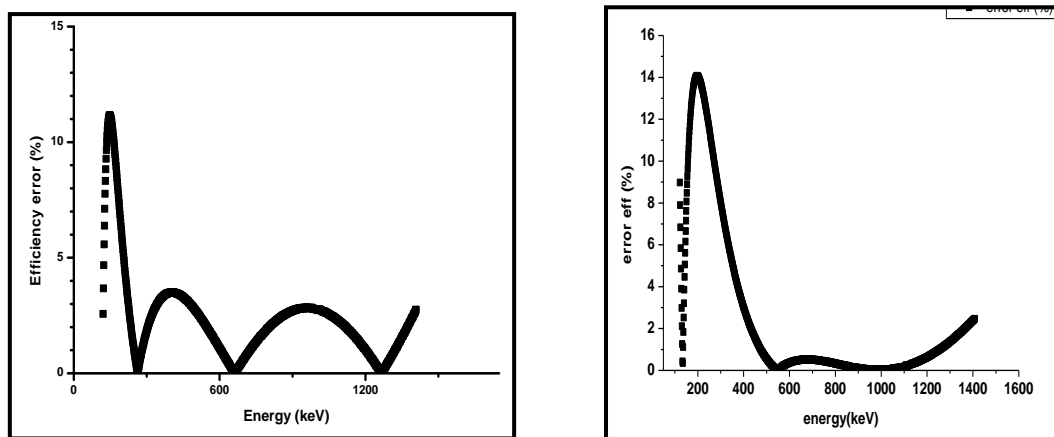
όπου $\delta deim$ και δbgr είναι τα γεγονότα που καταγράφει ο ανιχνευτής για το δείγμα μας και το υπόβαθρο αντίστοιχα.

Το σφάλμα της χημικής απόδοσης (δrec) δίνεται από τη σχέση;

$$\delta rec = \left(\sqrt{\left(\frac{\delta counts}{counts} \right)^2 + \left(\frac{\delta blank}{blank} \right)^2} \right) * recovery \quad (5.3)$$

όπου τα καθαρά γεγονότα ($counts$) έχουν προέλθει από τη μέτρηση την ενεργειακής κορυφής του ^{137}Cs αφαιρώντας το υπόβαθρο και ο δεύτερος όρος της ρίζας ($blank$) από τη μέτρηση τριών ενεργειακών κορυφών του ^{134}Cs (βλ. παράρτημα Α), χωρίς να αφαιρεθεί το υπόβαθρο, διότι το στοιχείο αυτό είναι βραχύβιο και δεν έχει παραμείνει στο περιβάλλον.

Το σφάλμα της απόλυτης απόδοσης του ανιχνευτή φαίνεται στα παρακάτω σχήματα για τις μετρήσεις την περίοδο του Απριλίου και Μαΐου 2011. Όπως είναι εμφανές στα παρακάτω διαγράμματα το μέγιστο σχετικό σφάλμα της απόλυτης απόδοσης είναι 3.5% για ενέργειες άνω των 400keV. Αυτό το σφάλμα θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της ενεργότητας, το οποίο μας ικανοποιεί για το ενεργειακό εύρος που μελετάμε.



Σχήμα 5.1: Το σφάλμα της απόλυτης απόδοσης για την περίοδο του Απριλίου (αριστερά) και Μαΐου (δεξιά) 2011.

Το σφάλμα της ενεργότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\delta A = \left(\sqrt{\left(\frac{\delta counts}{counts} \right)^2 + \left(\frac{\delta rec}{recovery} \right)^2 + \left(\frac{\delta eff}{efficiency} \right)^2} \right) * Activity \quad (5.4)$$

όπου ο τρίτος όρος της ρίζας αφορά την απόλυτη απόδοση και το σφάλμα αυτής.

5.3. Παρουσίαση δεδομένων

Παρακάτω παραθέτουμε τα αποτελέσματά μας για τις δύο διαφορετικές περιόδους δειγματοληψίας

5.3.1. 1^η περίοδος δειγματοληψίας (Άνοιξη 2008)

α) Σταθμός A1 (Βόρεια Λήμνος)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της βαθιάς λεκάνης βόρεια της Λήμνου (A1) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2. Στο σχήμα δίνονται όλα τα δεδομένα που αφορούν τη λεκάνη A1 συναρτήσει του βάθους, δηλαδή την ενεργότητα του ¹³⁷Cs μαζί με κάποιες άλλες χρήσιμες ωκεανογραφικές παραμέτρους του θαλασσινού νερού όπως θερμοκρασία και αλατότητα. Οι παράμετροι αυτές θα συνεισφέρουν στο να κατανοήσουμε τόσο θέματα ραδιοπροστασίας/ραδιοοικολογίας λόγω των συγκεντρώσεων του ¹³⁷Cs στο Βόρειο Αιγαίο από το ατύχημα του Chernobyl, όσο και τις υποθαλάσσιες διαδικασίες για την ερμηνεία που αφορά στη μεταφορά των θαλασσιών μαζών στη συγκεκριμένη περιοχή. Η περιοχή αυτή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της μεταβλητότητας του οικοσυστήματος από την αλληλεπίδραση των νερών της Μαύρης Θάλασσας που φθάνουν στο Β. Αιγαίο αφού διασχίσουν το Στενό του Βοσπόρου, τη θάλασσα του Μαρμαρά και τα Στενά των Δαρδανελίων.

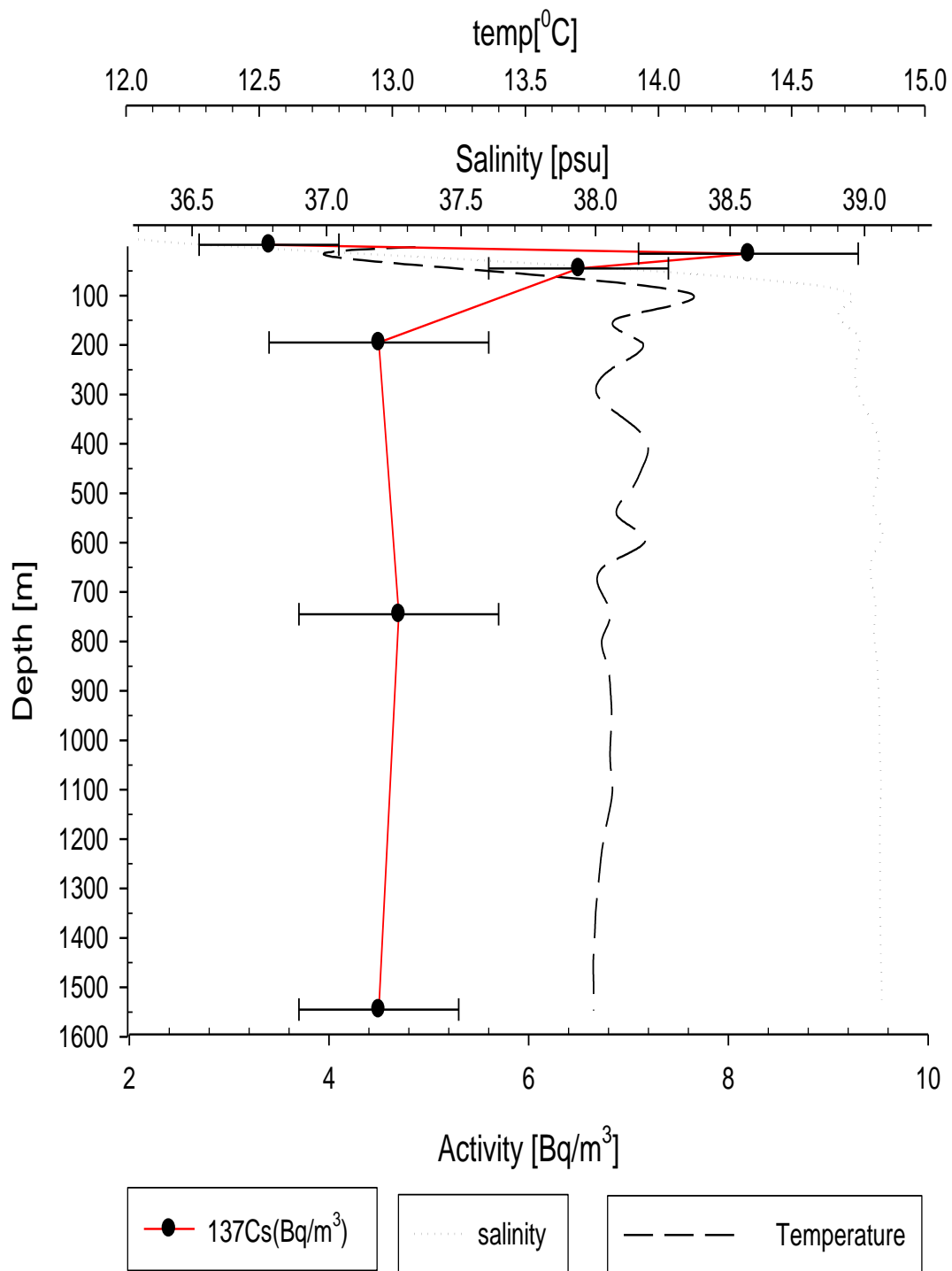
Συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις της αλατότητας και της θερμοκρασίας μετρήθηκαν συναρτήσει του βάθους. Παράλληλα, συλλέχθηκαν δείγματα και έγιναν μετρήσεις για να προσδιοριστεί η περιεκτικότητα σε ¹³⁷Cs. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων δίνονται σε απόλυτες μονάδες δηλαδή σε Bq/m³. Η κατακόρυφη κατανομή της αλατότητας και της θερμοκρασίας υποδεικνύουν ότι το επιφανειακό στρώμα (από 0 έως 10m) έχει τις χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας και αλατότητας σε σύγκριση με τα υποκείμενα στρώματα διότι οι θαλάσσιες αυτές μάζες προέρχονται από την Μαύρη Θάλασσα. Σημειώνεται ότι τα νερά της Μαύρης Θάλασσας είναι πάντα ψυχρότερα και με μικρότερη αλατότητα από τα νερά του Αιγαίου Πελάγους. Από 10 έως 60m αναπτύσσεται το θερμοκλινές και το αλοκλινές της λεκάνης. Η γρήγορη αύξηση τόσο της θερμοκρασίας (12-14.5 °C) όσο και της αλατότητας (37-39 psu) σε συνάρτηση με το βάθος επιβεβαιώνει την ανάμειξη των νερών του Βορείου Αιγαίου με εκείνα που έρχονται από τη Μαύρη θάλασσα (χαμηλότερης αλατότητας και θερμοκρασίας). Από τα 60m μέχρι τα 200 m βάθους παρατηρούμε μία μικρή διακύμανση της αλατότητας και της θερμοκρασίας με μέσες τιμές 13.9 °C και 38.9 psu, αντίστοιχα. Στο ενδιάμεσο αυτό στρώμα τα νερά έρχονται από τη λεκάνη της Λεβαντίνης και χαρακτηρίζονται από υψηλή αλατότητα και θερμοκρασία. Μετά τα 200m το προφίλ θερμοκρασίας και αλατότητας παραμένει σταθερό για όλη την λεκάνη με μέσες τιμές 13.8 °C και 39.0 psu, αντίστοιχα. Στο στρώμα αυτό η αλατότητα και η θερμοκρασία παρουσιάζουν πολύ μικρές διακυμάνσεις που δείχνει ότι η στήλη νερού μετά τα 200m είναι περίπου της ίδιας

πυκνότητας με αποτέλεσμα τα νερά αυτά να αποτελούν τα πυκνά νερά της βαθιάς λεκάνης.

Όσον αφορά στην κατανομή της ενεργότητας του ^{137}Cs του Αιγαίου Πελάγους, παρατηρούμε (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2) μία έντονη αύξησή της από τα επιφανειακά νερά (3.7 ± 0.5) Bq/m^3 μέχρι τα 20m, όπου και παρατηρήθηκε η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης (8.2 ± 1.5) Bq/m^3 . Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η Μαύρη θάλασσα είναι περισσότερο επιβαρυνμένη από ^{137}Cs (λόγω της εναπόθεσης κεσίου από το ατύχημα του Chernobyl). Έτσι οι συγκεντρώσεις ^{137}Cs που μετρήθηκαν, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία και την αλατότητα, συνεισφέρουν στην ταυτοποίηση των θαλασσιών μαζών. Σε βάθη από 60 έως 200m (εκεί που τελειώνει το θερμοκλινές και το αλοκλινές), η συγκέντρωση του ^{137}Cs ελαττώνεται λόγω των ενδιάμεσων νερών από τη Λεβαντίνη (που περιέχει μικρότερες συγκεντρώσεις ^{137}Cs αφού τα νερά αυτά έρχονται από το νοτιοανατολικό Αιγαίο Πέλαγος). Μετά από τα 200 m βάθος η κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs παρουσιάζει σχεδόν σταθερή τιμή από 4.5 έως 5.0 Bq/m^3 λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες των μετρήσεών μας. Η κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs ακολουθεί τις κατακόρυφες κατανομές της αλατότητας και θερμοκρασίας επιβεβαιώνοντας έτσι την ομοιομορφία των θαλασσιών μαζών στα μεγάλα βάθη.

Οι τιμές του ^{137}Cs της εργασίας αυτής (περίοδος Απριλίου 2008) είναι σε καλή συμφωνία με μετρήσεις που έγιναν στο Βόρειο Αιγαίο το Δεκέμβριο 2005 [EVA 09]. Οι υψηλές τιμές του ^{137}Cs στη Μαύρη Θάλασσα οφείλονται στην έκλυση των εδαφών από τα μεγάλα Ρωσικά ποτάμια, Δνείπερος, Δνείστερος και Δον, καθώς και του Δούναβη. Στη διαδρομή τους προς το Αιγαίο τα νερά της Μαύρης Θάλασσας μεταφέρουν τις συγκεντρώσεις που εναποτέθηκαν από το ατύχημα του Chernobyl στο επιφανειακό στρώμα του Β. Αιγαίου [EVA 09].

Για τη λεπτομερή μελέτη της κατανομής του ^{137}Cs στο επιφανειακό στρώμα θα έπρεπε ίσως να γίνεται καλύτερη δειγματοληψία ίσως ανά 5m. Συνοπτικά στη βαθιά λεκάνη της Βόρειας Λήμνου (Βόρειο Αιγαίο) παρατηρήθηκε η έντονη αλληλεπίδραση των νερών της Μαύρης Θάλασσας με τα επιφανειακά νερά της λεκάνης με αποτέλεσμα τα νερά αυτά να έχουν τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις αλατότητας και θερμοκρασίας. Αυτή η συνεισφορά από τη Μαύρη Θάλασσα επιβεβαιώνεται και από τις τιμές της ενεργότητας του ^{137}Cs στην περιοχή της Βόρειας Λήμνου, οι οποίες ήταν διπλάσιες σε σχέση με τις τιμές στη περιοχή του Άθω του Βορείου Αιγαίου [TSA 06]. Οι χαμηλές τιμές αλατότητας και θερμοκρασίας οφείλονται στη αλληλεπίδραση των δύο θαλασσιών οικοσυστημάτων (Μαύρη Θάλασσα και Αιγαίο Πέλαγος). Στη ουσία επιφανειακά νερά από τη Μαύρη Θάλασσα εισβάλουν στην επιφάνεια του Βορείου Αιγαίου.



Σχήμα 5.2: Κατακόρυφη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ¹³⁷Cs για τη βαθιά λεκάνη Α1 (εαρινή περίοδος)

β) Σταθμός A2 (Εξοδος Δαρδανελίων)

Ο σταθμός A2 είναι ρηχός (μέγιστο βάθος δειγματοληψίας 90m) και βρίσκεται απέναντι από το στόμιο των Δαρδανελίων. Οι παρατηρήσεις στο σταθμό A2 παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3. Όπως και στο σταθμό A1 η περιοχή αυτή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον διότι υποδέχεται πρώτη τα φρέσκα νερά από τη Μαύρη Θάλασσα.

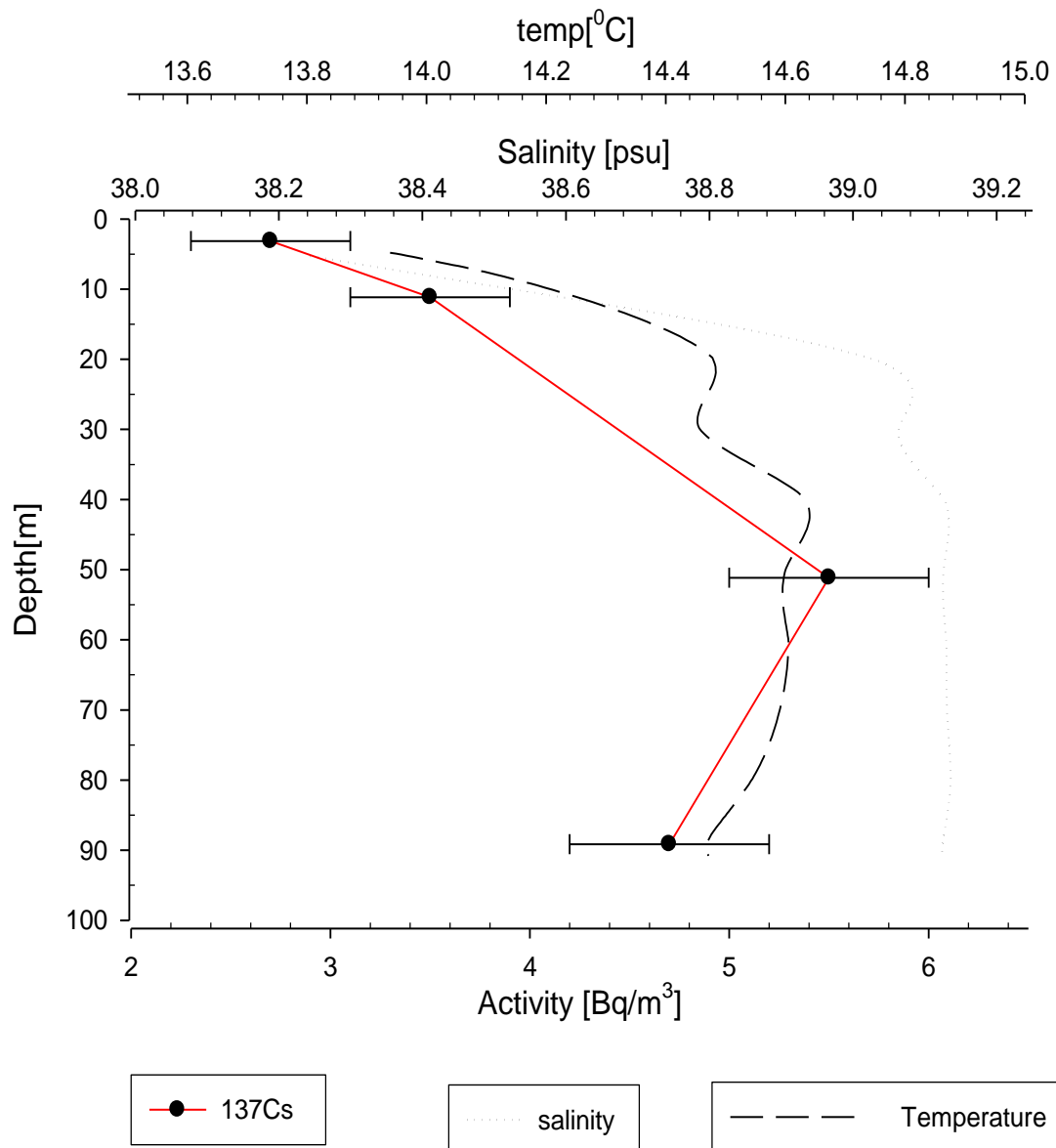
Οι κατανομές της αλατότητας και της θερμοκρασίας υποδεικνύουν ότι το επιφανειακό στρώμα μέχρι 20m (εκεί που τελειώνει το θερμοκλινές και το αλοκλινές) έχει τις χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας και αλατότητας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα βάθη. Μετά τα 20m βάθους, οι κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας και αλατότητας κυμαίνονται γύρω από το ζεύγος τιμών 14.5 °C και 39.1 psu, αντίστοιχα και παραμένουν σχεδόν σταθερές για όλο το βάθος, εκτός από μία μικρή διακύμανση στα 30m λόγω των ενδιάμεσων νερών από τη λεκάνη της Λεβαντίνης. Στα επιφανειακά νερά η αλατότητα και η θερμοκρασία παρουσιάζουν σχετικά υψηλές τιμές σε σχέση με το σταθμό A1, γεγονός που υποδεικνύει ότι ένα πολύ μικρό ποσοστό των νερών αυτών αναμειγνύονται με τα νερά της Μαύρης Θάλασσας. Η αλατότητα και η θερμοκρασία παρουσιάζουν πολύ μικρές διακυμάνσεις μετά τα 50m γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η στήλη νερού μετά τα 50m είναι περίπου της ίδιας πυκνότητας. Η γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας (13.8-14.8 °C) παρατηρείται μόνο για τα πρώτα 20 m και επιβεβαιώνει το μικρότερο ποσοστό των νερών του Μαρμαρά που αναμειγνύονται με τα νερά του Βορείου Αιγαίου.

Όσον αφορά λοιπόν την ενεργότητα του ¹³⁷Cs, παρατηρούμε (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3) μία έντονη αύξησή της από τα επιφανειακά νερά ($3.0 \pm 0.5 \text{ Bq/m}^3$), στα 50m περίπου όπου και παρατηρήθηκε η μέγιστη τιμή ($5.5 \pm 1.5 \text{ Bq/m}^3$). Μετά από τα 50 m βάθος η κατακόρυφη κατανομή του ¹³⁷Cs μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν σταθερή ($4.5 - 5.0 \text{ Bq/m}^3$) μέσα στην αβεβαιότητα των μετρήσεων. Δηλαδή στα υπόλοιπα βάθη ακολουθεί τις κατανομές της αλατότητας και θερμοκρασίας και παρουσιάζει μία ομοιομορφία μέσα στο περιθώριο των αβεβαιοτήτων. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις ¹³⁷Cs στα επιφανειακά νερά υποδεικνύουν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των νερών αυτών δεν είναι από τη Μαύρη Θάλασσα. Αντίστοιχα, τα νερά μετά τα 50m έχουν τα χαρακτηριστικά των νερών του Βόρειου Αιγαίου.

Ο σταθμός A2 βρίσκεται απέναντι από το στόμιο των Δαρδανελίων αλλά δεν δέχεται την περίοδο της δειγματοληψίας τα φρέσκα νερά της Μαύρης Θάλασσας που εισβάλλουν στο Αιγαίο. Ο σταθμός βρίσκεται στο θερμόαλο μέτωπο που χωρίζει τα νερά της Μαύρης Θάλασσας από τα νερά (θερμά και υψηλής αλατότητας) που έρχονται στην περιοχή από το νοτιοανατολικό Αιγαίο.

Επειδή τα επιφανειακά νερά του σταθμού είναι μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ νερών που έρχονται από το νότο και νερών της Μαύρης Θάλασσας η ενεργότητα του ¹³⁷Cs ήταν χαμηλή σε σχέση με τις τιμές που πρέπει να εμφανίζει το Βόρειο Αιγαίο. Όσον αφορά τις υψηλότερες συγκεντρώσεις ¹³⁷Cs μετά τα 50m σε σχέση με τα επιφανειακά νερά της λεκάνης αποδεικνύουν ότι οι θαλάσσιες αυτές μάζες αποτελούν νερά του Βορείου Αιγαίου.

Τέλος, όσον αφορά τα θέματα ραδιοπροστασίας στη συγκεκριμένη περιοχή τα επίπεδα ραδιενέργειας λόγω ενεργότητας ¹³⁷Cs είναι κάτω των επικίνδυνων επιπέδων για τον άνθρωπο και συμφωνούν με προηγούμενες μετρήσεις που έχουν παρατηρηθεί πρόσφατα στην έξοδο των Δαρδανελίων ($< 10 \text{ Bq/m}^3$, [EVA 10]).



Σχήμα 5.3: Κατακόρυφη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ^{137}Cs για την έξοδο των Δαρδανελίων (A2) (εαρινή περίοδος)

γ) Σταθμός NA1 (Βορειανατολική Λήμνος)

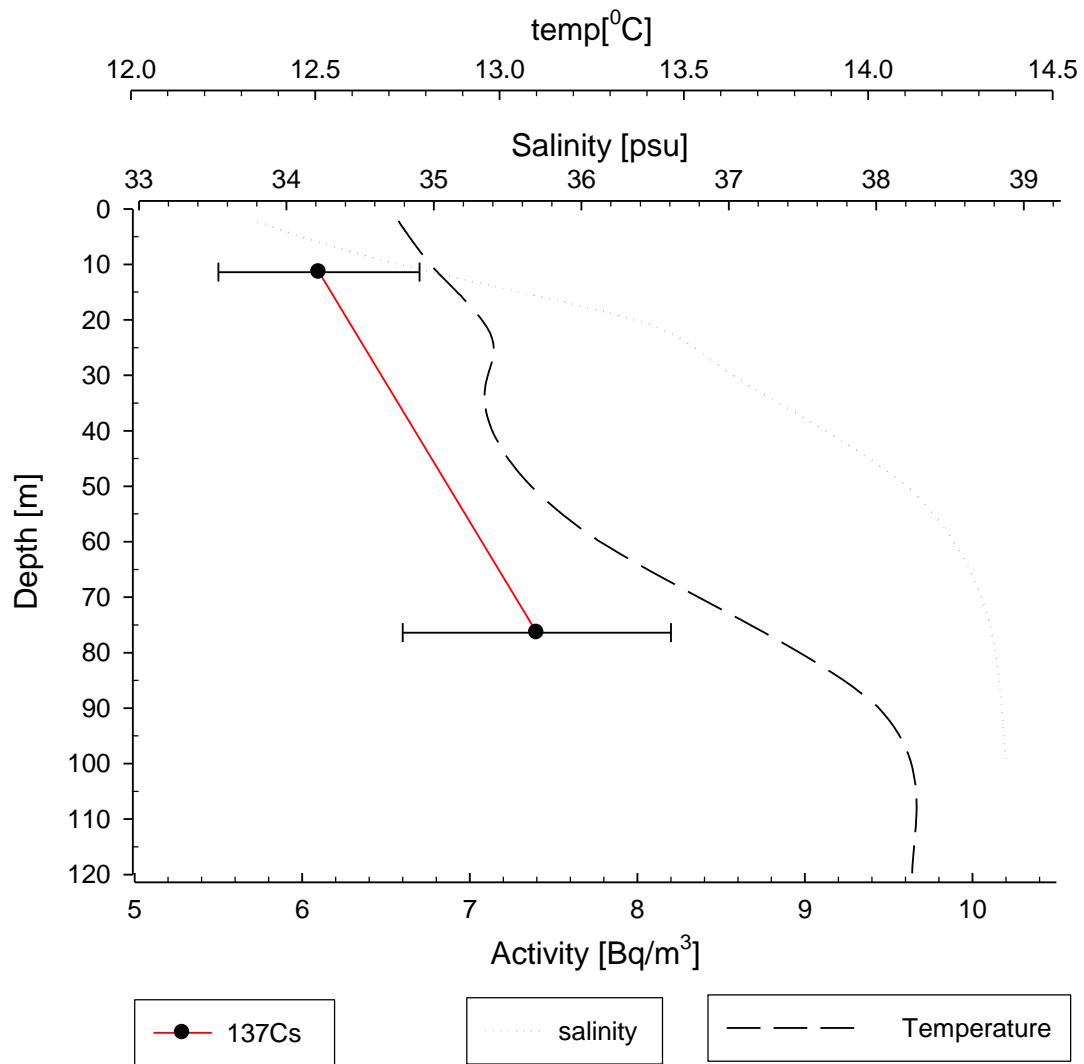
Ο σταθμός NA1 είναι σχετικά μικρού βάθους (120m βάθος δειγματοληψίας) βρίσκεται στο νότιο όριο της Τάφρου του Β. Αιγαίου βόρεια της Λήμνου. Στο Σχήμα 5.4. παρουσιάζονται οι μετρήσεις θερμοκρασίας, αλατότητας και ενεργότητας ^{137}Cs σε συνάρτηση με το βάθος.

Όπως και στο σταθμό A1 (βλ. Σχήμα 5.2) η περιοχή αυτή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της εισβολής των νερών της Μαύρης θάλασσας στο Βόρειο Αιγαίο.

Οι κατακόρυφες κατανομές της αλατότητας και της θερμοκρασίας αυξάνουν γραμμικά από την επιφάνεια μέχρι τα 20m παρουσιάζοντας τις ελάχιστες τιμές στα επιφανειακά νερά (0 m). Μετά τα 10m βάθους το προφίλ της αλατότητας έχει τη μέγιστη τιμή 39 psu περίπου στα 70m και παραμένει σταθερό για τα υπόλοιπα βάθη (>70m). Στα νερά της περιοχής αυτής (μέχρι 20m) το αλοκλινές και το θερμοκλινές δείχνουν σε πρώτο στάδιο έντονη ανάμειξη των νερών του Βορείου Αιγαίου με τα νερά από τη Μαύρη Θάλασσα. Κάτι παρόμοιο έδειξε και το γειτονικό σημείο της λεκάνης A1 στην περιοχή βόρεια της Λήμνου.

Πιο συγκεκριμένα στο διάγραμμα της θερμοκρασίας παρατηρούμε μία γραμμική αύξηση μέχρι τα 20 m, με αρχική θερμοκρασία 12.7°C (στην επιφάνεια). Στη συνέχεια μέχρι τα 40m η θερμοκρασία είναι σχεδόν σταθερή (13.0°C) όπου και αυξάνει μέχρι τα 80 m γραμμικά με μέγιστη τιμή 14°C . Στα πιο βαθιά νερά (>80 m) η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Η αλατότητα και η θερμοκρασία δεν παρουσιάζουν διακυμάνσεις μετά τα 90m πράγμα το οποίο μας δείχνει ότι η στήλη νερού μετά τα 90m είναι περίπου της ίδιας πυκνότητας. Οι μεταβολές που παρατηρούνται στα βάθη 20-80m οφείλονται στην ανάμειξη των επιφανειακών νερών με εκείνα των μεγαλύτερων βαθών (>80m). Οι χαμηλές τιμές της θερμοκρασίας εξηγούνται από το γεγονός ότι οι μετρήσεις έγιναν την Άνοιξη, όπου το λιώσιμο των χιονών και η μεταφορά των ψυχρών νερών μέσω των ποταμών σε συνδυασμό με τις χαμηλές θερμοκρασίες τις περιόδου αυτής, καθιστούν τα επιφανειακά νερά της Μαύρης Θάλασσας κρύα, δηλαδή χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Όσον αφορά την ενεργότητα του ^{137}Cs παρατηρούμε (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4) μία ελάχιστη τιμή στα επιφανειακά νερά ($6.0 \pm 0.5 \text{ Bq/m}^3$) αναμενόμενη με βάση τα παραπάνω. Η μέγιστη τιμή ($7.4 \pm 0.5 \text{ Bq/m}^3$) που παρατηρείται στα 75m μπορεί να θεωρηθεί λόγω ανάμειξης με νερά από τη Μαύρη Θάλασσα που έχουν αναμειχθεί με τα νερά του Βορείου Αιγαίου (όπως δόθηκε η ερμηνεία για το σταθμό A1). Τα δεδομένα αυτά είναι συναφή με αυτά της λεκάνης A1 τόσο στα επιφανειακά (~10 m) όσο και στα ενδιάμεσα βάθη (έως 90m, μέσα στο πλαίσιο που μας επιτρέπουν τα σφάλματα). Τόσο οι τιμές του ^{137}Cs όσο και οι κατακόρυφες κατανομές της αλατότητας και θερμοκρασίας αναδεικνύουν την ανάμειξη μεταξύ των νερών του Βορείου Αιγαίου με τα νερά της Μαύρης Θάλασσας στην περιοχή μελέτης.



Σχήμα 5.4: Κατακόρυφη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ¹³⁷Cs για τη Βορειοανατολική Λήμνο (NA1) (εαρινή περίοδος)

δ) Σταθμός NA8 (βορειοδυτικά της Σαμοθράκης)

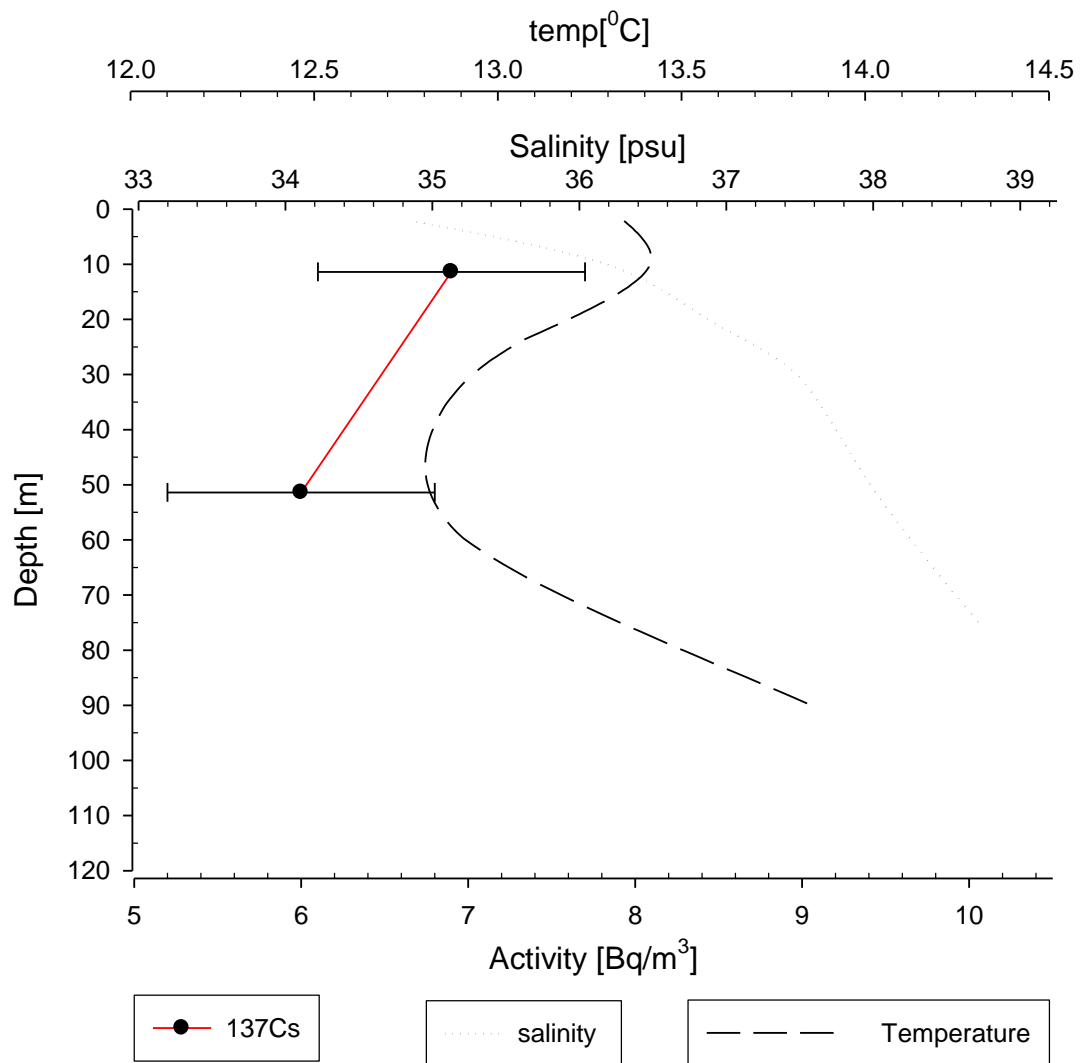
Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι μετρήσεις θερμοκρασίας αλατότητας και ενεργότητας του ^{137}Cs στο σταθμό NA8 βορειοδυτικά της Σαμοθράκης.

Η κατακόρυφη κατανομή της αλατότητας υποδεικνύει ότι το επιφανειακό στρώμα της θάλασσας (μέχρι 5m) έχει τις χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα βάθη. Μετά τα 5m βάθους το προφίλ της αλατότητας παρουσιάζει δύο περιοχές γραμμικής αύξησης συναρτήσει του βάθους. Στην πρώτη περιοχή 5-35m η αλατότητα κυμαίνεται από 34.8 έως 37.4psu, ενώ στη δεύτερη περιοχή 35-95m η γραμμική αύξηση είναι πιο απότομη με τιμές από 37.4 έως 39.0 psu.

Στο διάγραμμα της θερμοκρασίας παρατηρούμε ένα τοπικό μέγιστο 13.4°C στα 10m και μείωση της θερμοκρασίας (από 13.4 σε 12.9°C) στα βάθη από 10-30m. Για τα επόμενα μέτρα 30-50m η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή με τιμή 12.8°C , και μετά αυξάνεται γραμμικά από 12.8 έως 13.8°C για βάθη μεγαλύτερα από 50m. Πιο εμφανής είναι η δεύτερη γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας (50-90m) η οποία ακολουθεί την ίδια κατανομή με εκείνη της αλατότητας.

Όσον αφορά την ενεργότητα του ^{137}Cs μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη κατανομή μέσα στο περιθώριο των αβεβαιοτήτων με μέση τιμή $6.5 \pm 0.5 \text{ Bq/m}^3$. Η τιμή αυτή συμφωνεί αρκετά με μετρήσεις που έχουν γίνει στην περιοχή [EVA 09] καθώς και με τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής για τους σταθμούς A1 και NA1.

Συνοπτικά στην περιοχή βορειοδυτικά της Σαμοθράκης (Βόρειο Αιγαίο) παρατηρήθηκε η έντονη επίδραση των νερών της Μαύρης Θάλασσας, όπως παρατηρήθηκε και για τους σταθμούς A1 και NA1. Τέλος, όσον αφορά θέματα ραδιοπροστασίας στη συγκεκριμένη περιοχή τα επίπεδα ραδιενέργειας λόγω ^{137}Cs είναι κάτω των επικίνδυνων επιπέδων για τον άνθρωπο, και συμφωνούν με προηγούμενες μετρήσεις που έχουν παρατηρηθεί πρόσφατα στην έξοδο των Δαρδανελίων ($< 10 \text{ Bq/m}^3$, [EVA 10]).



Σχήμα 5.5: Κατακόρυφη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ¹³⁷Cs για την περιοχή βορειοδυτικά της Σαμοθράκης (NA8) (εαρινή περίοδος)

ε) Σταθμός Α10 (Βόρεια Κρήτη)

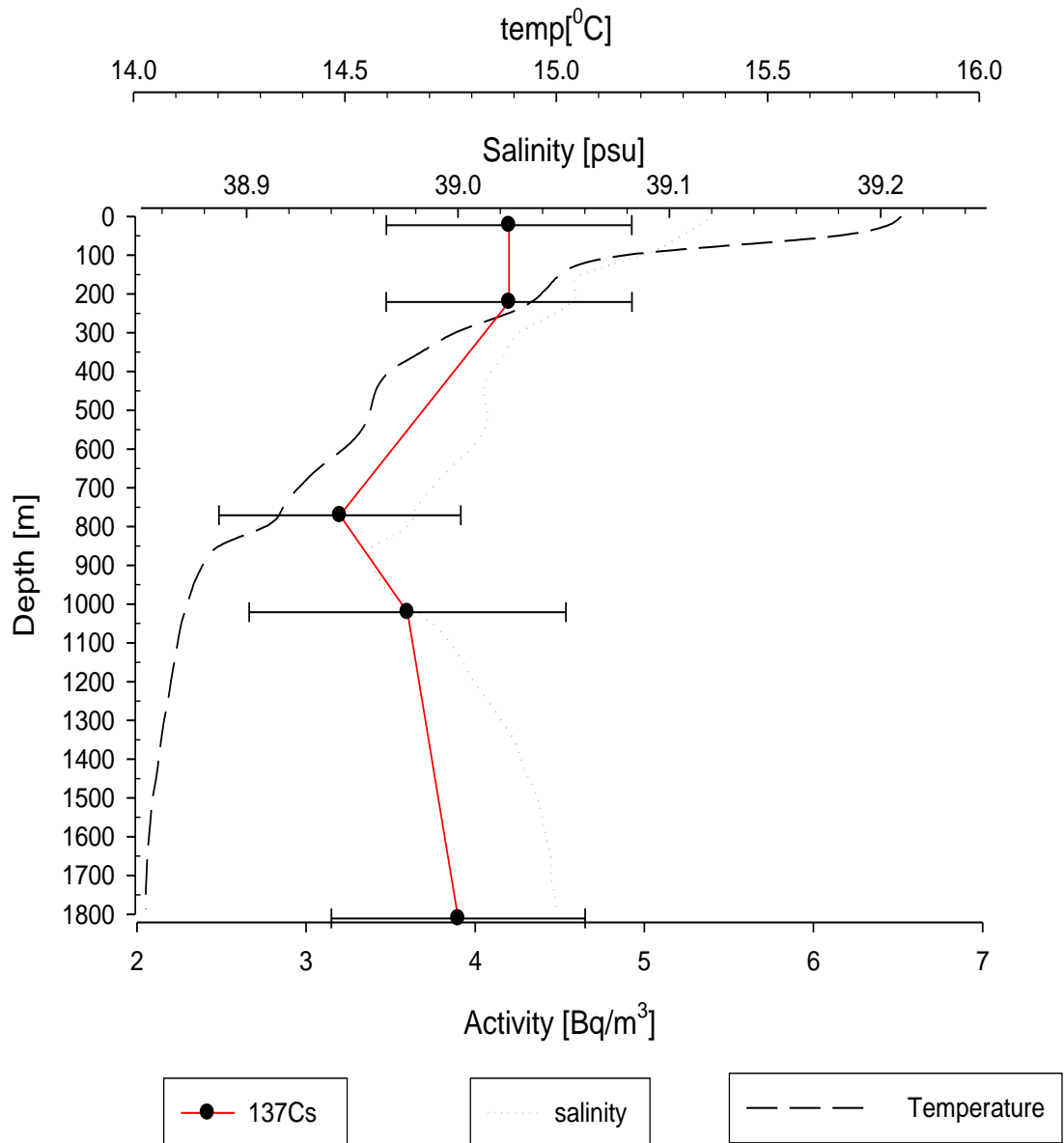
Τα αποτελέσματα από την ανάλυση των δειγμάτων που συλλέχθηκαν από τη βαθιά λεκάνη του Κρητικού Πελάγους (σταθμός Α10) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6. Στο σχήμα δίνονται όλα τα δεδομένα που αφορούν στο σταθμό Α10, δηλαδή η ενεργότητα του ^{137}Cs , η θερμοκρασία και η αλατότητα συναρτήσει του βάθους. Η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει ενδιαφέρον για τους ωκεανογράφους λόγω της εισόδου θαλασσιών μαζών από τη Μεσόγειο προς το Κρητικό Πέλαγος μέσω των στενών του Κρητικού Τόξου (Στενά Κυθήρων και Αντικυθήρων στα Δυτικά και Στενά Κάσου, Καρπάθου και Ρόδου στα Ανατολικά).

Οι κατακόρυφες κατανομές της αλατότητας και της θερμοκρασίας υποδεικνύουν ότι το επιφανειακό στρώμα θαλάσσιας μάζας (μέχρι 20m) έχει τις υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας και αλατότητας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα βάθη. Μετά τα 20m βάθους και μέχρι τα 150 m, η θερμοκρασία μειώνεται γραμμικά λαμβάνοντας τιμές από 15.8 έως 15.0 °C και η περιοχή αυτή αντιστοιχεί στο στρώμα του θερμοκλινούς. Το αλοκλινές ξεκινάει από την επιφάνεια με τιμή 39.15 psu και παρουσιάζει μία πιο απότομη μείωση σε σχέση με τη θερμοκρασία μέχρι την τιμή 39.06 psu. Στα 200 m περίπου ταυτοποιείται η θαλάσσια μάζα που την ονομάζουμε Ενδιάμεσο Νερό της Λεβαντίνης, με θερμοκρασία 15.5 °C και αλατότητας 39.1psu [PAP 99]. Από τα 200m έως τα 800m η μείωση της θερμοκρασίας και της αλατότητας είναι κατά 0.8 °C και 0.1 psu, αντίστοιχα και εξηγείται λόγω της ανάμειξης των νερών στο ανώτερο στρώμα κατά τη χειμερινή περίοδο. Στα 800m η αλατότητα γίνεται ελάχιστη 38.98 psu λόγω αλληλεπίδρασης με τα νερά της Μεσογείου που περνάνε μέσω των στενών των Αντικυθήρων (Transient Mediterranean Water).

Στα επιφανειακά νερά η αλατότητα παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή δεδομένου ότι η περιοχή δέχεται νερά από την λεκάνη της Λεβαντίνης που χαρακτηρίζονται από υψηλές θερμοκρασίες και αλατότητες.

Όσον αφορά την ενεργότητα του ^{137}Cs παρατηρούμε (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6) μία έντονη μείωσή της από τα επιφανειακά νερά (4.0 ± 1.0) Bq/m³, στα 800m περίπου όπου και παρατηρήθηκε η ελάχιστη τιμή (3.0 ± 1.0) Bq/m³. Μετά από τα 800 m βάθος η κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs μπορεί να θεωρηθεί ότι παρουσιάζει σχεδόν σταθερή τιμή ($\sim 4.0 - 4.5$ Bq/m³) αν λάβουμε υπόψη την αβεβαιότητα της μέτρησής.

Συνοπτικά στη βαθιά λεκάνη του Κρητικού Πελάγους παρατηρήθηκε η αλληλεπίδραση των νερών της λεκάνης της Λεβαντίνης με τα ενδιάμεσα ($\sim 200\text{m}$) νερά. Στα 800m διακρίνονται νερά από τη Μεσόγειο, όπου παρατηρούνται οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις αλατότητας και ενεργότητας του ^{137}Cs . Τέλος, όσο αφορά σε θέματα ραδιοπροστασίας στη συγκεκριμένη περιοχή τα επίπεδα ραδιενέργειας λόγω ^{137}Cs είναι σε αναμενόμενα χαμηλά επίπεδα ($2.5-4.0$ Bq/m³) όπως έχει παρατηρηθεί από προηγούμενες μετρήσεις στην περιοχή [PAP 99].



Σχήμα 5.6: Κατακόρυφη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ^{137}Cs για τη βαθιά λεκάνη A10 (εαρινή περίοδος)

5.3.2 2^η περίοδος δειγματοληψίας (Καλοκαίρι 2008)

α) Σταθμός A10 (Κρητικό Πέλαγος)

Στο Σχήμα 5.7. παρουσιάζονται οι κατανομές της θερμοκρασίας, της αλατότητας και της ενεργότητας. Ο σταθμός αυτός μελετήθηκε και για την εαρινή περίοδο.

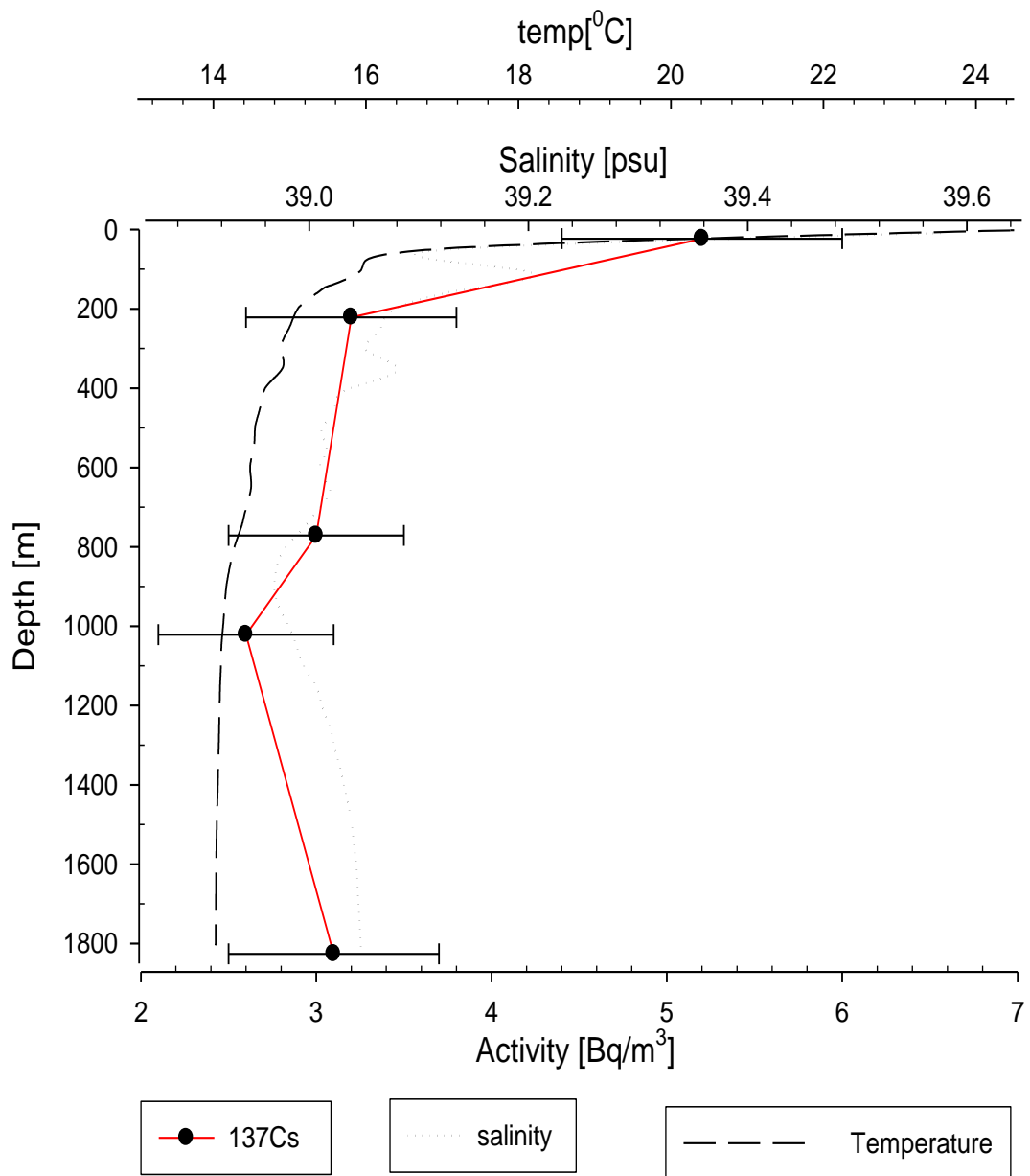
Το επιφανειακό στρώμα (μέχρι 10m) έχει τις υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας (>24.2°C) και αλατότητας (>39.6psu) σε σύγκριση με υποκείμενα στρώματα. Η θερμοκρασία παρουσιάζει μέγιστη τιμή στα επιφανειακά νερά της τάξης των 24.2°C (10 °C παραπάνω από τις λεκάνες του Β. Αιγαίου). Αυτή η διαφορά είναι αναμενόμενη μιας και τα δείγματα της προηγούμενης λεκάνης είχαν ληφθεί την άνοιξη (Απρίλιος 2008) και αυτής το καλοκαίρι (Αύγουστος 2008). Στα 5-100 m παρατηρούμε το θερμοκλινές, το οποίο λαμβάνει τιμές από 23.0 έως 16.0 °C. Γύρω στα 200 m παρατηρούμε τα χαρακτηριστικά των νερών της Λεβαντίνης, δηλαδή θερμοκρασίας 15.5 °C και αλατότητας 39.1psu [PAP 99], τα οποία επιβεβαιώνονται και από τις μικρές διακυμάνσεις της αλατότητας στα 200m. Ύστερα από τις μικρές διακυμάνσεις που παρουσιάζει η θερμοκρασία στα 200m, μειώνεται κατά 1.2 °C στο τμήμα 400-800m και παίρνει μία ελάχιστη σταθερή τιμή 14.0°C για τα βάθη 800-1800m. Οι θερμοκρασίες στα βαθιά νερά της περιοχής του Κρητικού Πελάγους κυμαίνονται γύρω από αυτή την τιμή (14.0°C). Στα επιφανειακά νερά η αλατότητα παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή αφού επηρεάζεται από τα θερμά και υψηλής αλατότητας νερά που εισβάλλουν από την Λεβαντίνη στο Κρητικό. Το διάγραμμα της αλατότητας παρουσιάζει μέγιστη τιμή 39.60 psu περίπου για τα επιφανειακά (0-5m) και ελάχιστη τιμή 39.00 psu.

Το αλοκλινές αναπτύσσεται στα 50-100 μέτρα και εμφανίζει τιμές από 39.60 έως 39.08psu. Η διακυμάνσεις περί το ελάχιστο της αλατότητας στην περιοχή μεταξύ 100m και 200m, οφείλεται στην παρουσία υποεπιφανειακού στρώματος νερού από το Β.Ατλαντικό (MNAW-modified North Atlantic Water). Επιπροσθέτως, το τοπικό μέγιστο της τιμής της αλατότητας 400m με τιμή 39.08 psu μαρτυρά την αλληλεπίδραση των νερών της λεκάνης με νερά από τη Λεβαντίνη. Από τα 200m έως τα 1800m η μείωση της αλατότητας είναι κατά 0.8 psu, ενώ στα 800m η αλατότητα γίνεται ελάχιστη με τιμή 39.0 psu. Η ελάχιστη αυτή τιμή εξηγείται από τα νερά της Μεσογείου που περνάνε μέσω των στενών των Αντικυθήρων (Transient Mediterranean Water).

Όσον αφορά την ενεργότητα του ¹³⁷Cs παρατηρούμε (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7) μία έντονη μείωσή της από τα επιφανειακά νερά (5.5 ± 0.5) Bq/m³, στα 250 m περίπου όπου και παρατηρήθηκε η ελάχιστη τιμή (3.0 ± 1.0) Bq/m³. Μετά από τα 250 m βάθος η κατανομή του ¹³⁷Cs μπορεί να θεωρηθεί ότι παρουσιάζει σχεδόν σταθερή τιμή (~ 3.0 Bq/m³) αν λάβουμε υπόψη τα σφάλματα της μέτρησής μας και παρουσιάζει μία ομοιομορφία μέσα στο περιθώριο των σφαλμάτων.

Συνοπτικά στο Κρητικό Πέλαγος (Νότιο Αιγαίο) παρατηρήθηκε η παρουσία υποεπιφανειακού στρώματος νερού από το Βόρειο Ατλαντικό στην περιοχή 100-200m. Παράλληλα έγινε εμφανής η αλληλεπίδραση των νερών της λεκάνης της Λεβαντίνης με τα ενδιάμεσα νερά (400m) της λεκάνης με αποτέλεσμα τα νερά αυτά να έχουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις αλατότητας και θερμοκρασίας, αλλά τη χαμηλότερη ενεργότητα του ¹³⁷Cs. Στα 800 m διακρίνονται νερά από τη Μεσόγειο, όπου παρατηρούνται οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις αλατότητας και ενεργότητας του ¹³⁷Cs. Για βάθη 1000m και κάτω τα νερά εμφανίζουν σταθερή πυκνότητα μεγαλύτερη εκείνης των επιφανειακών νερών και χαρακτηριστική των νερών του Κρητικού Πελάγους.

Τέλος, όσο αφορά σε θέματα ραδιοπροστασίας στη συγκεκριμένη περιοχή τα επίπεδα ραδιενέργειας λόγω ^{137}Cs είναι σε αναμενόμενα χαμηλά επίπεδα (2.5-4.0 Bq/m³) όπως έχει παρατηρηθεί από προηγούμενες μετρήσεις στην περιοχή [ΡΑΡ 99].



Σχήμα 5.7: Κατακόρυφη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ¹³⁷Cs για τη βαθιά λεκάνη A10 (καλοκαιρινή περίοδος)

β) Σταθμός Ιονίου Πελάγους ΙΙ (στενά Αντικυθήρων)

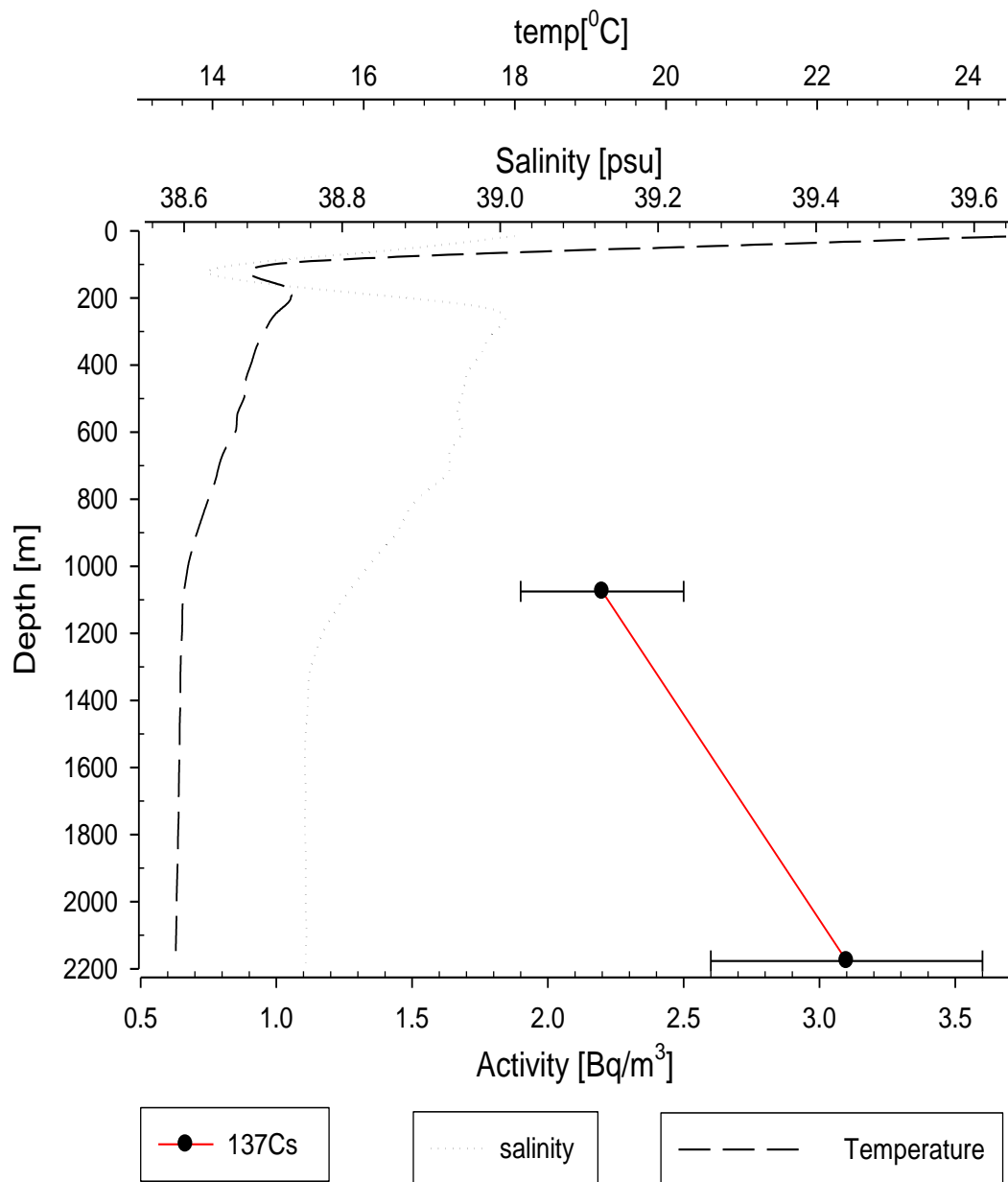
Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζονται οι κατανομές της θερμοκρασίας, της αλατότητας, και της ενεργότητας. Η περιοχή αυτή μελετήθηκε τόσο για την εκτίμηση του ^{137}Cs στο Ιόνιο Πέλαγος όσο και για πιθανή τροφοδοσία νερών από τη Μαύρη Θάλασσα στα επιφανειακά νερά.

Οι κατακόρυφες κατανομές της αλατότητας και της θερμοκρασίας υποδεικνύουν ότι το επιφανειακό στρώμα (μέχρι 5m) έχει τις υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας ($>24^{\circ}\text{C}$) και αλατότητας ($>39\text{psu}$) σε σύγκριση με τα υπόλοιπα βάθη. Το αλοκλινές στρώμα βρίσκεται στα βάθη 0-100m και λαμβάνει τιμές από 39.04 έως 38.64psu. Οι μέγιστες τιμές της αλατότητας στα 600m υποδηλώνουν την ύπαρξη ενδιάμεσων νερών από τη λεκάνη της Λεβαντίνης. Τέλος, από τα 1200m και κάτω η αλατότητα έχει σταθερή τιμή 38.74psu και αντιπροσωπεύει τα βαθιά νερά του Ιονίου Πελάγους.

Το θερμοκλινές βρίσκεται στα 0-100m με θερμοκρασίες $24.4-14.4^{\circ}\text{C}$. Για μεγαλύτερα βάθη από 1200m η θερμοκρασία παραμένει σταθερή με τιμή 13.6°C . Η κατανομή της θερμοκρασίας ακολουθεί πιστά αυτή της αλατότητας για μεγαλύτερα βάθη από 1200m υποδεικνύοντας έτσι ότι η περιοχή αυτή έχει την ίδια πυκνότητα. Αυτή η διαφορά της αλατότητας μεταξύ της επιφάνειας και των μεγάλων βαθών ($>1000\text{m}$) δηλώνει μεταβολές στις τιμές της πυκνότητας.

Όσον αφορά την ενεργότητα του ^{137}Cs (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8) μπορούμε να παρατηρήσουμε μία ομοιομορφία μέσα στα πλαίσια των αβεβαιοτήτων μόνο για τα βάθη 1100-2100m (με μέση τιμή $2.7 \pm 1.0 \text{ Bq/m}^3$). Για τα υπόλοιπα βάθη η ανάλυσή μας δεν είναι δυνατόν να μας δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα, μιας και από τις μετρήσεις προκύπτουν τιμές κάτω της ελάχιστης ανιχνευόμενης ενεργότητας ($< 1.6 \text{ Bq/m}^3$). Στο διάγραμμα της ενεργότητας οι τιμές είναι μικρότερες σε σχέση με τις άλλες λεκάνες, γεγονός αναμενόμενο μιας και βρισκόμαστε στο Ιόνιο Πέλαγος το οποίο δεν έχει επιβαρυνθεί με ραδιενέργεια όσο το Αιγαίο Πέλαγος.

Τέλος, όσον αφορά θέματα ραδιοπροστασίας στη συγκεκριμένη περιοχή τα επίπεδα ραδιενέργειας λόγω ^{137}Cs είναι σχεδόν μηδενικά ($< 0.8 \text{ Bq/m}^3$) στα επιφανειακά νερά, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ραδιενέργεια ^{137}Cs λόγω του ατυχήματος Chernobyl που επιβάρυνε το συγκεκριμένο θαλάσσιο περιβάλλον είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Οι συγκεντρώσεις στα βαθιά οφείλονται τόσο στην καθίζηση του κεσίου όσο και λόγω στην παρουσία νερών που προέρχονται από την Αδριατική.



Σχήμα 5.8: Κατακόρυφη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ¹³⁷Cs για τη βαθιά λεκάνη ΙΙ (καλοκαιρινή περίοδος)

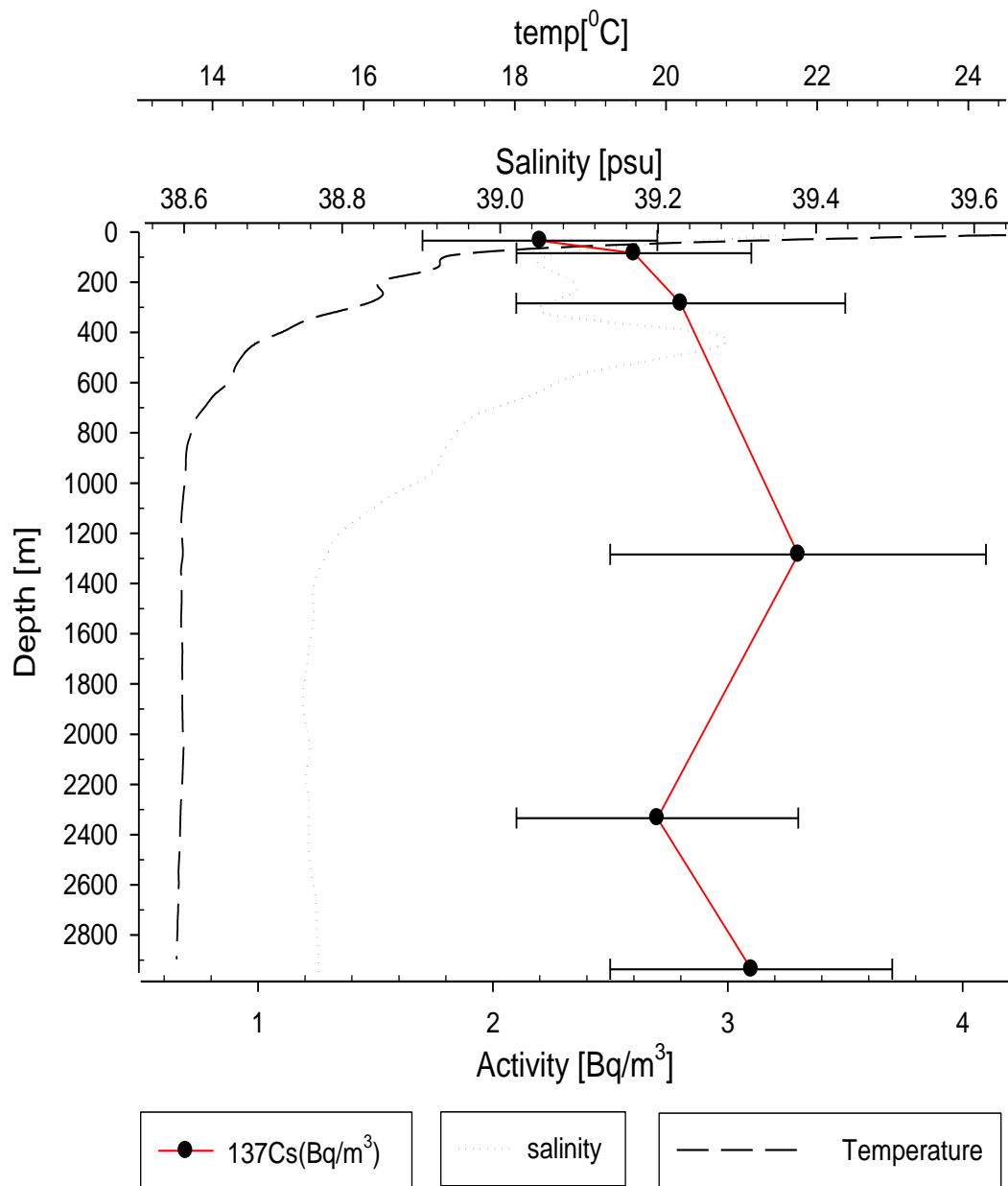
γ) Σταθμός L4 (νότια της Ιεράπετρας)

Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζονται οι κατανομές του ^{137}Cs , της θερμοκρασίας και της αλατότητας. Η περιοχή αυτή είναι ενδιαφέρουσα, μιας και βρίσκεται στο Κρητικό Τόξο.

Οι κατακόρυφες κατανομές της αλατότητας και της θερμοκρασίας υποδεικνύουν ότι το επιφανειακό στρώμα θαλάσσιας μάζας (μέχρι 10 m) έχει τις υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας ($>24.0\text{ }^{\circ}\text{C}$) και αλατότητας (39.36 psu) σε σύγκριση με τα υπόλοιπα βάθη. Το θερμοκλινές στρώμα βρίσκεται στα βάθη 0-200m με τιμές θερμοκρασίας 24.2-16.4 $^{\circ}\text{C}$. Για βάθη μεγαλύτερα των 750 m η θερμοκρασία είναι σταθερή στους 13.8 $^{\circ}\text{C}$. Παρόμοια το αλοκλινές μπορεί να προσδιοριστεί έως τα 200 m, όπου η αλατότητα λαμβάνει τιμές από 39.36 έως 39.04 psu. Οι διακυμάνσεις περί το ελάχιστο της αλατότητας στην περιοχή μεταξύ 120m και 300m, οφείλεται στην υποεπιφανειακή εμφάνιση του MNAW (modified North Atlantic Water), η οποία παρατηρείται συχνά στην περιοχή της Ιεράπετρας. Σε βάθος περίπου 500m εμφανίζονται νερά με υψηλή αλατότητα που αποτελούν ένδειξη ενδιάμεσων νερών από τη λεκάνη της Λεβαντίνης. Η κατανομή της αλατότητας ακολουθεί εκείνη της θερμοκρασίας για μεγαλύτερα βάθη από 1250m, το οποίο μας υποδεικνύει ότι έχουμε στρώμα νερού με την ίδια πυκνότητα.

Όσον αφορά την ενεργότητα του ^{137}Cs παρατηρούμε (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9) μία γραμμική αύξησή της από τα επιφανειακά νερά ($2.0 \pm 1.5\text{ Bq/m}^3$), στα 500m περίπου όπου και παρατηρήθηκε η μέγιστη τιμή $3.0 \pm 1.0\text{ Bq/m}^3$. Στο διάγραμμα της ενεργότητας οι τιμές είναι μικρότερες σε σχέση με τις άλλες λεκάνες του Αιγαίου, γεγονός αναμενόμενο μιας και βρισκόμαστε στο Λιβυκό Πέλαγος, το οποίο δεν έχει επιβαρυνθεί με ραδιενέργεια λόγω του ατυχήματος του Chernobyl. Από τα 500m και κάτω η κατανομή μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη μέσα στο περιθώριο των σφαλμάτων με μέση τιμή $3.0 \pm 1.0\text{ Bq/m}^3$.

Τέλος, όσον αφορά θέματα ραδιοπροστασίας στη συγκεκριμένη περιοχή τα επίπεδα ραδιενέργειας λόγω ^{137}Cs είναι αρκετά χαμηλά σε σύγκριση με τις τιμές του σταθμού A10 (Βόρεια Κρήτη) κυρίως επειδή στη νότια Κρήτη οι θαλάσσιες μάζες προέρχονται πλέον από άλλες πηγές και όχι άμεσα από το Αιγαίο Πέλαγος όπως είχε συμβεί τη δεκαετία του 1990. Στη λεκάνη αυτή θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι η κατακόρυφη κατανομή εμφανίζει μια μέση τιμή $\sim 3\text{ Bq/m}^3$.



Σχήμα 5.9: Κατακόρυφη κατανομή ωκεανογραφικών παραμέτρων σε σχέση με την ενεργότητα του ¹³⁷Cs για τη βαθιά λεκάνη L4 (καλοκαιρινή περίοδος)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζουμε τα επιμέρους συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε από την ανάλυση των φασμάτων και την καταγραφή των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα παρατηρήσαμε ότι οι θαλάσσιες μάζες που εκβάλλουν, μέσω των στενών των Δαρδανελίων στο Βόρειο Αιγαίο, αναμειγνύονται με τα επιφανειακά νερά του. Ακολουθώντας τη δεξιόστροφη κυκλοφορία του νερού στη συγκεκριμένη περιοχή του Αιγαίου Πελάγους οι θαλάσσιες μάζες που έρχονται από τη Μαύρη Θάλασσα στο Βόρειο Αιγαίο (μέσω του στενού του Βοσπόρου, της θάλασσας του Μαρμαρά και των Στενών των Δαρδανελίων) αποκτούν περισσότερο αλάτι και αυξάνεται η θερμοκρασία τους, παραμένοντας πάντα λιγότερο αλμυρά και ψυχρότερα από τα νερά του Αιγαίου. Τα νερά της Μαύρης Θάλασσας λόγω της χαμηλής τους αλατότητας δρουν σαν στρώμα απομόνωσης των υποκείμενων θαλασσιών μαζών στο Βόρειο Αιγαίο έτσι ώστε να μην εμφανίζονται ευκόλως γεγονότα βαθέως σχηματισμού (deep formation events). Παρ' όλα αυτά πιστεύεται ότι κάθε χειμώνα αναπτύσσονται συνθήκες τέτοιες που ευνοούν την δημιουργία ενδιάμεσων και σπανιότερα βαθιών και πυθμενικών νερών.

Στο Βόρειο Αιγαίο δεν έχουν παρατηρηθεί μετά το 2001 νέα φαινόμενα δημιουργίας βαθιών και πυθμενικών νερών, δηλαδή δεν αναπτύχθηκαν διαδικασίες μεταφοράς πυκνών νερών στον πυθμένα.

Στο Αιγαίο εμφανίζονται μάζες νερού με διαφορετική προέλευση: Νερά της Μαύρης Θάλασσας (χαμηλής αλατότητας και θερμοκρασίας), Ενδιάμεσα νερά της Λεβαντίνης (αλμυρά και θερμά), Τροποποιημένα νερά του Β. Ατλαντικού (χαρακτηρίζονται από χαμηλή αλατότητα), Βαθιά και Πυθμενικά νερά μεγάλης πυκνότητας, και τέλος Παροδικά νερά της Μεσογείου (Transient Mediterranean Water). Τα νερά αυτά μελετήθηκαν με χρήση του ιχνηθέτη ^{137}Cs .

Η ανάλυση των μετρήσεων οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι μάζες των βαθιών νερών που καλύπτουν τις βαθιές λεκάνες (>900m) του Νοτίου Αιγαίου, του Ιονίου και του Κρητικού στενού (νότια της Κρήτης) περιέχουν ίδιες ή υψηλότερες ποσότητες ^{137}Cs σε σχέση με την επιφάνεια, πάντα όμως σε χαμηλότερες τιμές (3-4 Bq/m³) από εκείνες που χαρακτηρίζουν το Βόρειο Αιγαίο (5-7 Bq/m³). Πιστεύεται ότι οι συγκεντρώσεις ^{137}Cs οφείλονται στη μεταφορά θαλασσιών μαζών από την επιφάνεια στα βαθύτερα στρώματα, λόγω της εναπόθεσης ^{137}Cs σε αυτή, εξαιτίας του ατυχήματος του Chernobyl.
- Η κύρια συνεισφορά και συνεχής πηγή σε ^{137}Cs στο Αιγαίο και ιδιαίτερα στο Βόρειο Αιγαίο (μετά το ατύχημα του Chernobyl) είναι τα νερά της Μαύρης Θάλασσας, που έρχονται μέσω των στενών των Δαρδανελίων. Η Μαύρη Θάλασσα είναι η πιο επιβαρυνόμενη θάλασσα περιοχή (σε ^{137}Cs) λόγω του ατυχήματος.
- Το καίσιο (^{137}Cs) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για να μελετηθεί η ραδιορύπανση στις Ελληνικές θάλασσες.

Μελλοντικά θεωρείται επιβεβλημένη η συνέχιση της δειγματοληψίας στους ίδιους σταθμούς, σε τακτά χρονικά διαστήματα, τόσο με δεδομένα που λαμβάνονται με τη χρήση ^{137}Cs όσο και άλλων ιχνηθετών με σκοπό την ερμηνεία των φυσικών μηχανισμών ανάμειξης των νερών στο Αιγαίο Πέλαγος, αλλά και τη διαπίστωση πιθανών αυξήσεων των συγκεντρώσεων ^{137}Cs λόγω του ατυχήματος της Fukushima. Επίσης, αν συμπεριληφθεί και η οριζόντια μεταβολή των συγκεντρώσεων των ιχνηθετών (κυρίως στα επιφανειακά νερά) θα γίνει δυνατή η σύγκριση προηγούμενων

δεδομένων αλλά και η εκτίμηση μελλοντικών συγκεντρώσεων ειδικά για το Αιγαίο Πέλαγος όπου το σήμα του ^{137}Cs είναι το εντονότερο στις Ελληνικές Θάλασσες. Τέλος, 22 χρόνια μετά από το ατύχημα του Chernobyl οι συγκεντρώσεις ^{137}Cs στο Ιόνιο Πέλαγος είναι σχεδόν μηδενικές (ειδικά στα επιφανειακά νερά) προσφέροντας ένα καθαρό θαλάσσιο περιβάλλον από πλευράς ραδιορύπανσης .

Συνοπτικά από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων προέκυψε ότι η περιεκτικότητα του ^{137}Cs στο Αιγαίο, Ιόνιο και του Κρητικού Στενού (νότια της Κρήτης) βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα με αμελητέες διακυμάνσεις. Οι μεταβολές του ^{137}Cs είναι όμως ανιχνεύσιμες συναρτήσει του βάθους (σε σχέση με αυτές των επιφανειακών νερών). Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται σε πολλούς λόγους, όπως για παράδειγμα η ύπαρξη διαφορετικών ειδών θαλασσιών μαζών, η κίνηση των θαλασσιών ρευμάτων, η κατακόρυφη μεταφορά θαλασσιών μαζών. Η συγκέντρωση ^{137}Cs που χαρακτηρίζει κάθε λεκάνη συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση για τη μεταφορά (κάθετη και οριζόντια) των θαλασσιών μαζών στο Αιγαίο Πέλαγος. Οι τιμές του ^{137}Cs στο Βόρειο Αιγαίο ήταν υψηλότερες από εκείνες στο Νότιο Αιγαίο. Επίσης, οι μέγιστες συγκεντρώσεις ^{137}Cs βρέθηκαν στη έξοδο των Δαρδανελίων σε βάθη 20-50 m λόγω της επίδρασης από τα νερά της Μαύρης Θάλασσας. Για βάθη μεγαλύτερα των 50m η κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs ήταν ομοιόμορφη με μέση τιμή $\sim 5\text{q/m}^3$. Τέλος, οι συγκεντρώσεις του ^{137}Cs ήταν χαμηλότερες στο Ιόνιο και Λιβυκό Πέλαγος σε σχέση με το Αιγαίο Πέλαγος. Όσον αφορά την κατακόρυφη κατανομή ^{137}Cs στο Κρητικό, στο Ιόνιο και στο Λιβυκό Πέλαγος, η στήλη νερού μπορεί να θεωρηθεί ομογενοποιημένη (μέσα στα πλαίσια των αβεβαιοτήτων).

Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής ανέδειξαν τη σημαντικότητα του ^{137}Cs ως ιχνηθέτη για τη μεταφορά των θαλασσιών μαζών στις Ελληνικές Θάλασσες με απώτερο σκοπό να αναπτυχθεί μελλοντικά πρότυπο εκτίμησης της συγκέντρωσης του ^{137}Cs που μπορεί να προέλθει από πυρηνικές δοκιμές ή πυρηνικά ατυχήματα. Η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί ένα πρώτο βήμα μελέτης καθώς και μία αρχική βάση δεδομένων πάνω στην οποία θα στηριχτούμε για να στοιχειοθετήσουμε περαιτέρω αναλύσεις που μέλλουν να γίνουν στην περιοχή, ιδιαιτέρως μετά το ατύχημα της Fukushima.

Εν κατακλείδι πρέπει να σημειωθεί ότι, το ατύχημα του Chernobyl και των πυρηνικών δοκιμών, πέρα από τις αρνητικές τους επιπτώσεις προσέφεραν έναν συντηρητικό ιχνηθέτη στην ωκεανογραφία. Αυτό το γεγονός μας προσέφερε τη δυνατότητα να έχουμε έναν χρήσιμο ιχνηθέτη (πέρα από ^{14}C , ^3H) για την ισοτοπική ωκεανογραφία (κατά κύριο λόγο στην περιοχή του Αιγαίου, της Θάλασσας του Μαρμαρά και της Μαύρης θάλασσας όπου είναι οι πιο επιβαρημένες περιοχές).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

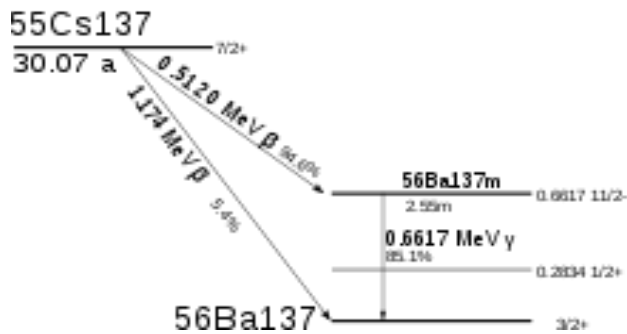
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παρακάτω παρατίθενται οι ενέργειες των σημαντικότερων ακτίνων-γ των $^{137,134}\text{Cs}$. Στην πρώτη στήλη δίδεται το όνομα του στοιχείου, στην δεύτερη η ενέργεια της ακτίνας σε keV και στην τελευταία η σχετική έντασή της ανά 100 διασπάσεις.

Element	Energy (keV)	Intensity (%)
^{137}Cs	31.82	1.99
	32.19	3.68
	36.50	1.34
^{134}Cs	661.60	85.20
	475.35	1.47
	563.23	8.38
	569.32	15.45
	604.69	97.56
	745.84	85.44
	801.93	8.73
	1167.90	1.80
1365.20	3.04	

I. Διαγράμματα διασπάσεων $^{137,134}\text{Cs}$

Παρακάτω παρατίθεται το ενεργειακό διάγραμμα αποδιέγερσης του ^{137}Cs , στο οποίο το ^{137}Cs μεταπίπτει με εκπομπή β σε μια διεγερμένη κατάσταση του ^{137}Ba στα 661.66 keV και στη συνέχεια, με εκπομπή γ της ενέργειας αυτής, στη βασική του κατάσταση.



Το ^{134}Cs χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του συντελεστή απόδοσης κατά την χημική επεξεργασία των δειγμάτων και ανιχνεύθηκε στα 36 δείγματα μαζί με το ^{137}Cs . Παρακάτω φαίνεται το ενεργειακό διάγραμμα αποδιέγερσής του.

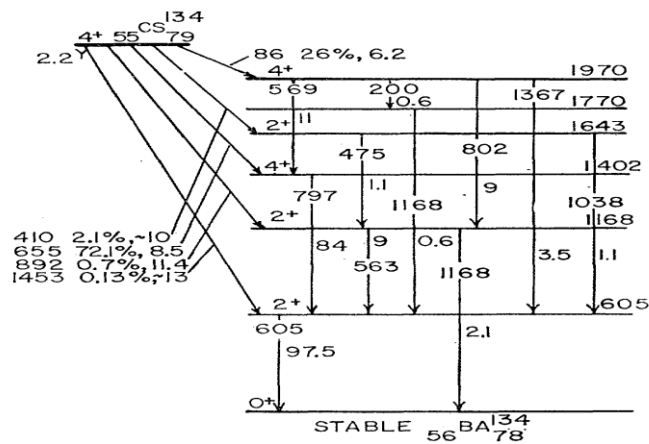
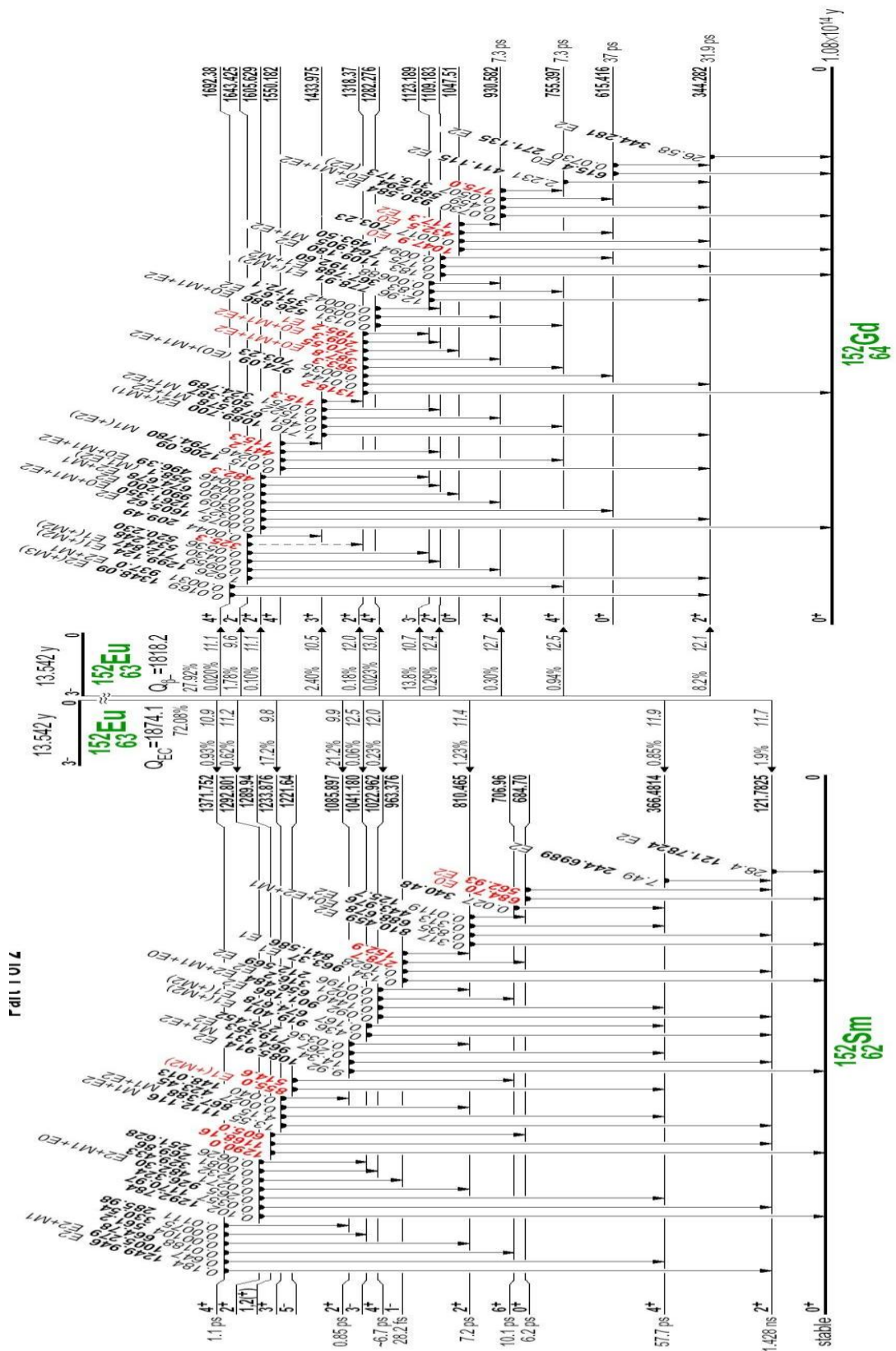


FIG. 11. Decay scheme of ^{134}Cs .

Για την ταυτοποίηση του ^{137}Cs με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας-γ χρησιμοποιείται η 661.66 KeV ακτίνα-γ, ενώ για το ^{134}Cs οι 604.7, 569.3 και 795.8 KeV που είναι και οι ισχυρότερες από το ^{134}Ba . Όπως είναι εμφανές από τα διαγράμματα.

Π. Διάγραμμα διασπάσεων ^{152}Eu σε ^{152}Sm και ^{152}Gd .



ΓΛΩΣΣΑΡΙ

Αλατότητα (salinity): Η ολική ποσότητα των αλάτων που είναι διαλυμένα σε 1Kg θαλάσσιου νερού. [ΘΕΟ 04]

Αλοκλινές (halocline): Στρώμα στο οποίο παρατηρείται απότομη κατακόρυφη μεταβολή της αλατότητας με το βάθος. [ΘΕΟ 04]

Θερμοκλινές (thermocline): Στρώμα στο οποίο παρατηρείται απότομη κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος. [ΘΕΟ 04]

Ενδιάμεσο Νερό (Intermediate Water): Το τμήμα της υδάτινης στήλης που περιέχεται μεταξύ ανώτερου και βαθιού νερού. [ΘΕΟ 04]

Θαλάσσια υδάτινη μάζα (water mass): Μία υδάτινη μάζα που έχει σε όλη της την έκταση τα ίδια θερμοαλατικά χαρακτηριστικά. Κάθε τύπος υδάτινη μάζας σχηματίζεται μέσω επιφανειακών κλιματικών διεργασιών. [ΘΕΟ 04]

Θερμοκλινές στρώμα (thermocline): Το θερμοκρασιακά στρωματοποιημένο ενδιάμεσο θαλάσσιο στρώμα που διαχωρίζει το θερμότερο και λιγότερο πυκνό ανώτερο στρώμα από το βαθύτερο ψυχρότερο και πυκνότερο. [ΘΕΟ 04]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [ΑΣΗ 02] Π.Α. Ασημακόπουλος, «Εισαγωγή στην πυρηνική φυσική», Εκδ. Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Ιωάννινα 2002
- [ΒΛΑ 03] Ρ.Ζ. Βλαστού, «Εργαστηριακές Ασκήσεις Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων», Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003
- [ΓΑΖ 02] Ε.Ν.Γαζής, «Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες», Ε. Παπασωτηρίου, Αθήνα 2002
- [DUT 70] Dutton J.W.R., «The determination of radiocaesium in sea and fresh waters», Technical Report, Fish and Radiobiology Laboratory No 6, Lowestoft, UK: Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Directorate of Fisheries Research, 1970
- [EHM & VAN 91] W.D. Ehmann & D.E. Vance, «Ραδιοχημεία και Πυρηνικές Μέθοδοι Αναλύσεως», Ελληνική Ε.: Μακεδονικές Ε, California 1991
- [ΕΙΣ & ΓΕΣ 97] Μ. Eisenbud & Τ. Gesell, «Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources», Academic Press, San Diego, 1997, pp. 134-200.
- [ELE 05] Ελευθερίου Γιώργος, Ραδιενεργός διασπορά στη λιμνοθάλασσα Butrint (Άγιοι Σαράντα, Αλβανία), Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2005
- [ELE 10] Ελευθερίου Γιώργος, «Ραδιολογική εκτίμηση υδρολογικών χαρακτηριστικών υποθαλάσσιας ανάβλυσης στη Στούπα (ΝΑ Μεσσηνία, Πελοπόννησος)», Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Αθήνα 2010
- [ΦΙΑ 09] Φίλλης-Τσιράκης Ευάγγελος, «Προσδιορισμός του ρυθμού ιζηματογένεσης στον κόλπο του Αμβρακικού με πυρηνικές μεθόδους», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2009
- [ΕΥΣ 04] Ευστρατίου Αικατερίνη, «Ραδιενεργός επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τη χρήση ορυκτών καυσίμων», Πτυχιακή εργασία του τμήματος φυσικής, Αθήνα 2004
- [EVA 09] N.Evangelidou, H.Florou, P.Bokoros, M.Scoullou, «Temporal and spatial distribution of ¹³⁷Cs in Eastern Mediterranean Sea. Horizontal and vertical dispersion in two regions», Journal of Environmental Radioactivity 100, pp. 626-636 (2009)
- [ΘΕΟ 04] Α.Θεοδώρου, «Ωκεανογραφία, Εισαγωγή στο θαλάσσιο περιβάλλον», εκδόσεις Αθ.Σταμούλη, Αθήνα 2004
- [GER 06] I.Gertman, N.Pinardi, Y.Popov, A.Hecht, «Aegean Sea water masses during the early stages of the Eastern Mediterranean Climatic Transient (1988-90)», Journal of Oceanography 36, pp. 1841-1859 (2006)
- [GIL 08] Gordon R.Gilmore, «Practical Gamma-ray Spectrometry», Nuclear Training Services Ltd, Warrington, UK, 2008, 2nd edition
- [KPH 96] Π. Κρητίδης et al., «Οι επιπτώσεις του ατυχήματος του Chernobyl στην Ελλάδα», Πρακτικά Πανελληνίου Συνεδρίου Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.- Δημόκριτος, Αθήνα 1996
- [KRI 90] P.Kritidis, H.Florou, E.Papanicolaou, «Delayed and late impact of the Chernobyl accident on the Greek environment», Radiation Protection Dosimetry 30, pp. 185-190 (1990)
- [KLE 99] B.Klein, W.Roether, B.B Manca, D.Bregant, V.Beitzel, V.Kavacevic, A.Luchetta, «The large deep water transient in the Eastern Mediterranean», Deep_Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 46, pp. 371-414 (1999)
- [KUL 09] F.Kulahci, Z.Sen, «Potential utilization of the absolute point cumulative semivariogram technique for the evaluation of distribution coefficient», Journal of Hazardous Materials 168, pp. 1387-1396 (2009)
- [LAS 93] A.Lascaratos, «Estimation of deep and intermediate water mass formation rates in the Mediterranean Sea», Deep-Sea Research II 40, pp. 327-1332 (1993)
- [LAS 99] A.Lascaratos, W.Roether, K.Nittis, B.Klein, «Recent changes in deep water formation and spreading in the Eastern Mediterranean Sea: A review», Progress in Oceanography 44, pp. 5-36 (1999)

- [LEO 87] W.R.Leo, «Techniques for Nuclear and Particle Physics, A How-to Approach», Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1987
- [MAN 04] B.Manca, M.Burca, A.Giorgetti, C.Coatonoan, M-J Garcia, A.Iona, «Physical and biochemical averaged vertical profiles in the Mediterranean regions : An important tool to trace the climatography of water masses and to validate incoming data from operational oceanography», *Journal of Marine Systems* 48, pp. 83-116 (2004)
- [ΜΠΑ 08] Μπαγατέλας Χρήστος, «Μελέτη της απόδοσης και της ελάχιστης ανιχνευόμενης ενεργότητας ραδιονουκλιδίων από ανιχνευτή NaI(Tl) στο υδάτινο περιβάλλον», Μεταπτυχιακό δίπλωμα ειδίκευσης, Αθήνα 2008
- [NIT 03] K.Nittis, A.Lascaratos, A.Theocharis, «Dense water formation in the Aegean Sea: Numerical simulations during the Eastern Mediterranean Transient», *Journal of Geophysical Research C: Oceans* 108, pp. PBE 21-1-21-15 (2003)
- [NOU 08] A.Nourredine, M.K Pham, M.Betti, P.P Povinec, M.Benmansour, R.Bojanowski, P.Bouisset, E.C.Calvo, G.J.Ham, E.Holm, M.Hult, C.Ilchmann, M.Kloster, G.Kanisch, M.Köhler, J.La Rosa, F.Legarda, M.Llauradó, J.-S.Oh, M.Pellicciari, U.Rieth, Y.Rodriguez, A.M.Baena, J.A.Sanchez-Cabeza, H.Satake, J.Schikowski, M. Takeishi, H.Thébault, Z.Varga, « A new reference material for radionuclides in the mussel sample from the Mediterranean Sea (IAEA-437)», *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 283, pp. 851-859 (2008)
- [OSV 01] I. Osvath & P.P. Povinec, «Seabed γ – ray spectrometry: applications at IAEA – MEL» *Environmental Radioactivity* 53 (2001) 335-349
- [OZS 93] E.Ozsoy, A.Hecht, U.Unluata, S.Brenner, H.I.Sur, J.Bishop, M.A.Latif, Z.Rozentraub, T.Oguz, «A synthesis of the Levantine Basin circulation and hydrography, 1985-1990», *Deep-Sea Research Part II* 40, pp. 1075-1119 (1993)
- [POV 96] P. P. Povinec et. al., «Underwater Gamma -spectrometry with HPGe and NaI(Tl) Detectors», *Applied Radiation and Isotopes Vol. 47. No 9/10* 1127-1133 (1996)
- [ROE 96] W.Roether, B.B Manca, B.Klein, D.Bregant, D.Georgopoulos, V.Beitzel, V.Kavacevic, A.Luchetta, «Present changes in Eastern Mediterranean deep waters», *Science* 271, pp. 333-335 (1996)
- [SUS 96] Sushma Gaur, «Determination of ^{137}Cs in environmental water by ion-exchange chromatography (Review)», *Journal of Chromatography A*, 733 (1996), 57-71
- [TSA 07] C.Tsabaris, G.Efetheriou, V.Kapsimalis, C.Anagnostou, R.Vlastou, C.Durmishi, M.Kedhi, C.A.Calfas, «Radioactivity levels of recent sediments in the Butrint Lagoon and the adjacent coast of Albania», *Applied Radiation and Isotopes* 65, pp. 445-453 (2007)
- [UGU 03] A. Ugur et. al., «Radiometric dating of sediment cores from a hydrothermal vent zone off Milos Island in the Aegean Sea», *The Science of the Total Environment* 307 (2003) 203- 214
- [VEL 05] D.Velaoras, A.Lascaratos, «Deep water mass characteristics and interannual variability in the North and Central Aegean Sea», *Journal of Marine Systems* 53, pp. 59-85 (2005)
- [WED 98] Wedekind et. al., «Gamma – radiation monitoring network at sea», *Applied Radiation and Isotopes* 50 (1999) 733-741
- [YOU 91] Hugh D.Young, «Σύγχρονη Φυσική», Pittsburgh, Pennsylvania, 1991
- [ZER 00] V.Zervakis, D.Georgopoulos, P.G.Drakopoulos, «The role of North Aegean in triggering the recent Eastern Mediterranean climatic changes», *Journal of Geophysical Research C: Oceans* 105, pp.26103-26116 (2000)
- [ZER 02] V.Zervakis, K.Nittis, L.Perivoliotis, C.Tziavos, «A comparison of model predictions to observations of seasonal variability and circulation in the Eastern Mediterranean», *Global Atmosphere and Ocean System* 8, pp.87-99 (2002)

[ZER 03] V.Zervakis, E.Krasakopoulou, D.Georgopoulos, E.Souvermezoglou,
«Vertical diffusion and oxygen consumption during stagnation periods in the deep
North Aegean», Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 50,
pp.53-71 (2003)