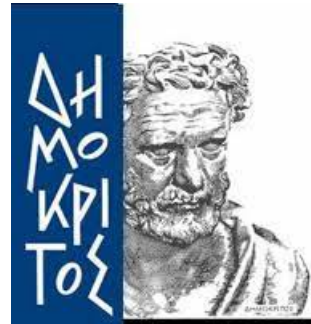




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ», ΙΠΡΕΤΕΑ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΛΑΖΑΡΑΚΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΝΟΡΜ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΓΑΜΜΑ

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:

ΖΑΝΝΗ-ΒΛΑΣΤΟΥ ΡΟΖΑ, ΟΜΟΤΙΜΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ:

ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΥ ΘΕΟΔΩΡΑ, ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ Γ' ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΖΑΝΝΗ-ΒΛΑΣΤΟΥ ΡΟΖΑ, ΟΜΟΤΙΜΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΥ ΘΕΟΔΩΡΑ, ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ Γ' ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΔΙΑΚΑΚΗ ΜΑΡΙΑ, ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο του ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος” σε συνεργασία με την Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (ΣΕΜΦΕ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Με το πέρας της μελέτης αυτής, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους στήριξαν την προσπάθεια αυτή και συνέβαλαν με κάθε τρόπο στην πραγματοποίησή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή ΕΜΠ Μιχάλη Κόκκορη, την Ομότιμη Καθηγήτρια ΕΜΠ Ρόζα Ζάννη-Βλαστού, την Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ Μαίρη Διακάκη αλλά και όλη την ομάδα Πυρηνικής Φυσικής της ΣΕΜΦΕ για το εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας που έχουν καταφέρει να δημιουργήσουν και που από την πρώτη στιγμή με εμπιστεύτηκαν και με έκαναν να νιώσω μέλος της ομάδας τους. Μέσα από την εμπειρία αυτή, είχα την ευκαιρία να έρθω σε επαφή με πολλά και ενδιαφέροντα αντικείμενα της πυρηνικής φυσικής, να ακούσω και να μάθω από τις εμπειρίες των υπολοίπων και να εμπνευστώ για τα επόμενά μου βήματα.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στη μεταδιδακτορική Ερευνήτρια του ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», Αντιγόνη Καλαμαρά και στον ερευνητή Α' του ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», Ίωνα Ε. Σταματελάτο που με καλωσόρισαν σε ένα εξαιρετικό περιβάλλον και που στήριξαν πρόθυμα ο καθένας με τον τρόπο του την προσπάθειά μου. Οι πολύτιμες συμβουλές τους και τα εύστοχά τους σχόλια βοήθησαν στην ομαλή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Θα ήθελα να ευχαριστήσω και την υπόλοιπη ομάδα του εργαστηρίου που μου παρείχαν πάντα άμεσα, τόσο επιστημονικές συμβουλές, όσο και ψυχολογική υποστήριξη.

Οφείλω επίσης, ένα τεράστιο ευχαριστώ στην μεταδιδακτορική Ερευνήτρια Μαρίλια Σάββα που, αν και η συνεργασία μας ήταν σύντομη, ήταν πολύ ουσιαστική και μεγάλης σημασίας. Ήταν εκείνη που πρώτη μου μετέδωσε πληθώρα πληροφοριών σχετικά με την ραδιενέργεια περιβάλλοντος και την φασματοσκοπία γάμμα ενώ ήταν εννέα μηνών έγκυος. Στο διάστημα που έλειψε, φρόντισε να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο στην διάθεσή μου για κάθε απορία και δυσκολία που προέκυπτε, γεγονός που εκτιμώ βαθιά.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ όλων όμως, το οφείλω στην Δώρα Βασιλοπούλου, Ερευνήτρια Γ' του ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», χωρίς την έμπρακτη βοήθεια και την υποστήριξη της οποίας αυτή η εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί. Η αφοσίωσή της, η τεχνογνωσία της και η αμεσότητά της έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην διεξαγωγή της μελέτης αυτής. Είμαι πραγματικά ευγνώμων για τον χρόνο και την προσπάθεια που επένδυσε σε μένα, ούσα πάντα διαθέσιμη να αντιμετωπίσει τις ερωτήσεις και τις ανησυχίες μου. Η εργασία υπό την επίβλεψή της ήταν μια υπέροχη εμπειρία που όχι μόνο διαμόρφωσε την ακαδημαϊκή μου εξέλιξη, αλλά και την προσωπική επίσης.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους, οικογένεια και φίλους που δεν σταμάτησαν να με στηρίζουν στην προσπάθεια αυτή. Με την δική τους συμβολή και υπομονή, αυτή η εμπειρία ήταν μοναδική.

Λαζαράκη Δέσποινα

© (2023) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία ολοκληρωμένη μελέτη υλικών που ανήκουν στην κατηγορία Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM). Η μελέτη των ραδιενεργών αυτών υλικών φυσικής προέλευσης είναι υψίστης σημασίας προκειμένου να μπορούν να διασφαλιστούν οι κατάλληλες συνθήκες και η ασφάλεια των εργαζομένων και του περιβάλλοντος σε περιοχές όπου αυτά συναντώνται. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή, μελετήθηκαν δείγματα φωσφορίτη και φωσφογύψου, τα οποία παρείχε η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) στο εργαστήριο φασματοσκοπίας γάμμα του Ινστιτούτου Πυρηνικών & Ραδιολογικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Ενέργειας & Ασφάλειας (ΙΠΡΕΤΕΑ) του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» όπου και έλαβε χώρα η εκπόνηση της εργασίας αυτής. Βασικός στόχος ήταν ο υπολογισμός της ειδικής τους ενεργότητας μέσω χρήσης φασματοσκοπίας γάμμα.

Οι μετρήσεις των δειγμάτων έγιναν με χρήση ανιχνευτή γερμανίου GEM80 που διαθέτει το εργαστήριο του ΙΠΡΕΤΕΑ. Πριν μετρηθούν τα δείγματα, υπολογίστηκε η υγρασία τους, η πυκνότητά τους και έπειτα μεταγγίστηκαν σε ειδικά δοχεία. Τα πληρωμένα δοχεία σφραγίστηκαν με ρητίνη προκειμένου να μην διαφεύγουν αέρια ισότοπα και ακολούθησε χρόνος αναμονής κάποιων εβδομάδων πριν μετρηθούν έτσι ώστε να αποκατασταθεί ισορροπία. Καθώς τα δύο δείγματα είναι μεγάλου όγκου, χρειάστηκε να εφαρμοστούν ορισμένοι συντελεστές διόρθωσης για διάφορα φαινόμενα. Συγκεκριμένα, μέσω του λογισμικού TrueCoinc υπολογίστηκαν συντελεστές για την διόρθωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και μέσω της χρήσης κώδικα MCNP υπολογίστηκαν συντελεστές για την διόρθωση της ενδοαπορρόφησης των ακτίνων γάμμα μέσα στα δείγματα.

Ταυτόχρονα, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του ανιχνευτή με πηγές αναφοράς ίδιας γεωμετρίας με αυτή των δειγμάτων και μέσω των καμπυλών που προέκυψαν υπολογίστηκαν πειραματικά οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής και τελικά, μέσω αυτών, οι τιμές της ειδικής ενεργότητας των ισότοπων. Στις τιμές αυτές έγινε αναγωγή σε κοινή ημερομηνία για πιο εύκολη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Από τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, προκύπτει το συμπέρασμα ότι, τα δύο δείγματα αποτελούνται από πολλά κοινά ισότοπα αφού ανιχνεύθηκαν τα ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, ανιχνεύθηκαν τόσο στον φωσφορίτη όσο και στον φωσφογύψο Ac-228, Bi-214, U-235, Pb-214 και Pb-212. Επιπρόσθετα, κανένα από τα δύο δείγματα δεν φαίνεται να έχει ξακάθαρα υψηλότερη ενεργότητα από το άλλο καθώς η ενεργότητα ποικίλλει από ισότοπο σε ισότοπο. Τα ευρήματα και τα αποτελέσματα αυτά, πρόκειται να συγκριθούν με εκείνα άλλων εργαστηρίων στα πλαίσια Άσκησης Σύγκρισης κατά την οποία αντίστοιχα δείγματα έχουν σταλεί για μελέτη σε εργαστήρια της Ελλάδας και του εξωτερικού.

Λέξεις Κλειδιά: υλικά NORM, φωσφορίτης, φωσφογύψος, φασματοσκοπία γάμμα, προσδιορισμός ειδικής ενεργότητας

Abstract

This diploma thesis is an integrated study of materials belonging to the category of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM). The study of these radioactive materials of natural origin is of high importance in order to ensure the appropriate conditions and safety of workers and the environment in areas where they exist. More specifically, the materials that were studied were samples of phosphate ore and phosphogypsum supplied by the Greek Atomic Energy Commission (GAEC) to the gamma spectrometry laboratory of the Institute of Nuclear & Radiological Sciences & Technology, Energy Safety (INRASTES) of the NCSR "Demokritos", where this thesis took place. The aim of the study was to calculate their specific activity by means of gamma spectroscopy.

Sample measurements were performed using the GEM80 high purity germanium detector of the lab. Before the gamma spectrometry measurements, the humidity and the density of the respective materials were calculated. The samples were prepared filling special containers that represented a typical geometry with the phosphate ore and phosphogypsum materials. The filled containers were then sealed with resin in order for gaseous isotopes not to escape and a waiting time of a few weeks followed before the measurements so that the isotopes could come to a balance. Since the two samples were of large volume, certain correction factors for different phenomena had to be applied. In particular, the factors for the correction of the phenomenon of true coincidence were calculated using the TrueCoinc software while the factors for the correction of gamma-ray absorption within the samples volume were calculated using the MCNP code.

The necessary calibration of the detector was carried out using reference sources of the same geometry as that of the samples. and through the resulting efficiency curves, the full energy peak efficiency (FEPE) values were experimentally determined. Finally, the specific activity was calculated for each isotope detected in the sample. The activity values were decay corrected to a common reference date in order to allow the comparison of the results for the two samples studied.

The results of this study show that a variety of isotopes is detected in both samples, In particular, Ac-228, Bi-214, U-235, Pb-214 and Pb-212 were detected in both the phosphate ore and the phosphogypsum samples. Moreover, it is shown that no particular trend is observed regarding the activities measured in each sample, since these vary depending on the isotope. The results of the present study will be compared against experimental values obtained by other labs in Greece and abroad, within the frame of an Intercomparison Test on NORM materials organized by GAEC.

Keywords: NORM materials, phosphate ore, phosphogypsum, gamma spectroscopy, specific activity determination

Κατάλογος Σχημάτων

1	Σειρά του (Α) ουρανίου, (Β) ακτινίου και (C) θορίου.	9
2	Τυπικοί τρόποι συσσώρευσης NORM στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου.	13
3	Βιομηχανικές δραστηριότητες στην Ελλάδα όπου συναντώνται NORM.	14
4	Πέτρωμα φωσφορίτη.	18
5	Προϊόντα φωσφορικού πετρώματος	19
6	Δείγμα φωσφογύψου.	21
7	Υλικό 1: Φωσφορίτης.	22
8	Υλικό 2: Φωσφογύψος.	22
9	Τοποθέτηση δειγμάτων σε πέτρι πριν από την ξήρανση.	23
10	Τοποθέτηση δειγμάτων στον φούρνο.	23
11	Ζύγιση του δείγματος φωσφογύψου στο μεγάλο πέτρι.	24
12	Ζύγιση του δείγματος φωσφογύψου στο μικρό πέτρι.	24
13	Γέμισμα δοχείου με φωσφορίτη.	26
14	Γέμισμα δοχείου με φωσφογύψο.	26
15	Τα δύο συστατικά της ρητίνης.	28
16	Ανάμειξη των δύο συστατικών της ρητίνης.	29
17	Εφαρμογή στρώσης ρητίνης στο δείγμα φωσφογύψου.	29
18	Τα δύο δείγματα μετά την εφαρμογή ρητίνης για να σφραγιστούν.	29
19	Ο ανιχνευτής γερμανίου με την μολύβδινη θωράκιση.	32
20	Διάταξη φασματοσκοπίας γάμμα.	33
21	Πηγή αναφοράς 1: πυκνότητα παρόμοια με του δείγματος φωσφορίτη.	37
22	Πηγή αναφοράς 2: πυκνότητα παρόμοια με του δείγματος φωσφογύψου.	37
23	Ενδεικτικό φάσμα μέτρησης της Πηγής 1.	39
24	Μέτρηση δείγματος για προσδιορισμό γραμμικού συντελεστή εξασθένησης.	44
25	Μέτρηση του δείγματος φωσφορίτη σε απόσταση 1cm από τον ανιχνευτή.	47
26	Μέτρηση του δείγματος φωσφογύψου σε απόσταση 1cm από τον ανιχνευτή.	47
27	Φάσμα από μέτρηση φωσφορίτη.	48
28	Φάσμα από μέτρηση φωσφογύψου.	48
29	Δισδιάστατη απεικόνιση της ανιχνευτικής διάταξης (κάτοψη).	52
30	Δισδιάστατη απεικόνιση της πηγής (τομή).	53
31	Δισδιάστατη απεικόνιση της υπο μελέτη γεωμετρίας, με τον όγκο του δείγματος πληρωμένο με αέρα (τομή).	54
32	Ορισμός της συνάρτησης απόδοσης κορυφής για την Πηγή 1.	57
33	Ορισμός της συνάρτησης του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση κορυφής για την Πηγή 1.	57

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1	Σκοπός	8
1.2	Δομή Εργασίας	8
2	NORM ΥΛΙΚΑ	9
2.1	Ραδιενεργές σειρές	9
2.2	Ορισμός των NORM υλικών	10
2.3	Πού συναντώνται τα υλικά NORM	11
2.4	Δραστηριότητες με NORM υλικά	14
2.4.1	Εξόρυξη μεταλλεύματος ουρανίου	14
2.4.2	Παραγωγή και χρήση του θορίου	15
2.4.3	Παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου	15
2.4.4	Επεξεργασία του νερού	15
2.4.5	Βιομηχανία του φωσφόρου	16
2.5	Τρόποι μελέτης των NORM υλικών	16
3	ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΦΩΣΦΟΡΙΤΗ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΓΥΨΟΥ	18
3.1	Φωσφορίτης	18
3.2	Φωσφογύψος	19
3.3	Υλικά δειγμάτων	22
3.4	Προετοιμασία Δειγμάτων	23
3.4.1	Υπολογισμός υγρασίας	23
3.4.2	Συσκευασία και Ζύγιση	26
3.4.3	Υπολογισμός πυκνότητας	27
3.5	Σφράγισμα δειγμάτων με ρητίνη	27
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	30
4.1	Φασματοσκοπία ακτίνων γάμμα	30
4.1.1	Αλληλεπίδραση ακτίνων γάμμα με την ύλη	30
4.1.2	Λειτουργία ανιχνευτών Γερμανίου	31
4.1.3	Διάταξη φασματοσκοπίας γάμμα	32
4.2	Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής	33
4.3	Διορθώσεις	34
4.3.1	Νεκρός χρόνος	34
4.3.2	Ακτινοβολία υποστρώματος	35
4.3.3	Φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης	35
4.3.4	Ενδοαπορρόφηση ακτίνων γάμμα	36

4.4	Υπολογισμός ενεργότητας	36
4.5	Βαθμονόμηση του ανιχνευτή	37
4.6	Μελέτη για τον προσδιορισμό του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης	44
4.7	Μετρήσεις δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου	47
4.8	Μέτρηση υποστρώματος	48
5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ MONTE CARLO	49
5.1	Τεχνική Monte Carlo	49
5.2	Ο κώδικας MCNP	50
5.3	Μοντελοποίηση	51
5.3.1	Μοντελοποίηση του ανιχνευτή GEM80	51
5.3.2	Μοντελοποίηση δειγμάτων και πηγών αναφοράς	52
5.4	Προσομοιώσεις	54
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	56
6.1	Συντελεστές διόρθωσης φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης	56
6.2	Συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της ενδοαπορρόφησης	57
6.3	Ενεργότητες ισοτόπων	62
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	64
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	68

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός

Τα φυσικά ραδιενεργά υλικά (Naturally Occuring Radioactive Materials NORM) αποτελούν εδώ και πολλά χρόνια αντικείμενο ενδιαφέροντος και έρευνας λόγω της παρουσίας τους σε διάφορους φυσικούς πόρους και βιομηχανικές διαδικασίες. Το ενδιαφέρον για τα φυσικά ραδιενεργά υλικά πηγάζει από την ανάγκη κατανόησης της συμπεριφοράς τους, των πιθανών κινδύνων και του αντίκτυπου στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Η γνώση αυτή συμβάλλει στην ανάπτυξη μέτρων ασφαλείας, κανονιστικών πλαισίων και βέλτιστων πρακτικών για τη διαχείριση των υλικών αυτών με υπεύθυνο και βιώσιμο τρόπο.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη δύο δειγμάτων που υπάγονται στην κατηγορία των NORM. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για φωσφορίτη και φωσφογύψο, δύο υλικά που παράγονται σε βιομηχανικές περιοχές σχετικές με την εξόρυξη και την επεξεργασία του φωσφόρου. Βασικός στόχος της εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός της ενεργότητας αυτών των δύο άγνωστων δειγμάτων, μία διαδικασία που κρίνεται τεράστιας σημασίας για την ασφαλή λειτουργία των χώρων αυτών.

Στην εργασία δίνονται αναλυτικές πληροφορίες για τα δείγματα, οι πειραματικές μετρήσεις και οι προσομοιώσεις που χρειάστηκε να γίνουν με σκοπό τον προσδιορισμό της ενεργότητάς τους αλλά και τα συμπεράσματα στα οποία όλα αυτά οδήγησαν.

1.2 Δομή Εργασίας

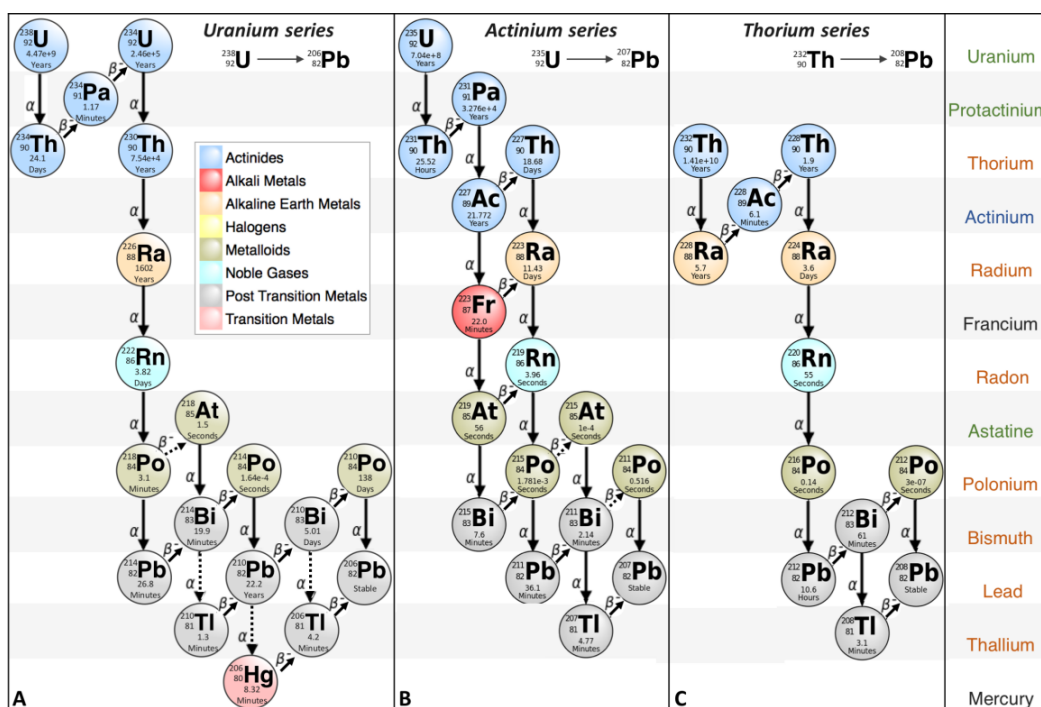
Η παρούσα εργασία είναι χωρισμένη σε 7 Κεφάλαια. Αρχικά παρουσιάζεται ο γενικότερος σκοπός της εργασίας (Κεφάλαιο 1), ακολουθεί η ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου των φυσικά ραδιενεργών υλικών με έμφαση στη βιομηχανία του φωσφόρου (Κεφάλαιο 2) και των τρόπων με τους οποίους τέτοια υλικά μελετώνται. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά τα δύο δείγματα που αποτελούν το αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής αυτής εργασίας καθώς και η προετοιμασία από την οποία πέρασαν πριν κριθούν έτοιμα για να μετρηθούν (Κεφάλαιο 3). Στο επόμενο Κεφάλαιο ακολουθεί η πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό των ενεργοτήτων, τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή, καθώς και τον υπολογισμό του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης (Κεφάλαιο 4) περιγράφοντας πλήρως όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν. Στη συνέχεια, το Κεφάλαιο 5 αφορά την επεξήγηση των προσομοιώσεων με κώδικα Monte Carlo που χρειάστηκε να γίνουν για τον υπολογισμό των συντελεστών για την διόρθωση των φαινομένων της πραγματικής σύμπτωσης και της ενδοαπορρόφησης ακτίνων γάμμα. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων αυτών των διαδικασιών, ενώ η εργασία ολοκληρώνεται με τα τελικά συμπεράσματα και τις προοπτικές της συγκεκριμένης μελέτης για το μέλλον (Κεφάλαιο 7). Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία και τα Παραρτήματα στα οποία φαίνονται συμπληρωματικές πληροφορίες για την εργασία αυτή.

2 NORM ΥΛΙΚΑ

2.1 Ραδιενεργές σειρές

Η επίγεια ακτινοβολία προέρχεται από τα αρχέγονα ραδιενεργά στοιχεία, που βγαίνουν από τον φλοιό και τον μανδύα της Γης καθώς και από τα ραδιενεργά προϊόντα διάσπασής τους. Τα αρχέγονα ραδιονουκλίδια έχουν χρόνο ημιζωής συγκρίσιμο με την ηλικία της γης και είναι τα K-40, U-235, U-238 και Th-232.

Αυτά τα ραδιονουκλίδια είναι μακρόβια, γεγονός που σημαίνει ότι εξακολουθούν να υπάρχουν σε μετρήσιμες ποσότητες μέχρι και σήμερα. Τα U-238 και Th-232 και τα προϊόντα από τη διάσπασή τους δημιουργούν τις πιο σημαντικές ραδιενεργές αλυσίδες, αυτές του ουρανίου και του θορίου αντίστοιχα. Υπάρχει επίσης μια άλλη ραδιενεργή αλυσίδα, η σειρά του ακτινίου με μητρικό ισότοπο το U-235. Αυτή η σειρά είναι λιγότερο κυρίαρχη επειδή το U-235 αποτελεί το 0,72% του φυσικού ουρανίου (Σχήμα 1). Όλες αυτές οι σειρές αφορούν την σχάση βαρέων, ραδιενεργών στοιχείων σε ελαφρύτερα, πιο σταθερά στοιχεία μέσω μιας σειράς διασπάσεων άλφα και βήτα [1].



Σχήμα 1: Σειρά του (A) ουρανίου, (B) ακτινίου και (C) θορίου.[2]

Πιο συγκεκριμένα, η ραδιενεργή σειρά του ουρανίου, γνωστή και ως η σειρά του ουρανίου, είναι μια ακολουθία διεργασιών ραδιενεργών διασπάσεων που αρχίζουν με φυσικό ουράνιο. Το φυσικό ουράνιο αποτελείται κυρίως από δύο ισότοπα, U-238 και U-235, που είναι και τα δύο ραδιενεργά. Η σειρά του ουρανίου αρχίζει με τη διάσπαση του U-238 και τελειώνει με τη δημιουργία σταθερού μολύβδου (Pb-206), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1. Η σειρά του ουρανίου περιλαμβάνει συνολικά 14 ραδιενεργά

ισότοπα, καθένα από τα οποία οδηγεί σε διαφορετικό στοιχείο μέσω μιας σειράς εκπομπής σωματιδίων άλφα και βήτα. Το πρώτο βήμα στη σειρά του ουρανίου είναι η αποδιέγερση του U-238 σε Th-234 μέσω της διάσπασης άλφα. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σειρά από άλφα και βήτα διασπάσεις για την παραγωγή μετασταθούς πρωτακτινίου (Pa-234m), η οποία τελικά οδηγεί σε U-234. Το U-234, μέσω αντίδρασης άλφα, παράγει Th-230, το οποίο «συμμετέχει» εκ νέου σε αντίδραση άλφα και βήτα για την παραγωγή Ra-226. Το Ra-226 τότε υποπίπτει σε διάσπαση άλφα για να παράγει Rn-222, το οποίο είναι φυσικό αέριο. Η σχάση του Rn-222 παράγει μια σειρά από ισότοπα βραχείας διάρκειας, τα οποία αποσυντίθενται ταχέως σε σταθερό μόλυβδο (Pb-206) μέσω σειράς αντιδράσεων άλφα και βήτα. Ολόκληρη η σειρά διάσπασης χρειάζεται εκατομμύρια χρόνια για να ολοκληρωθεί. Η σειρά του ουρανίου έχει σημαντικές εφαρμογές στον τομέα της περιβαλλοντικής επιστήμης, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ηλικίας των βράχων και των ορυκτών, καθώς και για τη μελέτη της μετανάστευσης των υπόγειων υδάτων και τη μεταφορά ρύπων στο περιβάλλον.

Στην συνέχεια, όσον αφορά στη σειρά του θορίου, αυτή ξεκινά από Th-232 και τελειώνει με Pb-208. Η ραδιοσειρά του θορίου αποτελείται από 14 διαφορετικά ισότοπα, καθένα από τα οποία αποσυντίθεται μέσω αποδιεγέρσεων άλφα και βήτα έως ότου φθάσει στο σταθερό ισότοπο μόλυβδου. Ανάμεσα στα 14 ισότοπα αυτά, εμφανίζονται τα Ra-228, Rn-220, Bi-212 κ.ά. Το Th-232 είναι ένα υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πυρηνικό καύσιμο σε ορισμένους τύπους πυρηνικών αντιδραστήρων. Χρησιμοποιείται επίσης σε ορισμένους τύπους μανών αερίου και ράβδων συγκόλλησης. Τα προϊόντα διάσπασης του θορίου, συμπεριλαμβανομένου του ραδίου και του ραδονίου, είναι σημαντικά στη γεωλογία και σε περιβαλλοντικές μελέτες.

Η σειρά του ακτινίου, που πήρε το όνομά της χάρη στο πρώτο στοιχείο της που ανακαλύφθηκε, το Ac-228, ξεκινά με U-235 και τελειώνει με Pb-207. Η σειρά αυτή αποτελείται από 15 στοιχεία μερικά εκ των οποίων είναι τα Ac-231, Ra-223, Rn-219, Ac-227 κ.ά. Τα στοιχεία της σειράς αυτής έχουν σχετικά μικρό χρόνο ημιζωής συγκριτικά με αυτά των άλλων δύο ραδιενεργών σειρών.

2.2 Ορισμός των NORM υλικών

Ο όρος NORM αναφέρεται σε περιβαλλοντικά υλικά φυσικής προέλευσης, τα ραδιενεργά επίπεδα των οποίων είναι αυξημένα σε σχέση με την ραδιενέργεια περιβάλλοντος. Σύμφωνα με το Γλωσσάρι Ασφαλείας του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας [3], το ακρωνύμιο NORM αναλύεται ως "Naturally Occurring Radioactive Materials" και ο ορισμός που δίνεται είναι ο εξής: «Ραδιενεργά υλικά που δεν περιέχουν σημαντικές ποσότητες ραδιονουκλιδίων εκτός των φυσικών ραδιονουκλιδίων».

- Ο ακριβής ορισμός των «σημαντικών ποσών» θα είναι μια κανονιστική απόφαση.
- Υλικά στα οποία οι ενεργότητες των φυσικά απαντώμενων ραδιονουκλιδίων που περιλαμβάνονται στα φυσικά απαντώμενα ραδιενεργά υλικά (NORM) έχουν αλλάξει εξαιτίας διεργασιών επεξεργασίας.

Κατά την περίοδο σχηματισμού της Γης, υπήρχαν πολλοί τύποι φυσικών ραδιονουκλιδίων. Αυτά τα ραδιονουκλίδια επαναλαμβάνουν τη διαδικασία ραδιενεργού διάσπασης, απελευθερώνοντας μια ποικιλία τύπων ακτινοβολίας έως ότου καταλήξουν σε σταθερά νουκλίδια που σταματούν να εκπέμπουν ακτινοβολία. Ωστόσο, η ταχύτητα της μεταβολής για κάθε ραδιονουκλίδιο διαφέρει, και μερικά ραδιονουκλίδια που φθίνουν αργά παραμένουν ακόμη και τώρα, 4,6 δισεκατομμύρια χρόνια μετά τη γέννηση της Γης. Επομένως, όλοι οι φυσικοί πόροι όπως το έδαφος, το πέτρωμα, το μέταλλευμα, ο άνθρακας και το πετρέλαιο που υπάρχουν στη Γη σήμερα περιλαμβάνουν φυσικά ραδιονουκλίδια. Οι συγκεντρώσεις τους διαφέρουν ανάλογα με τις περιοχές ή τα υλικά [1].

Παρόλο που οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων που συναντώνται σε φυσικά πετρώματα και στο έδαφος είναι γενικά χαμηλές, υπάρχουν ορισμένα ορυκτά με υψηλότερη ραδιενέργεια και κατά την εξόρυξη και τη φυσική ή χημική διεργασία αυτών, τα ραδιονουκλίδια τους μπορούν να καταναμηθούν σε διάφορα υλικά, όπως μεταλλεύματα, πετρώματα, προϊόντα, υποπροϊόντα ή υπολείμματα.

Τα υλικά σαν αυτά που περιγράφηκαν παραπάνω ονομάζονται Τεχνολογικά Ενισχυμένα Φυσικά Ραδιενεργά Υλικά (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials TENORM) και ορίζονται ως, «Φυσικά ραδιενεργά υλικά που έχουν συγκεντρωθεί ή εκτεθεί στο προσβάσιμο περιβάλλον ως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων όπως η κατασκευή, η εξόρυξη ορυκτών ή η επεξεργασία νερού» [4]. Παρόλα αυτά, ο ορισμός αυτός δεν χρησιμοποιείται πια.

Ο όρος «Τεχνολογικά Ενισχυμένα» σημαίνει ότι οι ραδιολογικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες του ραδιενεργού υλικού έχουν τροποποιηθεί περαιτέρω έχοντας υποστεί επεξεργασία, ή βελτιστοποίηση κατά τρόπο που αυξάνει την πιθανότητα έκθεσης του ανθρώπου ή/και του περιβάλλοντος.

2.3 Πού συναντώνται τα υλικά NORM

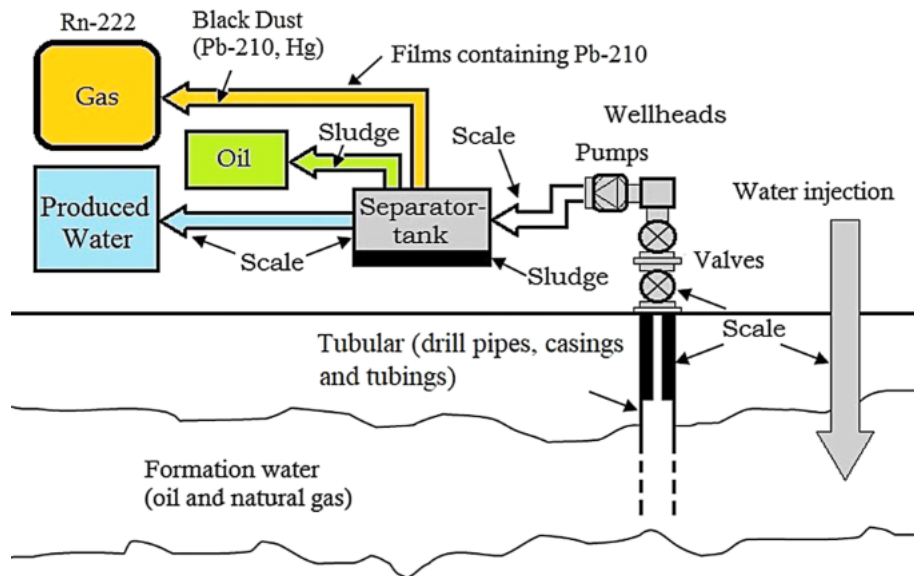
Τα φυσικά ραδιενεργά υλικά συναντώνται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Απαντώνται στις εργασίες έρευνας, ανάπτυξης και παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου και προέρχονται από υποεπιφανειακούς σχηματισμούς πετρωμάτων, οι οποίοι περιέχουν ραδιενεργά υλικά, όπως ουράνιο, θόριο και θυγατρικά τους ισότοπα ραδίου, σε υψηλές συγκεντρώσεις. Κατά την παραγωγή και την επεξεργασία του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, αυτά τα ραδιενεργά υλικά συχνά μεταφέρονται στην επιφάνεια μαζί με το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο και συσσωρεύονται σε διάφορους εξοπλισμούς, όπως σωλήνες, δεξαμενές και διαχωριστές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της κλίμακας της NORM, της ιλύος ή άλλων αποβλήτων, τα οποία μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τους εργαζομένους και το περιβάλλον, εάν δεν αντιμετωπιστούν σωστά. Επιπλέον, διαδικασίες όπως ο καθαρισμός υδάτων, η παραγωγή φωσφορικού οξέος, λιπασμάτων, πυρίμαχων ή οικοδομικών υλικών περιλαμβάνουν υλικά NORM [1].

Στον Πίνακα 1 παρατίθενται μερικά NORM υλικά και πού αυτά συναντώνται στη βιομηχανία παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου, ενώ στο Σχήμα 2 απεικονίζεται το στάδιο επεξεργασίας που

συναντάται το κάθε ισότοπο σε μία τέτοια βιομηχανία.

Τύπος Υλικού	Ραδιονουκλίδια	Εμφάνιση
Νιφάδες Ραδίου	Ra-226, Ra-228, Ra-224 και θυγατρικά	Υγρά μέρη της παραγωγής, Εγκαταστάσεις
Ιλύες Ραδίου	Ra-226, Ra-228, Ra-224 και θυγατρικά	Διαχωριστές, δεξαμενές ξαφρίσματος
Κοιτάσματα Μολύβδου	Pb-210 και θυγατρικά	Υγρά μέρη παραγωγής αερίου
Μεμβράνες Μολύβδου	Pb-210 και θυγατρικά	Επεξεργασία και Μεταφορά αερίου και πετρελαίου
Μεμβράνες Πολωνίου	Po-210	Εγκαταστάσεις επεξεργασίας πυκνωμάτων
Συμπυκνώματα	Po-210	Παραγωγή αερίου
Φυσικό αέριο	Rn-222, Pb-210, Po-210	Τομέας καταναλωτών, Συστήματα επεξεργασίας και μεταφοράς αερίου
Παραγόμενο νερό	Ra-226, Ra-228, Ra-224 και/ή Pb-210	Εγκαταστάσεις παραγωγής

Πίνακας 1: NORM υλικά στην παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου. [5]



Σχήμα 2: Τυπικοί τρόποι συσσώρευσης NORM στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. [6]

Οι εργαζόμενοι στους τομείς που προαναφέρθηκαν, θεωρούνται άμεσα εκτιθέμενοι σε ραδιενέργεια λόγω της ενασχόλησής τους με NORM υλικά. Η έκθεσή τους αυτή μπορεί να είναι τόσο εξωτερική, όσο και εσωτερική, δηλαδή μέσω της κατάποσης ή της εισπνοής αέριων ραδιονουκλιδίων ή σκόνης, αερολύματος κ.ά. Η μέση ετήσια δόση ραδιενέργειας για τους επαγγελματικά εκτιθέμενους θα πρέπει να παραμένει μικρότερη από 3mSv [7] και οι εργαζόμενοι στον τομέα της εξόρυξης, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, της παραγωγής φωσφορικών λιπασμάτων, της άλεσης ζιρκονίου και των βιομηχανιών μεταποίησης τιτανίου θα πρέπει να ελέγχονται λόγω της έκθεσής τους σε NORM υλικά.

Επιπρόσθετα, αυτά τα φυσικά ραδιονουκλιδία έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον, καθώς επηρεάζουν την ποιότητα του φυσικού περιβάλλοντος, αλλά και το κοινό μέσω διαφόρων οδών έκθεσης για παρατεταμένο χρονικό διάστημα. Οι περιπτώσεις έκθεσης που προκαλούν σημαντικές περιβαλλοντικές ανησυχίες είναι η ύπαρξη πολύ μεγάλων ποσοτήτων στερεών αποβλήτων που έχουν εναποτεθεί απευθείας στο περιβάλλον, η απελευθέρωση μολυσμένων υδάτων σε υδατικά συστήματα και η απελευθέρωση μολυσμένου αέρα ή σκόνης στην ατμόσφαιρα [1].

Το ευρύ κοινό μπορεί να εκτεθεί σε αυτά τα υλικά, ιδιαίτερα κατά τη συντήρηση, τη μεταφορά αποβλήτων και μολυσμένου εξοπλισμού, την απολύμανση του εξοπλισμού, την επεξεργασία και τη διάθεση των αποβλήτων. Έκθεση παρόμοιου χαρακτήρα μπορεί επίσης να προκύψει κατά την αποξήλωση των εγκαταστάσεων παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου και των συναφών εγκαταστάσεων διαχείρισης αποβλήτων [5]. Παρόλα αυτά, η ετήσια δόση που λαμβάνει το μέσο κοινό δεν φαίνεται να ξεπερνά τα 900μSv [1].

2.4 Δραστηριότητες με NORM υλικά

Υπάρχουν ορισμένες δραστηριότητες που, σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency IAEA) [3], θα πρέπει να υπόκεινται σε κανονιστικό έλεγχο προκειμένου να εξασφαλίζεται η μέγιστη ασφάλεια των εργαζομένων και του περιβάλλοντος. Κάποιες από αυτές τις δραστηριότητες είναι η εξόρυξη και η επεξεργασία μεταλλευμάτων ουρανίου, η παραγωγή και χρήση θορίου και των ενώσεών του, η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, η επεξεργασία του νερού, η βιομηχανία του φωσφόρου, η οποία ενδιαφέρει και την παρούσα εργασία. Στο Σχήμα 3 φαίνεται σε ποιες περιοχές της Ελλάδας συναντώνται κάποιες από τις δραστηριότητες αυτές.



Σχήμα 3: Βιομηχανικές δραστηριότητες στην Ελλάδα όπου συναντώνται NORM.[1]

2.4.1 Εξόρυξη μεταλλεύματος ουρανίου

Παρόλο που οι διαδικασίες εξόρυξης και επεξεργασίας των μεταλλευμάτων ουρανίου αντιμετωπίζονται ως μία δραστηριότητα που αφορά τον τομέα των καυσίμων και όχι αυτόν των περιβαλλοντικά ραδιενεργών υλικών, τα υπολείμματα των διαδικασιών αυτών μπορούν να χαρακτηριστούν ως NORM. Τα υπολείμματα προκύπτουν από το επιφανειακό έδαφος από τους ανοιχτούς λάκκους και το μη εκμεταλλεύσιμο μέταλλο χαμηλής ποιότητας που παρουσιάζει σημαντική δημόσια έκθεση. Έχουν σημαντικά επίπεδα ραδιενέργειας και αποτίθενται σε μεγάλες ποσότητες, συνήθως, κοντά στην εγκατάσταση. Πλέον, η ελάχιστη παραγωγή τους επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της επιτόπιας απόπλυσης που γίνεται ολόενα και πιο δημοφιλής. Η μέση ετήσια δόση που λαμβάνουν οι εργαζόμενοι λόγω εξόρυξης μεταλλευμάτων ουρανίου είναι 7.8 mSv με το μέγιστο να είναι περίπου 40-45 mSv [8].

2.4.2 Παραγωγή και χρήση του θορίου

Το θόριο, καθώς επίσης και διάφορα παράγωγά του, χρησιμοποιείται σε διάφορα προϊόντα προσφέροντάς τους συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Παραδείγματα τέτοιων προϊόντων είναι οι κινητήρες αεριοθούμενων, οι εκκινητήρες λαμπτήρων, τα φώτα διαδρόμου των αερολιμένων, οι ανιχνευτές ακτινοβολίας και τα στοιχεία των κυψελών καυσίμου. Το θόριο εκχυλίζεται χημικώς από ορυκτά με υψηλές συγκεντρώσεις οξειδίου του θορίου και μετά τη συγκέντρωση, τα ορυκτά χωνεύονται με νιτρικό οξύ για την επίτευξη νιτρικού θορίου για την παραγωγή ενώσεων θορίου. Τα προϊόντα, τα παραπροϊόντα και τα απόβλητα, περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις θορίου (ή Ra-228) και αποτελούν υψηλό κίνδυνο εσωτερικής και εξωτερικής ακτινοβολήσης για τους εργαζομένους μέσω της εισπνοής σκόνης και θορίου.

2.4.3 Παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου

Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο προέρχονται από την κατανομή της οργανικής ύλης σε καθίζηση και πολλές φορές παγιδεύονται σε δομές των οποίων η μορφολογία και το σχήμα το ευνοούν. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας βρίσκονται στα θραύσματα και τα NORM μπορεί να εμφανιστούν με τη μορφή νιφάδων, λάσπης, μεμβρανών, νερού σχηματισμού και μολυσμένων εδαφών από τις απορρίψεις νερού που εκχυλίζεται για την έγχυση του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Ενώ μερικές ενώσεις του ραδίου και τα προϊόντα αυτών είναι διαλυτές και βρίσκονται σε αυξημένες συγκεντρώσεις στα περιβαλλοντικά ραδιενεργά υλικά, αντίθετα, οι περισσότερες ενώσεις του ουρανίου και του θορίου δεν είναι διαλυτές και έτσι παραμένουν στις δομές έπειτα από την εξόρυξη.

Διαδικασίες	Μέση ετήσια δόση(mSv)
Υπεράκτια παραγωγή	0.5
Παραγωγή στην ξηρά	0.05
Διαχωρισμός φυσικού αερίου	0.02
Παραγωγή αιθυλενίου και πολυαιθυλενίου από φυσικό αέριο	1.6
Καθαρισμός σωληνών	3

Πίνακας 2: Δόσεις των εργαζομένων στην βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. [1]

Οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των υλικών που απαντώνται σε τέτοιες περιπτώσεις κυμαίνονται από 1 kBq/kg έως 40 MBq/kg. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2, κατά τη διάρκεια της παραγωγής η μέγιστη ετήσια δόση (effective dose) είναι σχετικά χαμηλή. Ωστόσο, σε συγκεκριμένες διαδικασίες οι δόσεις είναι πολύ υψηλές και απαιτείται κατάλληλος εξοπλισμός.

2.4.4 Επεξεργασία του νερού

Το νερό που προορίζεται για οικιακή χρήση προέρχεται από λίμνες, ποταμούς και «φυσικές δεξα-

μενές» και πριν κριθεί κατάλληλο, υποβάλλεται σε επεξεργασία. Η διαδικασία αυτή αφαιρεί συνήθως τα φυσικά ραδιονουκλίδια που συσσωρεύονται σε ρητίνες και φίλτρα ανταλλαγής ιόντων. Οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των αποβλήτων είναι σχετικά χαμηλές, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να υπερβαίνουν τα 10 Bq/gr [1,3]. Η διάθεση των αποβλήτων της διαδικασίας αυτής μπορεί επίσης να περιέχει βαρέα μέταλλα, οπότε κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος αυτών.

2.4.5 Βιομηχανία του φωσφόρου

Η βιομηχανία φωσφόρου είναι ένας σημαντικός τομέας που περιλαμβάνει την εξόρυξη φωσφορίτη και την επεξεργασία φωσφορικών πετρωμάτων με κύριο σκοπό την παραγωγή λιπασμάτων. Τα φωσφορικά πετρώματα περιέχουν υψηλή συγκέντρωση φωσφορικών ορυκτών, τα οποία μπορούν να εξαχθούν και να υποβληθούν σε επεξεργασία για τη δημιουργία διαφόρων τύπων λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται στη γεωργία. Προκειμένου να συμβεί αυτό, ο φωσφορίτης υπόκειται σε μία χημική επεξεργασία με χρήση θειικού οξέος, ονόματι υγρή διεργασία, και από την οποία παράγεται το φωσφορικό οξύ. Μέσω της διεργασίας αυτής, παράγεται επίσης ένα μεγάλο ποσό φωσφογύψου, ένα υποπροϊόν του φωσφορίτη, που αποτίθεται κυρίως ως υπόλειμμα ή μερικές φορές χρησιμοποιείται ως οικοδομικό υλικό. Οι συγκεντρώσεις μεταλλευμάτων ραδιενέργειας στον τομέα αυτόν είναι κατά κύριο λόγο λιγότερο από 3 Bq/gr [1]. Στον Πίνακα 3 παρατίθενται οι τιμές της ετήσιας δόσης που λαμβάνουν οι εργαζόμενοι στην βιομηχανία φωσφορίτη σε διάφορες δραστηριότητες.

Διαδικασίες	Μέγιστη ετήσια δόση(mSv)
Αποθήκευση μεταλλευμάτων	0.28
Παραγωγή λιπασμάτων	0.5
Εγκαταστάσεις	2.7
Κατασκευή φωσφορικών λιπασμάτων, Διαδικασία υγρού οξέος	0.8

Πίνακας 3: Δόσεις των εργαζομένων στη βιομηχανία φωσφορίτη.[3]

Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν εκτενέστερα τα δείγματα του φωσφορίτη και του φωσφογύψου και η επεξεργασία τους, καθώς αποτελούν το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.5 Τρόποι μελέτης των NORM υλικών

Οι τρόποι με τους οποίους τα περιβαλλοντικά ραδιενεργά υλικά μελετώνται ποικίλουν και η τεχνική που κρίνεται κάθε φορά κατάλληλη εξαρτάται από το είδος του υλικού αλλά και από το ενδιαφέρον της εκάστοτε μελέτης. Οι κύριες τεχνικές είναι οι εξής:

- Φασματοσκοπία γάμμα: Η τεχνική αυτή αφορά στην μέτρηση της ενέργειας και της έντασης των ακτίνων γάμμα που εκπέμπονται από ραδιενεργά ισότοπα του υλικού NORM. Η φασματοσκοπία

γάμμα χρησιμοποιείται συνήθως για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των στοιχείων που περιέχονται στο δείγμα.

- Φασματοσκοπία άλφα: Η τεχνική αυτή μετρά την ενέργεια και την ένταση των σωματιδίων άλφα που εκπέμπονται από ραδιενεργά ισότοπα στο υλικό. Η φασματοσκοπία άλφα είναι χρήσιμη για τον προσδιορισμό και την ποσοτικοποίηση ισωτόπων που εκπέμπουν σωματίδια άλφα, όπως το ουράνιο και το θόριο.
- Φασματοσκοπία βήτα: Η τεχνική αυτή μετρά την ενέργεια και την ένταση των βήτα σωματιδίων που εκπέμπονται από ραδιενεργά ισότοπα στο υλικό NORM. Κρίνεται χρήσιμη για τον προσδιορισμό και την ποσοτικοποίηση ισωτόπων που εκπέμπουν σωματίδια βήτα.

Τα δείγματα NORM που πρόκειται να μελετηθούν με φασματοσκοπία άλφα ή βήτα, χρειάζεται να υποβληθούν σε μία διεργασία ονόματι υγρή αποτέφρωση (wet ashing). Η υγρή αποτέφρωση είναι μια τεχνική προετοιμασίας δειγμάτων που χρησιμοποιείται συνήθως για την ανάλυση δειγμάτων που περιέχουν οργανικά υλικά, όπως τα NORM υλικά. Κατά την διεργασία αυτή, τα δείγματα έρχονται σε επαφή με κάποιο συμπυκνωμένο οξύ, συνήθως νιτρικό και υπερχλωρικό, για την απομάκρυνση του οργανικού μέρους και τη μετατροπή του δείγματος σε ανόργανη και διάφανη μορφή που μπορεί να αναλυθεί με τη χρήση τεχνικών φασματοσκοπίας άλφα ή βήτα.

Αντίθετα, κατά την μελέτη δειγμάτων με φασματοσκοπία γάμμα, τα δείγματα δεν χρειάζεται να περάσουν από κάποια κατάλληλη προετοιμασία και να αλλοιωθούν με οποιοδήποτε τρόπο όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Αυτά είναι λίγα μόνο παραδείγματα των τρόπων για τη μελέτη των NORM υλικών. Συνολικά, η επιλογή της μεθόδου για τη μελέτη των υλικών NORM εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος και η συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων, η φύση του δείγματος και οι ειδικοί στόχοι της εκάστοτε έρευνας. Στην περίπτωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, τα δείγματα μελετήθηκαν με την μέθοδο της φασματοσκοπίας γάμμα, η ανάλυση της οποίας θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

3 ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΦΩΣΦΟΡΙΤΗ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΓΥΨΟΥ

3.1 Φωσφορίτης

Ο φωσφορίτης μπορεί να είναι τόσο πυριγενούς όσο και ιζηματογενούς προέλευσης. Εκείνος της ιζηματογενούς προέλευσης, που αντιπροσωπεύει το 85% του φωσφορίτη, περιέχει ουράνιο και θόριο ενώ ο πυριγενής, ο οποίος είναι ηφαιστειακής προέλευσης, περιέχει σαφώς λιγότερο ουράνιο, έχει όμως σημαντική ποσότητα θορίου, και σπάνιες γαίες.

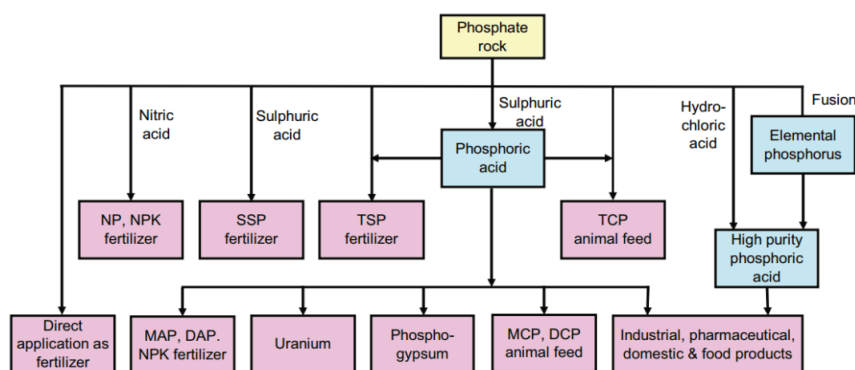
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, ο φωσφορίτης είναι ένα υλικό που προκύπτει από την εξόρυξη φωσφορικών πετρωμάτων (Σχήμα 4) και μετατρέπεται σε διάφορα εμπορικά προϊόντα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Η συντριπτική πλειοψηφία φωσφορίτη, υπόκειται στην υγρή διεργασία οξέος όπου ο φωσφορίτης αντιδρά με θειικό οξύ και σε πρώτη φάση παράγεται φωσφορικό πέτρωμα. Το 71% του παραγόμενου πετρώματος μετατρέπεται σε φωσφορικό οξύ και ταυτόχρονα παράγεται φωσφογύψος. Το 24% μεταποιείται απευθείας σε λιπάσματα παρόλο που αυτά προκύπτουν και έμμεσα από φωσφορικό οξύ, ενώ το υπόλοιπο 5% μετατρέπεται άμεσα σε διάφορα άλλα προϊόντα [1].



Σχήμα 4: Πέτρωμα φωσφορίτη.[9]

Ο φωσφορίτης χρησιμοποιείται κυρίως ως πρώτη ύλη για την παραγωγή φωσφορικών λιπασμάτων τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και των φυτών, καθώς παρέχουν τις απαραίτητες θρεπτικές ουσίες για την ανάπτυξη των φυτών, συμπεριλαμβανομένου του φωσφόρου. Εκτός από την παραγωγή λιπασμάτων, ο φωσφορίτης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές, όπως στην παραγωγή συμπληρωμάτων ζωοτροφών, προσθέτων τροφίμων και βιομηχανικών χημικών ουσιών. Τα φωσφορικά πετρώματα μπορούν επίσης να μεταποιηθούν σε φωσφορικό οξύ, το οποίο χρησιμοποιείται σε διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένων των τροφίμων και των ποτών, των απορρυπαντικών και της επεξεργασίας των υδάτων. Ακόμα, ο φωσφορίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαδικασίες επεξεργασίας νερού για την πρόληψη της συσσώρευσης άλγης και άλλων ρύπων στα συστήματα ύδρευσης αλλά και στην παραγωγή κραμάτων μετάλλων, όπως χάλυβα, για τη βελτίωση της αντοχής και της ανθεκτικότητάς τους.

Στον ιζηματογενή φωσφορίτη που αξιοποιείται σήμερα, οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων της σειράς του ουρανίου κυμαίνονται από 0.5-3.0 Bq/gr ενώ οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων της σειράς του θορίου είναι αξιοσημείωτα υψηλότερες από εκείνες που απαντώνται σε υπόλοιπα εδάφη και



Σχήμα 5: Προϊόντα φωσφορικού πετρώματος (NP: nitrogen–phosphorus–potassium; NPK: nitrogen– phosphorus–potassium; SSP: single superphosphate; TCP: tricalcium phosphate; TSP: triple superphosphate; MAP: monoammonium phosphate; DAP: diammonium phosphate; MCP: monocalcium phosphate; DAP: diammonium phosphate; MCP: monocalcium phosphate; DCP: dicalcium phosphate) [1].

πετρώματα [7]. Οι εργαζόμενοι στις εγκαταστάσεις αυτές εκτίθενται είτε εξωτερικά λόγω ακτινοβολίας γάμμα από μεγάλες ποσότητες είτε εσωτερικά με εισπνοή αερόφερτης σκόνης. Η εξωτερική έκθεση είναι περιορισμένη καθώς κατά την εξόρυξη, οι εργάτες βρίσκονται σε απόσταση από το μέταλλευμα, και έτσι ο χρόνος που δαπανούν κοντά σε αυτό μειώνεται. Από την άλλη πλευρά, η επεξεργασία του ξηρού φωσφορικού οξέος και του πετρώματος δημιουργεί σημαντική ποσότητα αερόφερτης σκόνης, οπότε η εσωτερική έκθεση μπορεί να είναι υψηλή. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της υγρής διεργασίας δεν υπάρχει σκόνη. Σε υπόγειες εξορύξεις, η συσσώρευση των θυγατρικών του ραδονίου είναι σημαντική και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σύστημα εξαερισμού. Σε φωσφορικά μεταλλεύματα τόσο ιζηματογενούς όσο και πυριγενούς προέλευσης, οι αλυσίδες διάσπασης του ουρανίου και του θορίου βρίσκονται γενικά σε ραδιενεργή ισορροπία. Η συνολική ετήσια ενεργός δόση που έλαβαν οι εργαζόμενοι σε ιζηματογενή φωσφορικά άλατα και αντίστοιχες εγκαταστάσεις στις ΗΠΑ υπολογίστηκε στην περιοχή 0.12-0.30 mSv [1]. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι ενεργότητες ραδιοϊσοτόπων σε φωσφορικά πετρώματα από το Μαρόκο.

3.2 Φωσφογύψος

Παράγωγο της υγρής αποτέφρωσης στην οποία υπόκειται ο φωσφορίτης είναι ο φωσφογύψος, αδιάλυτο άλας θειικού ασβεστίου. Κάθε τόνος φωσφορικού οξέος που παράγεται αντιστοιχίζεται με 4-6 τόνους φωσφογύψου (ξηρό βάρος)[7]. Ο φωσφογύψος είναι σε μορφή ιλύος, με τα επίπεδα υγρασίας να εξαρτώνται από τις συνθήκες διεργασίας και ιδιαίτερα από τη θερμοκρασία. Το παραπροϊόν αυτό διοχετεύεται σε κοντινές λίμνες, όπου παραμένει για περίοδο επαρκή ώστε να είναι δυνατή η πλήρης

Ραδιονουκλίδιο	Ειδική ενεργότητα(Bq/kg)
Ra-226	1759
U-238	1917
Ra-228	24
Th-228	16
Th-232	20
K-40	17

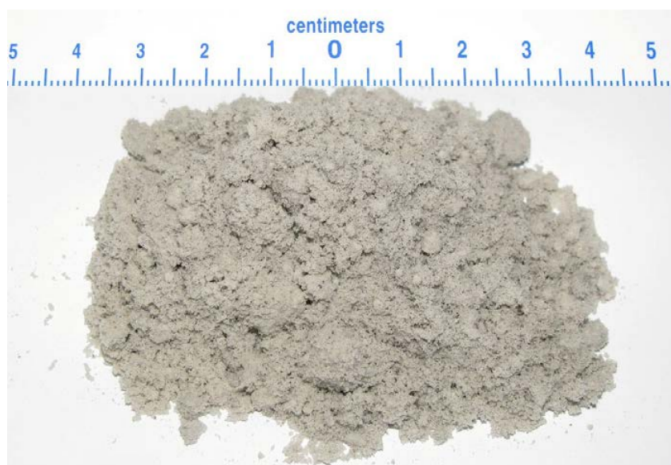
Πίνακας 4: Συγκεντρώσεις ραδιενέργειας από ραδιοϊσότοπα που περιλαμβάνονται σε φωσφορικά πετρώματα από το Μαρόκο [10].

απόθεσή του. Μετά την περίοδο αυτή, συσσωρεύεται και θεωρείται απόβλητο, λόγω των υψηλών επιπέδων των προσμείξεών του. Η ραδιενέργεια και τα βαρέα μέταλλα που περιέχονται σε αυτό, έχουν αποτελέσει σημαντική επιστημονική ανησυχία, αποτέλεσμα της οποίας ήταν η συσσώρευσή του να γίνεται σε εγκαταστάσεις μακροπρόθεσμης διάθεσης και όχι σε βραχυπρόθεσμες στοίβες. Υπάρχουν δύο μέθοδοι στοιβάγματος: του υγρού στοιβάγματος και του στεγνού στοιβάγματος. Η μέθοδος του υγρού στοιβάγματος είναι η συνηθέστερη από τις δύο και κατά την μέθοδο αυτή, το φωσφορούχο μείγμα αναμειγνύεται με νερό καθώς εξέρχεται από το σύστημα διήθησης και διοχετεύεται ως υδαρή κοπριά μέσω αγωγού προς μια περιοχή εκμετάλλευσης όπου τα στερεά εγκαθίστανται. Κατά την μέθοδο στεγνού στοιβάγματος, ο φωσφογύψος που εξέρχεται από το σύστημα διήθησης μεταφέρεται στη στοίβα με μάντα ή φορητό, χωρίς την προσθήκη νερού. Στην συνέχεια, το υλικό εναποτίθεται και απλώνεται με χρήση εξοπλισμού όπως είναι οι κινητοί μεταφορείς μάντων και οι μπουλντόζες. Η διαδικασία αυτή έχει πραγματοποιηθεί σε διάφορα μέρη του κόσμου, συμπεριλαμβανομένης της Βραζιλίας, της Ιορδανίας, της Σενεγάλης, της Τυνησίας και άλλων χωρών. Εκτιμάται ότι, μέχρι το 2006, συνολικά 2,6-3,7 δισεκατομμύρια τόνοι φωσφογύψου είχαν συσσωρευτεί σε στοίβες παγκοσμίως, αντιπροσωπεύοντας το 44-62% του συνολικού ποσού που παρήχθη μέχρι τότε [7].

Ενώ στα φωσφορικά πετρώματα το ουράνιο και το θόριο βρίσκονται σε ισορροπία, αυτή η κατάσταση διαταράσσεται κατά τις βιομηχανικές διεργασίες και έτσι τα ραδιονουκλίδια διεγείρονται σε παραπροϊόντα τους. Οι συγκεντρώσεις του U-235 στον φωσφογύψο υπολογίζονται να μικρότερες από 0.1Bq/gr με αυτή την τιμή να είναι περιστασιακά υψηλότερη λόγω αναποτελεσματικότητας της διαδικασίας υγρής αποτέφρωσης οξέος. Όσον αφορά το Ra-226, οι συγκεντρώσεις του στον φωσφογύψο κυμαίνονται από 0.2-3.0 Bq/gr για υλικά που προέρχονται από ιζηματογενές φωσφορικό μέταλλευμα, ενώ για υλικά που προέρχονται από πυριγενές μέταλλευμα είναι χαμηλότερες και κυμαίνονται από 0.01

έως 0.7 Bq/gr [7]. Περίπου το 80-90% του ραδίου συμπυκνώνεται στον φωσφογύψο και περίπου το 80-85% του ουρανίου και 70% του θορίου στο φωσφορικό οξύ [8].

Ο φωσφογύψος (Σχήμα 6) βρίσκει εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων. Αρχικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κατασκευαστικό υλικό για την παραγωγή γυψοσανίδων και τσιμέντου. Όταν αναμιγνύεται με τσιμέντο, μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα και την αντοχή του μείγματος. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται στον τομέα της γεωργίας για τη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους και της πα-



Σχήμα 6: Δείγμα φωσφογύψου. [7]

ραγωγικότητας των καλλιεργειών. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στα όξινα εδάφη, καθώς περιέχει ασβέστιο και θειάφι, το οποίο μπορεί να συμβάλει στην εξουδετέρωση της οξύτητας του εδάφους. Άλλες εφαρμογές του φωσφογύψου είναι στην κατασκευή οδών για τη βελτίωση της σταθερότητας και της ανθεκτικότητας των οδοστρωμάτων καθώς επίσης και στην θαλάσσια έρευνα με σκοπό την σταθεροποίηση των ευάλωτων ακτογραμμών, την προστασία περιοχών όπως οι παράκτιοι υγρότοποι κατά του κινδύνου πλημμυρών και την αποκατάσταση παράκτιων βιομηχανών.

Η διαχείριση του φωσφογύψου, είτε αφορά το στοίβαγμά του είτε τις εφαρμογές που προαναφέρθηκαν, αποτελεί μία πρόκληση λόγω των μεγάλων όγκων και της πιθανότητας ατμοσφαιρικών εκπομπών σκόνης και ραδονίου στην ατμόσφαιρα, καθώς και διαρροών που περιέχουν φθόριο, βαρέα μέταλλα και ραδιονουκλίδια.

3.3 Υλικά δειγμάτων

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν δύο δείγματα υλικών προερχόμενων από τη βιομηχανία του φωσφόρου και συγκεκριμένα ένα δείγμα ορυκτού φωσφορίτη κι ένα δείγμα φωσφογύψου. Το εργαστήριο φασματοσκοπίας γάμμα του ΙΠΡΕΤΕΑ προμηθεύτηκε τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δειγμάτων από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) στα πλαίσια συμμετοχής του σε άσκηση διασύγκρισης (Intercomparison) ανάμεσα σε εργαστήρια της Ελλάδας και του εξωτερικού. Τα συγκεκριμένα υλικά είχαν παρασχεθεί από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) στην ΕΕΑΕ, η οποία -μετά την ομογενοποίησή τους- τα διαμοίρασε στα συμμετέχοντα εργαστήρια. Τα υλικά που μελετήθηκαν φαίνονται στα Σχήματα 6 και 7 ενώ τα αντίστοιχα πιστοποιητικά βρίσκονται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 7: Υλικό 1: Φωσφορίτης.



Σχήμα 8: Υλικό 2: Φωσφογύψος.

Τα δύο υλικά μελετήθηκαν με φασματοσκοπία γάμμα με σκοπό τον προσδιορισμό των θυγατρικών τους ισωτόπων αλλά και της ενεργότητας αυτών. Προκειμένου να γίνει ο πειραματικός προσδιορισμός αυτών, τα δείγματα έπρεπε πρώτα να περάσουν από μία διαδικασία προετοιμασίας. Αρχικά, μέρος των υλικών αυτών ξηράνθηκε με σκοπό τον υπολογισμό της υγρασίας του καθενός από αυτά και στη συνέχεια συσκευάστηκαν σε ειδικά δοχεία και μετρήθηκαν οι μάζες τους. Μέσω της μάζας και του όγκου των δοχείων υπολογίστηκαν οι πυκνότητές τους, πληροφορία που χρησιμεύει στη σωστή επιλογή πηγών αναφοράς για τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος, τα δύο δείγματα σφραγίστηκαν με κατάλληλη εποξική ρητίνη ώστε να αποφευχθεί η διαφυγή αερίων ισωτόπων. Όλα τα βήματα της προετοιμασίας αυτής περιγράφονται αναλυτικά την επόμενη ενότητα.

3.4 Προετοιμασία Δειγμάτων

3.4.1 Υπολογισμός υγρασίας

Το πρώτο βήμα της προετοιμασίας των δύο δειγμάτων ήταν ο υπολογισμός της υγρασίας τους μέσω ξήρασης μικρής ποσότητας από το καθένα. Γενικά, η ξήραση δειγμάτων αναφέρεται στην διαδικασία αφαίρεσης της υγρασίας τους για περαιτέρω ανάλυση ή σε περίπτωση που το δείγμα χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί εντελώς στεγνό.

Δείγματα φωσφορίτη και φωσφογύψου, μάζας 10gr, τοποθετήθηκαν σε δοχεία πέτρι, ειδικά ρηχά δοχεία, δύο μεγεθών όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9. Τα τέσσερα συνολικά δείγματα ξηράνθηκαν σε ειδικό φούρνο της εταιρίας Carbolite Gero στους 80°C για περίπου 30 ώρες. Η συγκεκριμένη θερμοκρασία επιλέχθηκε καθώς τα πτητικά ισότοπα διαφεύγουν στον αέρα κατά την ξήρασή τους σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε διαφυγή ισοτόπων ενδιαφέροντος και παράλληλα ενδέχεται να αποτελέσει κίνδυνο για τους χειριστές του φούρνου και τους εργαζόμενους στον χώρο γενικότερα.



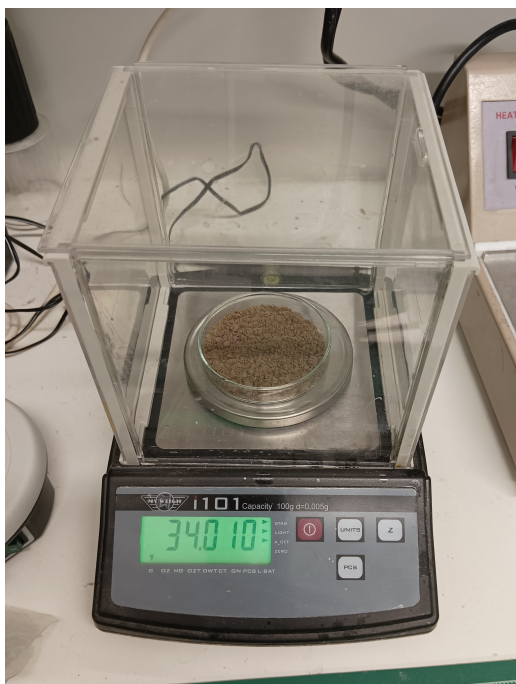
Σχήμα 9: Τοποθέτηση δειγμάτων σε πέτρι πριν από την ξήραση. Αριστερά (σκουρόχρωμα): φωσφορίτης - δεξιά (ανοιχτόχρωμα): φωσφογύψος



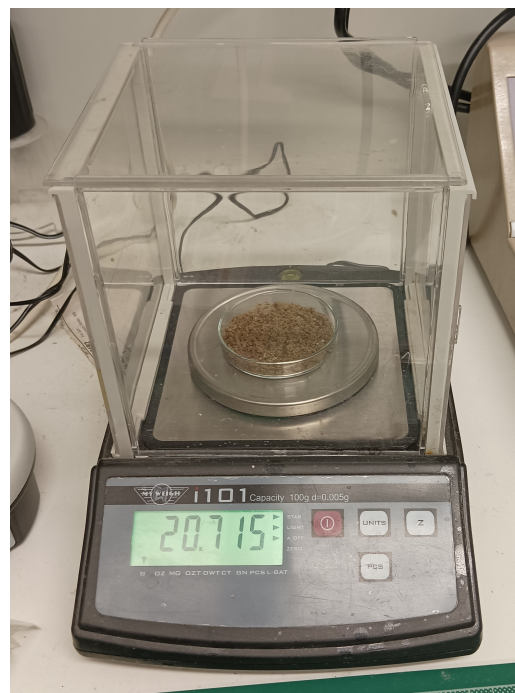
Σχήμα 10: Τοποθέτηση δειγμάτων στον φούρνο. Μπροστά και δεξιά φαίνονται τα δείγματα φωσφορίτη ενώ πίσω και αριστερά τα δείγματα φωσφογύψου.

Τα τέσσερα δείγματα ζυγίστηκαν με τα πέτρι τόσο πριν την ξήραση όσο και κατόπιν αυτής. Η διαφορά μεταξύ της αρχικής μάζας και της τελικής αντιστοιχεί στην ποσότητα νερού που εξατμίστηκε και χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας των δύο αρχικών δειγμάτων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών παρουσιάζονται αναλυτικά στην επόμενη υποενότητα.

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος των δύο δειγμάτων αποτελεί το ποσοστό υγρασίας του καθενός. Αρχικά, αφού τα δείγματα φωσφορίτη και φωσφογύψου τοποθετήθηκαν στα δύο μεγέθη πέτρι όπως αυτό περιγράφηκε παραπάνω, ζυγίστηκαν τόσο πριν την ξήρανσή τους όσο και μετά από αυτή. Στα Σχήματα 11 και 12 απεικονίζεται η ζύγιση του δείγματος φωσφογύψου και στα δύο μεγέθη πέτρι πριν από την αποξήρανσή του.



Σχήμα 11: Ζύγιση του δείγματος φωσφογύψου στο μεγάλο πέτρι.



Σχήμα 12: Ζύγιση του δείγματος φωσφογύψου στο μικρό πέτρι.

Η ζυγαριά που απεικονίζεται στα Σχήματα 11 και 12 και που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις του δείγματος φωσφογύψου είναι της εταιρίας MyWeight. Τα αποτελέσματα των ζυγίσεων αυτών παρουσιάζονται στους Πίνακες 5 και 6 για το δείγμα φωσφορίτη και φωσφογύψου αντίστοιχα.

Μέγεθος πέτρι	Μάζα πέτρι(gr)	B1(gr)	B2(gr)	B1-B2(gr)
Μεγάλο	24.857	35.688	35.619	0.069
Μικρό	14.956	20.678	20.640	0.038

Πίνακας 5: Μάζες των δειγμάτων φωσφορίτη πριν (B1) και μετά την ζύγιση (B2).

Στη συνέχεια, οι διαφορές μεταξύ των αρχικών και των τελικών μαζών του κάθε δείγματος διαίρηθηκαν με το αντίστοιχο αρχικό βάρος προκειμένου να βρεθεί το ποσοστό υγρασίας του. Για κάθε

Μέγεθος πέτρι	Μάζα πέτρι(gr)	B1(gr)	B2(gr)	B1-B2(gr)
Μεγάλο	24.065	34.010	31.520	2.49
Μικρό	15.630	20.715	19.485	1.23

Πίνακας 6: Μάζες των δειγμάτων φωσφογύψου πριν (B1) και μετά την ξήρανση (B2).

δείγμα, προέκυψαν δύο τιμές και υπολογίστηκε ο μέσος όρος αυτών. Η διαδικασία που περιγράφηκε είναι η εξής:

- Φωσφορίτης

Μεγάλο πέτρι :

$$\frac{B1 - B2}{B1'} = \frac{0.069}{10.831} = 0.00637$$

ή 0.64% υγρασία.

Μικρό πέτρι :

$$\frac{B1 - B2}{B1'} = \frac{0.038}{5.722} = 0.00664$$

ή 0.66% υγρασία.

Όπου B1' είναι η καθαρή μάζα του δείγματος πριν την ξήρανση. Υπολογίζοντας τον μέσο όρο των δύο αυτών τιμών προκύπτει πως το ποσοστό υγρασίας του δείγματος φωσφορίτη είναι ίσο με 0.65%.

- Φωσφογύψος

Μεγάλο πέτρι :

$$\frac{B1 - B2}{B1'} = \frac{2.49}{9.945} = 0.250$$

ή 25% υγρασία.

Μικρό πέτρι :

$$\frac{B1 - B2}{B1'} = \frac{1.23}{5.085} = 0.241$$

ή 24.1% υγρασία.

Όπου B1' είναι και πάλι η καθαρή μάζα του δείγματος πριν την ξήρανση. Το ποσοστό υγρασίας του δείγματος φωσφογύψου υπολογίστηκε ίσο με 24.55% ως μέσος όρος των δύο πειραματικών τιμών.

Παρατηρείται πως τα ποσοστά υγρασίας των δύο δειγμάτων έχουν πολύ μεγάλη απόκλιση, γεγονός που αναμενόταν, καθώς το δείγμα φωσφορίτη έχει όψη χαλικιού και άρα αναμένεται να έχει

χαμηλά ποσοστά υγρασίας, ενώ το δείγμα φωσφογύψου είναι ιλυώδες και το ποσοστό υγρασίας του αναμένεται σαφώς υψηλότερο.

3.4.2 Συσκευασία και Ζύγιση

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία υπολογισμού της υγρασίας των υλικών, ακολούθησε η συσκευασία τους σε δοχεία και η ζύγιση αυτών. Η μετάγγισή τους είναι απαραίτητη λόγω του γεγονότος ότι έπρεπε τα δοχεία που τα περιείχαν να είναι γνωστού όγκου και αντίστοιχου με εκείνου των διαθέσιμων πηγών αναφοράς. Έτσι, μεταγγίσθηκε απαραίτητη ποσότητα από το κάθε υλικό σε μικρότερα από τα αρχικά τους δοχεία όπως φαίνεται στα Σχήματα 13 και 14. Τα δοχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τα δύο δείγματα είναι πανομοιότυπα και το απόβαρο μετρήθηκε ίσο με 32gr.



Σχήμα 13: Γέμισμα δοχείου με φωσφορίτη.



Σχήμα 14: Γέμισμα δοχείου με φωσφογύψο.

Έπειτα, τα δύο δείγματα σφραγίστηκαν και ζυγίστηκαν. Οι μετρήσεις τόσο του απόβαρου όσο και των συσκευασμένων δειγμάτων έγιναν με ζυγαριά της εταιρίας deLonghi και το σφάλμα που αποδίδεται στις μετρήσεις αυτές είναι ίσο με 2gr. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Πίνακα 7.

Δείγμα	Μεικτή μάζα(gr)	Καθαρή μάζα(gr)
Φωσφορίτης	594	562
Φωσφογύψος	330	298

Πίνακας 7: Μεικτές και καθαρές μάζες των συσκευασμένων δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου.

Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 7, αξίζει να σημειωθεί ότι το δείγμα του φωσφογύψου, σε δοχείο ίδιου όγκου με εκείνο του φωσφορίτη, ζυγίζει κατά πολύ λιγότερο.

3.4.3 Υπολογισμός πυκνότητας

Επόμενο βήμα μετά την ζύγιση των δύο δειγμάτων ήταν ο υπολογισμός της πυκνότητάς τους. Ο υπολογισμός αυτός είναι απαραίτητος προκειμένου να μπορούν να συσχετιστούν τα δείγματα με γνωστές πηγές ίδιας γεωμετρίας και αντίστοιχων πυκνοτήτων, οι οποίες είναι απαραίτητες για την βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Η βαθμονόμηση αυτή του ανιχνευτή με τις πηγές όγκου θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 4.

Αφού λοιπόν τα δείγματα ζυγίστηκαν, χρειαζόταν να βρεθεί και ο όγκος τους έτσι ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των πυκνοτήτων τους. Προκειμένου να βρεθεί ο όγκος αυτός, μετρήθηκε ένα όμοιο δοχείο με εκείνο που περιβάλλει τα δείγματα φωσφορίτη και φωσφογύψου.

Με παχύμετρο της εταιρίας VERNIER CALIPER μετρήθηκε το ύψος του δοχείου ίσο με $h=7.02\text{cm}$ και η εσωτερική του διάμετρος ίση με $\delta=7.89\text{cm}$. Έτσι, βρέθηκε ο όγκος σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$V = \pi r^2 h = 343.05\text{cm}^{-3}$$

Για κάθε δείγμα, οι πυκνότητες υπολογίστηκαν ως εξής:

- Φωσφορίτης

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{562}{343.05} = 1.63\text{gr/cm}^3$$

- Φωσφογύψος

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{298}{343.05} = 0.868\text{gr/cm}^3$$

Σημειώνεται ότι οι μάζες των δύο δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς των πυκνοτήτων είναι οι καθαρές και όχι οι μεικτές. Επιπρόσθετα, στον υπολογισμό του όγκου χρησιμοποιήθηκε η εσωτερική ακτίνα του δοχείου, προκειμένου ο όγκος να αναφέρεται μόνο στο φωσφορικό δείγμα και όχι στο συνολικό δείγμα πετρώματος-δοχείου.

3.5 Σφράγισμα δειγμάτων με ρητίνη

Οι τρεις φυσικές ραδιενεργές σειρές που περιέχονται στα δείγματα τόσο του φωσφορίτη όσο και του φωσφογύψου, έχουν κάποιο ισότοπο του ραδονίου. Το ραδόνιο, ως ευγενές αέριο, έχει την τάση να διαφεύγει από όπου είναι παγιδευμένο με αποτέλεσμα να χάνεται η ισορροπία των ισοτόπων που παράγονται έπειτα από αυτό. Πολλά από τα ισότοπα αυτά έχουν μικρό χρόνο ημιζωής και αποδιεγείρονται γρήγορα. Ο χρόνος ημιζωής του Rn-219 στη σειρά ακτινίου και του Rn-220 στη σειρά θορίου είναι πολύ σύντομος και ακόμη και αν το ραδόνιο διαφύγει, η ισορροπία θα αποκατασταθεί εντός μερικών λεπτών. Αυτό δεν ισχύει για το Rn-222, με χρόνο ημιζωής ίσο με περίπου 3.8 ημέρες. Μετά τη διαφυγή του, υπάρχει αρκετός χρόνος για την αποδιέγερση των νουκλιδίων πριν από την επανανάπτυξη

του Rn-222. Καθώς τα νουκλίδια μετά το ραδόνιο μετρώνται για να προσδιοριστεί η ενεργότητα του ραδονίου και του πατρικού Ra-226, η απώλειά του θα επηρεάσει όλη τη διαδικασία μέτρησης.

Προκειμένου λοιπόν να αποφευχθεί η διαφυγή του αέριου ραδονίου, η λύση είναι το σφράγισμα των δειγμάτων, δηλαδή το βάψιμο του δοχείου που τα περιβάλλει με μονωτικό υλικό, και έπειτα αναμονή για περίπου 6-7 χρόνους ημιζωής του ραδονίου προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία όλων των θυγατρικών του πριν την μέτρηση του δείγματος. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί σε παρόμοιες μελέτες στο παρελθόν με σκοπό τον «εγκλωβισμό» του αέριου ραδονίου στο εκάστοτε δείγμα και αποδείχθηκε αποτελεσματική [185] [A-101] [11]. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη σφράγιση στην παρούσα διπλωματική εργασία φέρει την εμπορική ονομασία ER-LAC S86 και πρόκειται για εποξική ρητίνη. Η ρητίνη αυτή πωλείται σε δύο ξεχωριστά δοχεία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 15. Το ένα περιέχει το βερνίκι και το άλλο τον σκληρυντή. Τα δύο συστατικά αναμιγνύονται πριν την χρήση προκειμένου να δημιουργηθεί ένα πιο παχύρευστο υλικό του οποίου η εφαρμογή θα είναι ευκολότερη.



Σχήμα 15: Τα δύο συστατικά της ρητίνης. Το δεξί δοχείο (υλικό A) περιέχει το βερνίκι, ενώ το αριστερό δοχείο (υλικό B) περιέχει τον σκληρυντή

Αφού λοιπόν το βερνίκι και ο σκληρυντής αναμείχθηκαν σε αναλογία 2:1, δημιουργήθηκε ένα παχύρευστο υλικό. Από το υλικό αυτό, περάστηκαν 2 στρώσεις σε όλες τις πλευρές του δοχείου του κάθε δείγματος ώστε να επιτευχθεί στρώση περίπου 0.5-1mm ρητίνης. Η διαδικασία της ανάμειξης των δύο συστατικών και της εφαρμογής της ρητίνης στα δείγματα φαίνεται στα Σχήματα 16 και 17 αντίστοιχα.

Αφού τα δύο δείγματα σφραγίστηκαν με την ρητίνη, αποθηκεύτηκαν για περίπου 30 ημέρες, δηλαδή περίπου 7 χρόνους ημιζωής του Ra-222, ώστε να επιτευχθεί ισορροπία των ισοτόπων πριν μετρηθούν. Στο Σχήμα 18 φαίνονται τα δείγματα μετά την ολοκλήρωση του σφραγίσματός τους.

Με το σφράγισμα των δειγμάτων καθώς επίσης και το πέρας των 30 ημερών, ολοκληρώθηκε η



Σχήμα 16: Ανάμειξη των δύο συστατικών της ρητίνης.



Σχήμα 17: Εφαρμογή στρώσης ρητίνης στο δείγμα φωσφογύψου.



Σχήμα 18: Τα δύο δείγματα μετά την εφαρμογή ρητίνης για να σφραγιστούν. Αριστερά φαίνεται το δείγμα φωσφορίτη και δεξιά το δείγμα φωσφογύψου.

προετοιμασία τους και ακολούθησε η μελέτη τους με γ-φασματοσκοπία.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 Φασματοσκοπία ακτίνων γάμμα

Η φασματοσκοπία γάμμα αποτελεί τεχνική που χρησιμοποιείται για την καταγραφή και ανάλυση ενεργειακών φασμάτων ακτίνων γάμμα (φωτονίων) που εκπέμπονται από ραδιενεργές πηγές. Το προκύπτον ενεργειακό φάσμα περιέχει πληροφορία για το είδος και την ενέργεια των ακτίνων γάμμα που έχουν ανιχνευθεί και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των ισοτόπων που περιέχονται στο δείγμα. Μέσω της ανάλυσης του φάσματος μπορεί στη συνέχεια να προσδιοριστεί η ενεργότητα του δείγματος καθώς και η ποιοτική και ποσοτική του σύσταση.

Παρόλο που η φασματοσκοπία ακτίνων γάμμα είναι πιθανόν να παρουσιάσει διάφορες δυσκολίες, ειδικά όταν πρόκειται για μελέτη δειγμάτων NORM, τα πλεονεκτήματά της είναι αρκετά και πολλές φορές την καθιστούν προτιμότερη και καταλληλότερη από τις άλλες μεθόδους ανάλυσης δειγμάτων. Ένα από τα σημαντικά θετικά στοιχεία της μεθόδου αυτής είναι το γεγονός ότι έχει υψηλή επιλεκτικότητα. Αυτό σημαίνει ότι το ενεργειακό φάσμα που παράγεται με φασματοσκοπία γάμμα είναι μοναδικό για κάθε ραδιενεργό ισότοπο, καθιστώντας το αποτελεσματικό εργαλείο για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων ισοτόπων σε δείγμα. Επιπρόσθετα, αποτελεί μια μη καταστρεπτική τεχνική που δεν αλλοιώνει το δείγμα που αναλύεται, επομένως είναι και επαναλήψιμη.

Όσον αφορά στις δυσκολίες της χρήσης της μεθόδου αυτής για μελέτη NORM υλικών, το σημαντικότερο είναι ότι τα επίπεδα ραδιενέργειας σε περιβαλλοντικά δείγματα είναι συνήθως χαμηλά και έτσι οι μετρήσεις τους χρειάζεται να είναι μεγαλύτερης διάρκειας σε σχέση με αντίστοιχες μη περιβαλλοντικών υλικών. Έπειτα, δεν μπορεί να αγνοηθεί το γεγονός των έντονων αμοιβαίων παρεμβολών σε νουκλίδια των σειρών του ουρανίου και του θορίου, το οποίο καθιστά δύσκολο τον διαχωρισμό τους. Παρόλ' αυτά, τα προαναφερθέντα προβλήματα είναι επιλύσιμα και όχι ικανά να καταστήσουν την φασματοσκοπία ακτίνων γάμμα μη προτιμητέα και υποδεέστερη από άλλες μεθόδους.

4.1.1 Αλληλεπίδραση ακτίνων γάμμα με την ύλη

Η ανίχνευση και η καταγραφή των ακτίνων γάμμα από τον ανιχνευτή, βασίζονται στην αλληλεπίδραση των ακτίνων αυτών με την ύλη. Κατά την αλληλεπίδραση αυτή, η ενέργεια τους μεταφέρεται σε ηλεκτρόνια στο εσωτερικό του ανιχνευτή, τα οποία συλλέγονται και μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα. Στα πλαίσια της παρούσας συζήτησης, οι τρόποι αλληλεπίδρασης της γ -ακτινοβολίας με την ύλη που παίζουν σημαντικό ρόλο στη μέτρηση ραδιενέργειας είναι τρεις: (i) το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, (ii) η σκέδαση Compton και (iii) η δίδυμη γένεση. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο κυριαρχεί σε χαμηλές ενέργειες της γ -ακτινοβολίας της τάξης των 0-150keV και αφορά την αλληλεπίδραση των ακτίνων- γ με ένα δέσμιο ηλεκτρόνιο ενός ατόμου. Κατά το φαινόμενο αυτό, οι ακτίνες- γ αποθέτουν όλη τους την ενέργεια στο ηλεκτρόνιο. Τα ηλεκτρόνια αυτά μετά την κρούση, εξέρχονται από το άτομο παράγοντας έναν παλμό ανάλογο της ενέργειας ακτίνων- γ ή ακτίνων-X που αλληλεπίδρασαν [12]. Αυτά τα

γεγονότα παρουσιάζονται στο φάσμα ως φωτοκορυφές. Όσον αφορά στην σκέδαση Compton, αυτή λαμβάνει χώρα σε μεσαίες ενέργειες φωτονίων της τάξης των 150keV-8.5MeV. Στο φαινόμενο Compton, το φωτόνιο προσπίπτει στο ηλεκτρόνιο με κάποια γωνία θ σε σχέση με την αρχική του πορεία και μεταφέρει σε αυτό ένα μέρος της ενέργειάς του που εξαρτάται από την θ [13]. Η σκέδαση Compton συνεισφέρει σημαντικά στις φωτοκορυφές του φάσματος εφόσον όλες οι σκεδάσεις συμβαίνουν στο εσωτερικό του κρυστάλλου. Παρόλα αυτά, υπάρχει πιθανότητα μετά την αλληλεπίδραση του φωτονίου, αυτό να εξέλθει από τον ανιχνευτή και να αποθέσει μέρος της ενέργειάς του στον κρύσταλλο. Τέλος, η δίδυμη γένεση αφορά στα φωτόνια υψηλών ενεργειών, με τις πιθανότητες να αυξάνονται για την πραγματοποίησή της σε ενέργειες μεγαλύτερες των 8MeV. Κατά την δίδυμη γένεση, το φωτόνιο εισέρχεται στον ανιχνευτή και παράγει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Σε αυτό το είδος της αλληλεπίδρασης είναι πάλι πιθανή η πλήρης απορρόφηση της ενέργειας των ακτίνων- γ . Ένας παλμός από το ηλεκτρόνιο και ένας από το ποζιτρόνιο παράγονται ταυτόχρονα και έτσι ο παλμός εξόδου από τον ανιχνευτή θα είναι το άθροισμά τους. Όταν το ποζιτρόνιο εξαίλωθεί στον ανιχνευτή συνδυαστικά με ένα φωτόνιο, παράγονται δύο φωτόνια εξαύλωσης με ενέργεια ίση με 511keV το καθένα, τα οποία, αν δεν γίνουν περαιτέρω αλληλεπιδράσεις, «ξεφεύγουν» από τον ανιχνευτή με συνολική ενέργεια ακριβώς 1.022keV. Η ενέργεια αυτή αφαιρείται από τη συνολική ενέργεια που είχαν τα φωτόνια που αρχικά εισήλθαν στον ανιχνευτή [14].

Σε κάθε μία από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις, ο ανιχνευτής συλλέγει τα φωτόνια που εναποθέτουν όλη την ενέργειά τους στο υλικό του και τα «τοποθετεί» σε αντίστοιχες ενέργειες στο φάσμα, σχηματίζοντας φωτοκορυφές. Με βάση το πόσα φωτόνια έχει καταγράψει ο ανιχνευτής στις συγκεκριμένες φωτοκορυφές, δηλαδή μέσω του εμβαδού των φωτοκορυφών των φασμάτων, γίνεται ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής [10] κατά την βαθμονόμηση του ανιχνευτή ή ο προδιορισμός της ποσοτικής σύστασης ενός άγνωστου δείγματος.

4.1.2 Λειτουργία ανιχνευτών Γερμανίου

Οι ανιχνευτές γερμανίου αποτελούν ανιχνευτές ημιαγωγών και την πλέον καλύτερη λύση για τις υψηλής διακριτικής ικανότητας αναλύσεις ακτίνων- γ καθώς συλλέγουν άμεσα τα φορτία που παράγονται από τον ιονισμό του υλικού του ημιαγωγού. Οι ανιχνευτές αυτοί αποτελούνται από μία επαφή p-n όπου η περιοχή p παρουσιάζει περίσσεια οπών και η περιοχή n παρουσιάζει περίσσεια ηλεκτρονίων. Στο σημείο επαφής, οπές από την περιοχή p κινούνται προς την περιοχή n και αντίστοιχα ηλεκτρόνια από την περιοχή n κινούνται προς την περιοχή p. Αυτή η ταυτόχρονη διάχυση κατά την οποία συμβαίνει επανασύνδεση οπών-ηλεκτρονίων, δημιουργεί μία περιοχή ανάμεσα στις p και n που είναι απογυμνωμένη από ελεύθερους φορείς φορτίου και ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης. Η λειτουργία του ανιχνευτή βασίζεται στον όγκο της περιοχής αυτής, καθώς πρόκειται για τον όγκο στον οποίο αν προσπέσει κάποιο φωτόνιο, τότε αυτό θα ανιχνευτεί (ενεργός όγκος). Για να επιτευχθεί ο μεγαλύτερος δυνατός ενεργός όγκος, άρα και οι πιθανότητες ανίχνευσης φωτονίων, εφαρμόζεται υψηλή τάση στα άκρα του κρυστάλλου προκειμένου να συρρικνωθούν οι περιοχές p-n και να μεγαλώσει η περιοχή απογύμνωσης

[15]. Οι αλληλεπιδράσεις των ακτίνων-γ με το υλικό του ανιχνευτή όπως περιγράφηκαν παραπάνω, δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών τα οποία συλλέγονται από το ηλεκτρικό πεδίο και έτσι παράγουν παλμό. Κάθε ανιχνευτής έχει την εξής συνδεσμολογία:

- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης: δημιουργεί το ηλεκτρικό πεδίο που χρειάζεται ώστε να συλληχτούν τα ηλεκτρόνια που παράγονται κατά την αλληλεπίδραση των ακτίνων-γ με τον κρύσταλλο
- Προενισχυτής και ενισχυτής: ο πρώτος βρίσκεται πάνω στον κρύσταλλο γερμανίου και δέχεται το σήμα που προκύπτει από την πρόσπτωση μίας ακτίνας- γ στον κρύσταλλο του ανιχνευτή ενώ ο δεύτερος ενισχύει το σήμα αυτό
- Σύστημα ADC/ MCA: μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε ψηφιακή πληροφορία και στη συνέχεια σε φάσμα με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή

Έτσι, στο τέλος δίνεται από τον υπολογιστή ένα φάσμα (ιστόγραμμα) το οποίο στον κάθετο άξονα έχει τα γεγονότα που έχει ανιχνεύσει ο ανιχνευτής (κρούσεις) και στον οριζόντιο άξονα έχει τα κανάλια στα οποία κατανέμονται τα γεγονότα. Το κάθε κανάλι αντιστοιχεί σε μία τιμή ενέργειας, μετά από μια διαδικασία που ονομάζεται ενεργειακή βαθμονόμηση.

4.1.3 Διάταξη φασματοσκοπίας γάμμα

Οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν σε ομοαξονικό ανιχνευτή γερμανίου, υψηλής καθαρότητας και απόδοσης 80% (GEM80), που είναι κατασκευασμένος από την εταιρία EG&G ORTEC, και το πιστοποιητικό του οποίου φαίνεται στο Παράρτημα Γ. Ο ανιχνευτής περιβάλλεται από θωράκιση 5cm κατασκευασμένη από μολύβδο (Σχήμα 19), με σκοπό, τη μείωση της ακτινοβολίας του υποστρώματος και της πιθανής καταγραφής ακτινοβολίας από άλλες μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα στον χώρο του εργαστηρίου αλλά και την προστασία του χειριστή σε περίπτωση ανάλυσης δειγμάτων υψηλής ενεργότητας.



Σχήμα 19: Ο ανιχνευτής γερμανίου με την μολύβδινη θωράκιση.

Ο ανιχνευτής είναι συνδεδεμένος με ένα δοχείο υγρού αζώτου και με ένα σύστημα ηλεκτρονικών που περιλαμβάνει το τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τον ενισχυτή σήματος και τον αναλυτή ύψους παλ-

μών. Το σύστημα αυτό είναι με την σειρά του συνδεδεμένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο συλλέγεται και αναλύεται το φάσμα μέσω του λογισμικού Gamma Vision της εταιρίας ORTEC. Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20: Διάταξη φασματοσκοπίας γάμμα. Από αριστερά προς τα δεξιά: Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής και το σύστημα ηλεκτρονικών, αμέσως μετά το δοχείο υγρού αζώτου και τέλος ο ανιχνευτής.

Μπροστά στον ανιχνευτή υπάρχει μία ράγα πάνω στην οποία είναι τοποθετημένο ένα βαγονίδιο με σκοπό την τοποθέτηση του προς μέτρηση δείγματος πάνω σε αυτό. Αν πρόκειται για σημειακές πηγές, το δείγμα πρώτα τοποθετείται σε ειδικό δειγματοφορέα κατασκευασμένο από plexiglass με ειδική εγχοπή σε σχήμα οπής. Έπειτα ο δειγματοφορέας, τοποθετείται πάνω στο βαγονίδιο έτσι ώστε η πηγή να βρίσκεται κάθετα στον ανιχνευτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 21. Το βαγονίδιο έχει την δυνατότητα μετακίνησής του πάνω στις ράγες σε 9 διαφορετικές θέσεις συγκεκριμένης απόστασης από τον κρύσταλλο.

4.2 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής

Η απόδοση φωτοκορυφής (Full Energy Peak Efficiency FEPE) ορίζεται ως ο λόγος των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας που έχουν αποθέσει όλη την ενέργειά τους στον ανιχνευτή προς το πλήθος των φωτονίων που εκπέμπει η πηγή σε εκείνη την ενέργεια κατά τη διάρκεια της μέτρησης:

$$FEPE = \frac{cps}{gps}$$

όπου:

- cps (counts per second) οι χρούσεις που καταγράφει ο ανιχνευτής στη μονάδα του χρόνου. Το

cps υπολογίζεται πειραματικά ως εξής:

$$cps = \frac{\text{Net counts}}{\text{counting time}}$$

όπου Net counts το εμβαδόν της φωτοκορυφής για συγκεκριμένη ενέργεια και counting time η χρονική διάρκεια της μέτρησης.

- gps (gammas per second) δηλαδή οι ακτίνες-γ συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμπει η πηγή στην μονάδα του χρόνου κατά τη μέτρηση. Το gps υπολογίζεται ως εξής:

$$gps = R(t)yield$$

όπου R(t) είναι η ενεργότητα της εκάστοτε πηγής και υπολογίζεται για την μέρα μέτρησής της και yield ο αριθμός εκπεμπόμενων φωτονίων ανά διάσπαση το οποίο βρίσκεται από τη βιβλιογραφία.

Έτσι, προκύπτει ότι κατά τον πειραματικό υπολογισμό, η FEPE ισούται με:

$$FEPE = \frac{N}{t \times R(t) \times yield}$$

Σημειώνεται εδώ ότι η απόδοση φωτοκορυφής εξαρτάται από τη γεωμετρία της μέτρησης (απόσταση δείγματος πηγής από ανιχνευτή, θέση ως προς ανιχνευτή κλπ), τη γεωμετρία και το υλικό του δείγματος. Συνεπώς, αν τροποποιηθεί κάποιο από αυτά τα χαρακτηριστικά, αλλάζει και η απόδοση φωτοκορυφής.

4.3 Διορθώσεις

Κατά τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής ενός ανιχνευτή ή τον προσδιορισμό της ενεργότητας ενός δείγματος είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα που επηρεάζουν τις μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας, ιδίως στην περίπτωση δειγμάτων όγκου, όπως τα εξής:

- Νεκρός χρόνος
- Φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης
- Ενδοαπορρόφηση ακτίνων γάμμα

και αναλύονται παρακάτω.

4.3.1 Νεκρός χρόνος

Ως νεκρός χρόνος ορίζεται η χρονική διαφορά μεταξύ του πραγματικού χρόνου της μέτρησης και του χρόνου κατά τον οποίο ο ανιχνευτής καταγράφει φωτόνια. Οι χρόνοι αυτοί συμβολίζονται t_{real} και t_{live} αντίστοιχα και ισχύει ότι $t_{real} > t_{live}$. Στην πραγματικότητα ο ανιχνευτής, όταν καλείται να καταγράψει μεγάλο πλήθος γεγονότων, χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να αποκατασταθεί

πάλι «διαθέσιμος» για μέτρηση. Επομένως εάν κάποιο φωτόνιο προσπέσει στον ανιχνευτή κατά αυτό το χρονικό διάστημα, ο ανιχνευτής δεν θα το καταγράψει. Εφαρμόζουμε λοιπόν έναν παράγοντα διόρθωσης στις χρούσεις counts που δίνει ο ανιχνευτής, στην προσπάθεια να συμπεριληφθούν και όσα δεν έχει καταφέρει να μετρήσει λόγω αυτού του χρόνου απόκρισης. Η διόρθωση γίνεται ως εξής:

$$N_{corr} = \frac{t_{real}}{t_{live}} \times N$$

όπου N_{corr} ο «διορθωμένος» αριθμός counts και N αυτός που δίνει το φάσμα.

4.3.2 Ακτινοβολία υποστρώματος

Η ακτινοβολία υποστρώματος είναι κάθε σήμα το οποίο καταγράφεται από τον ανιχνευτή για οποιονδήποτε άλλο λόγο πέραν της πλήρους απορρόφησης ενέργειας ενός φωτονίου που προέρχεται από την μετρούμενη πηγή. Το υπόστρωμα είναι ανεπιθύμητο καθώς «σκιάζει» το σήμα που προέρχεται από τη μέτρηση και δεν επιτρέπει την ανάγνωση των «πραγματικών» συμβάντων που προέρχονται από την πηγή. Η ακτινοβολία υποστρώματος μπορεί να οφείλεται στη ραδιένεργεια του περιβάλλοντος του ανιχνευτή (κοσμική ακτινοβολία, οικοδομικά υλικά, θωράκιση ανιχνευτή), ή/και σε πιθανή ραδιενεργό ρύπανση. Προκειμένου να μειωθεί το υπόστρωμα χρησιμοποιείται θωράκιση γύρω από τον ανιχνευτή από υλικά όσον το δυνατό μεγαλύτερης καθαρότητας. Παρόλα αυτά, για να γίνει πλήρης διόρθωση για τις χρούσεις του υποβάθρου με σκοπό την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων, κρίνεται αναγκαία η λήψη φάσματος από μέτρηση του υποστρώματος και η διόρθωση των φασμάτων των μετρήσεων των πηγών με βάση αυτό.

4.3.3 Φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης

Πολλά ισότοπα εκπέμπουν δύο ή περισσότερα φωτόνια σε σειρά από την ίδια διάσπαση του πυρήνα. Για τέτοιες διασπάσεις όπου εκπέμπονται περισσότερα από ένα φωτόνια, υπάρχει σημαντική πιθανότητα πολλαπλά φωτόνια να αλληλεπιδράσουν και να αποθέσουν την ενέργειά τους στον ανιχνευτή. Όταν ο χρόνος μεταξύ των εκπομπών αυτών των φωτονίων είναι μικρότερος από τον χρόνο απόκρισης του ανιχνευτή, δεν είναι δυνατό για τον ανιχνευτή να διακρίνει τα φωτόνια ως ξεχωριστά συμβάντα και παράγεται μόνο ένας παλμός, ο οποίος σχηματίζει φωτοκορυφή με ενέργεια που αντιστοιχεί στο άθροισμα των επιμέρους αποτιθέμενων ενεργειών. Το φαινόμενο αυτό, της καταγραφής δύο φωτονίων ως ένα σε αθροιστική κορυφή, ονομάζεται φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence effect). Προκειμένου να διορθωθεί το φαινόμενο αυτό εφαρμόζουμε στις τιμές της FEPE τους συντελεστές f_{TCC} (true coincidence correction factors). Με την εφαρμογή των συντελεστών αυτών, ο τύπος για την απόδοση φωτοκορυφής γίνεται:

$$FEPE = \frac{N_{corr}}{t_{real} \times R(t) \times yield \times f_{TCC}}$$

Οι συντελεστές αυτοί υπολογίστηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας μέσω του λογισμικού “TrueCoinc” [16] που διατίθεται από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (IAEA).

Η αναλυτική διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών TCC μέσω του λογισμικού αυτού, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα, θα περιγραφούν εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

4.3.4 Ενδοαπορρόφηση ακτίνων γάμμα

Ο όρος «ενδοαπορρόφηση» αναφέρεται στο φαινόμενο κατά το οποίο η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από το εκάστοτε ραδιενεργό δείγμα απορροφάται εν μέρει ή πλήρως στο ίδιο το δείγμα, αντί να εκπέμπεται στο περιβάλλον. Αυτή η απορρόφηση, καθώς επίσης και ο βαθμός στον οποίο αυτή παρατηρείται, είναι συνάρτηση διαφόρων παραγόντων συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας και του τύπου της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, των φυσικών ιδιοτήτων του ραδιενεργού υλικού, όπως είναι η πυκνότητα ή το πάχος του, καθώς και των ειδικών ιδιοτήτων των ραδιενεργών ισotόπων που εμπλέκονται.

Η διόρθωση για το φαινόμενο αυτό στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε με εφαρμογή συντελεστών f_γ οι οποίοι υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης με κώδικα MCNP [17]. Ο κώδικας αυτός, αλλά και η μέθοδος Monte Carlo γενικότερα, θα αναλυθούν εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.

Μετά τους συντελεστές αυτούς, η εξίσωση FEPE παίρνει την εξής τελική μορφή:

$$FEPE = \frac{N_{corr}}{t_{live} \times R(t) \times yield \times f_{TCC} \times f_\gamma}$$

4.4 Υπολογισμός ενεργότητας

Τα δείγματα που μελετήθηκαν στην εργασία αυτή είναι άγνωστης ενεργότητας και ο βασικός σκοπός είναι ο υπολογισμός αυτής. Καθώς η ενεργότητα εμπεριέχεται στον τύπο της FEPE που αναλύθηκε παραπάνω, ο υπολογισμός της γίνεται πολύ εύκολα μέσω αυτής. Προκειμένου λοιπόν να βρεθεί η ενεργότητα, θα πρέπει πρώτα να έχουν υπολογιστεί οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφών για τη συγκεκριμένη γεωμετρία των δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην επόμενη ενότητα. Από τον τύπο της απόδοσης φωτοκορυφής λύνοντας ως προς την ενεργότητα προκύπτει:

$$R(t) = \frac{N_{corr}}{t_{real} \times FEPE \times yield \times f_{TCC} \times f_\gamma}$$

και το σφάλμα αυτής υπολογίζεται ως εξής:

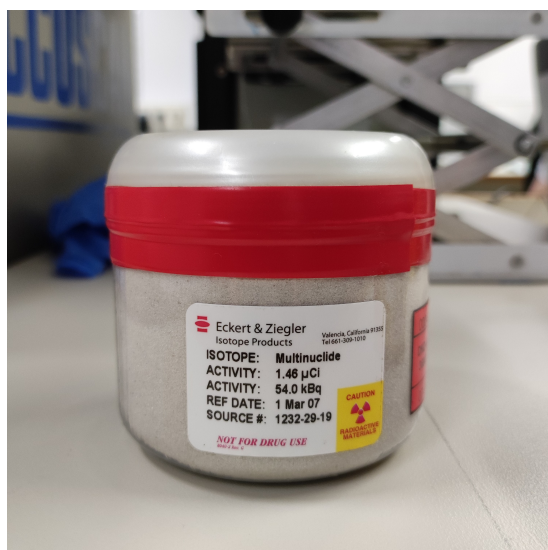
$$\sigma(R(t)) = \sqrt{\sigma(N)^2 + \sigma(FEPE)^2 + \sigma(f_{TCC})^2 + \sigma(f_\gamma)^2}$$

όπου $\sigma(N) = \frac{\delta N}{N}$ με το δN να δίνεται από το λογισμικό μέσω του οποίου αναλύεται το φάσμα (Gamma Vision), $\sigma(FEPE) = \frac{\delta FEPE}{FEPE}$ με το $\delta FEPE$ να είναι το σφάλμα της απόδοσης που υπολογίστηκε, $\sigma(f_{TCC}) = \frac{\delta f_{TCC}}{f_{TCC}}$ με το f_{TCC} να δίνεται από το πρόγραμμα TrueCoinc και το σφάλμα αυτού δf_{TCC} ίσο με 3%. Παρόλο που στον υπολογισμό της $R(t)$ υπεισέρχονται ο t_{live} και το $yield$, θεωρείται πως αυτά τα δύο μεγέθη δεν έχουν σημαντικό σφάλμα και δεν λαμβάνεται υπόψιν.

4.5 Βαθμονόμηση του ανιχνευτή

Η απόδοση ενός ανιχνευτή είναι ένα μέγεθος που περιγράφει την ικανότητα αυτού να καταγράφει φωτόνια που εκπέμπονται από ραδιενεργές πηγές ή δείγματα. Η βαθμονόμηση αυτή είναι μεγάλης σημασίας, καθώς οι καμπύλες που προκύπτουν από την διαδικασία αυτή αποτελούν βάση για τυχούσες επόμενες μελέτες γνωστών ή άγνωστων δειγμάτων. Η απόδοση, ούσα ένα μέγεθος που υφίσταται μικρές διαφοροποιήσεις με την πάροδο του χρόνου και που εξαρτάται άμεσα από τη μελετώμενη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή, είναι μεγάλης σημασίας να υπολογίζεται για την γεωμετρία και το υλικό του εκάστοτε δείγματος. Η σημασία της βαθμονόμησης έγκειται στο γεγονός ότι σε μετρήσεις αγνώστων δειγμάτων μπορούμε με τη βοήθεια μιας πρόσφατης βαθμονόμησης με πηγές αναφοράς ίδιας γεωμετρίας και ίδιου υλικού με εκείνα του δείγματος να κάνουμε αξιόπιστες εκτιμήσεις για την ενεργότητα των ισοτόπων που μετρούνται.

Ήταν λοιπόν απαραίτητο, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, να γίνει βαθμονόμηση του ανιχνευτή για την συγκεκριμένη κοινή γεωμετρία των δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν 2 πηγές αναφοράς ίδιας ακριβώς γεωμετρίας και πυκνότητας με τα δείγματα, οι οποίες παρασχέθηκαν από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας. Οι πηγές αυτές φαίνονται στα Σχήματα 21 και 22.



Σχήμα 21: Πηγή αναφοράς 1: πυκνότητα παρόμοια με του δείγματος φωσφορίτη.



Σχήμα 22: Πηγή αναφοράς 2: πυκνότητα παρόμοια με του δείγματος φωσφογύψου.

Οι παραπάνω πηγές συνοδεύονται από πιστοποιητικά στα οποία αναγράφεται η ημερομηνία κατασκευής τους, ο χρόνος ημιζωής των ισοτόπων της κάθε μίας και η αρχική τους ενεργότητα στην ημερομηνία αναφοράς. Τα πιστοποιητικά αυτά παρατίθενται στο Παράρτημα Β. Με χρήση αυτών υπολογίστηκε η ενεργότητα της κάθε πηγής την ημέρα που έγινε η μέτρησή της σύμφωνα με τον τύπο: $R(t) = R_0 e^{-\lambda t}$ όπου R_0 η αρχική ενεργότητα της πηγής, λ το πηλίκιο $\frac{\ln 2}{t_{1/2}}$ με $t_{1/2}$ τον χρόνο ημιζωής του ισοτόπου και t ο χρόνος που έχει παρέλθει από την ημερομηνία αναφοράς μέχρι την ημερομηνία

μέτρησής της.

Οι δύο πηγές μετρήθηκαν σε απόσταση 1cm από το παράθυρο του ανιχνευτή για χρονικό διάστημα ίσο με 24 ώρες. Το χρονικό διάστημα αυτό επιλέχτηκε σύμφωνα με την ενεργότητα των πηγών έτσι ώστε η αβεβαιότητα των μετρήσεων να είναι κάτω από 5%. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών για τις δύο πηγές αναφοράς υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο για την FEPE και παρουσιάζονται στους Πίνακες 8 και 9. Όσον αφορά στην αβεβαιότητα των τιμών της ενεργότητας που υπολογίστηκαν, θεωρούμε ότι σε αυτά συνεισφέρουν μόνο τα σφάλματα των αρχικών ενεργοτήτων του εκάστοτε ισότοπου και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όπως αυτά δίνονται από τα πιστοποιητικά των πηγών. Τα σφάλματα που πιθανώς έχουν τα μεγέθη t και $t_{1/2}$ θεωρούνται αμελητέα και έτσι δεν συμπεριλαμβάνονται.

Από τα ισότοπα που περιέχονταν στις πηγές με βάση όσα αναγράφονται στα πιστοποιητικά τους, μόνο 4 ανιχνεύθηκαν την ημερομηνία μέτρησής τους στο πλαίσιο της εργασίας: τα Pb-210, Am-241, Cs-137 και Co-60. Τα υπόλοιπα ισότοπα, έχοντας μικρούς χρόνους ημιζωής και καθώς η χρονολογία αναφοράς των πηγών είναι το 2007, δεν είναι πλέον ανιχνεύσιμα. Στο Σχήμα 23 φαίνεται φάσμα μέτρησης της πηγής 1 ενώ στους Πίνακες 8 και 9 φαίνονται τα ισότοπα που ανιχνεύθηκαν και τα οποία είναι κοινά για τις δύο πηγές αναφοράς.

Ισότοπο	E γ (keV)	FEPE	δ FEPE
Pb-210	46.6	2.680E-04	4.021E-05
Am-241	58.98	4.222E-03	1.728E-04
Cs-137	661.1	9.892E-03	2.901E-04
Co-60	1172.27	6.493E-03	2.027E-04
Co-60	1331.73	5.885E-03	1.825E-04

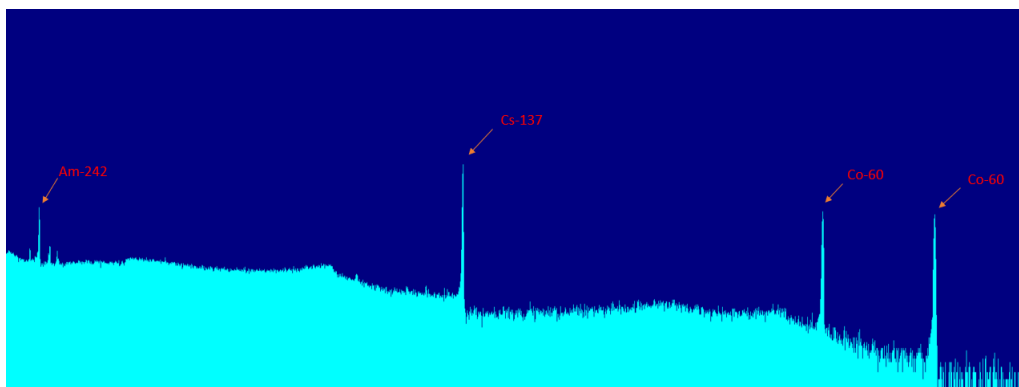
Πίνακας 8: Υπολογισμός τιμών απόδοσης των ισότοπων της πηγής πυκνότητας 1.7 gr/cm³.

Ισότοπο	E γ (keV)	FEPE	δ FEPE
Pb-210	46.6	4.044E-04	5.841E-05
Am-241	58.98	4.222E-03	1.728E-04
Cs-137	661.1	9.892E-03	2.901E-04
Co-60	1172.27	6.493E-03	2.027E-04
Co-60	1331.73	5.885E-03	1.825E-04

Πίνακας 9: Υπολογισμός τιμών απόδοσης των ισότοπων της πηγής πυκνότητας 0.9 gr/cm³.

Δεδομένου ότι αρκετά ισότοπα των δύο πηγών αναφοράς δεν ήταν δυνατόν να ανιχνευτούν κατά την χρονική περίοδο που έλαβε χώρα η παρούσα εργασία, και στην συνέχεια να υπολογιστεί η απόδοση στην αντίστοιχη ενέργεια από τη χρήση των πηγών αναφοράς προέκυψαν μόνο 5 πειραματικά σημεία,

Όπως φαίνεται και στους πίνακες παραπάνω, επομένως δεν ήταν δυνατή η κατασκευή/χάραξη καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσεως της ενέργειας. Επισημαίνεται ότι εκτός από λίγα, τα διαθέσιμα πειραματικά σημεία δεν απλώνονται σε όλο το ενεργειακό εύρος ενδιαφέροντος, ώστε να επιτρέψουν την χάραξη καμπύλης απόδοσης στην εργασία αυτή.



Σχήμα 23: Ενδεικτικό φάσμα μέτρησης της Πηγής 1.

Προκειμένου λοιπόν να μπορέσει να γίνει η βαθμονόμηση, ακολούθησε μεταφορά της καμπύλης FEPE που είχε προκύψει πρόσφατα πειραματικά για σημειακές πηγές, σε καμπύλη FEPE για πηγές όγκου. Η μεταφορά αυτή, γίνεται με χρήση κατάλληλων συντελεστών που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης με τον κώδικα MCNP. Για τη διαδικασία της προσομοίωσης αυτής, απαιτείται αρχικά η λεπτομερής περιγραφή της διάταξης ανιχνευτή-πηγών αναφοράς η οποία παρουσιάζεται στα αρχεία εισόδου που παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης βαθμονόμησης, χρειάστηκε οι πηγές να περιγραφούν στις προσομοιώσεις μία φορά ως σημειακές και μία ως πηγές όγκου. Με το πέρας της προσομοίωσης, δημιουργούνται αρχεία εξόδου στα οποία παρατίθεται η πληροφορία για την τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής και η αβεβαιότητα αυτής. Έχοντας λοιπόν προσομοιώσει τη γεωμετρία, τόσο για σημειακές όσο και για πηγές όγκου, και διαιρώντας τις δύο αντίστοιχες τιμές απόδοσης για κάθε φωτοκορυφή, υπολογίζεται ο συντελεστής για την μεταφορά της καμπύλης. Σημειώνεται ότι, ο συντελεστής αυτός δεν είναι σταθερός σε όλο το ενεργειακό εύρος. Για την Πηγή 1 ο συντελεστής κυμαίνεται από 1.3 στις χαμηλές ενέργειες, γίνεται ίσος με 3 στις μεσαίες και στις υψηλές 1.5. Όσον αφορά στην Πηγή 2, ακολουθώντας παρόμοια συμπεριφορά, ξεκινά από 1.3 για τις χαμηλές ενέργειες, έπειτα γίνεται 2 και στις υψηλές μειώνεται στο 1.5.

Στην συνέχεια, οι πειραματικές τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής που αφορούν σε σημειακές πηγές μετρημένες στην ίδια απόσταση με τις πηγές όγκου, πολλαπλασιάστηκαν με τους αντίστοιχους συντελεστές. Το γινόμενο αυτό αποτελεί τις τιμές της FEPE για τις δύο πηγές όγκου. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας μεταφοράς φαίνονται στους Πίνακες 10 και 11 για την Πηγή 1 και την Πηγή 2 αντίστοιχα. Παρακάτω, στα Γραφήματα 1 και 2, φαίνονται οι καμπύλες που προκύπτουν από τα σημεία της μεταφοράς που παρουσιάζονται στους Πίνακες 10 και 11, δηλαδή οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις γεωμετρικές όγκου. Επιπλέον με κόκκινο χρώμα σημειώνονται και τα 4 διαθέσιμα πειραματικά

σημεία, που παρουσιάζουν, όπως φαίνεται, ικανοποιητικότερη σύγκλιση με την καμπύλη.

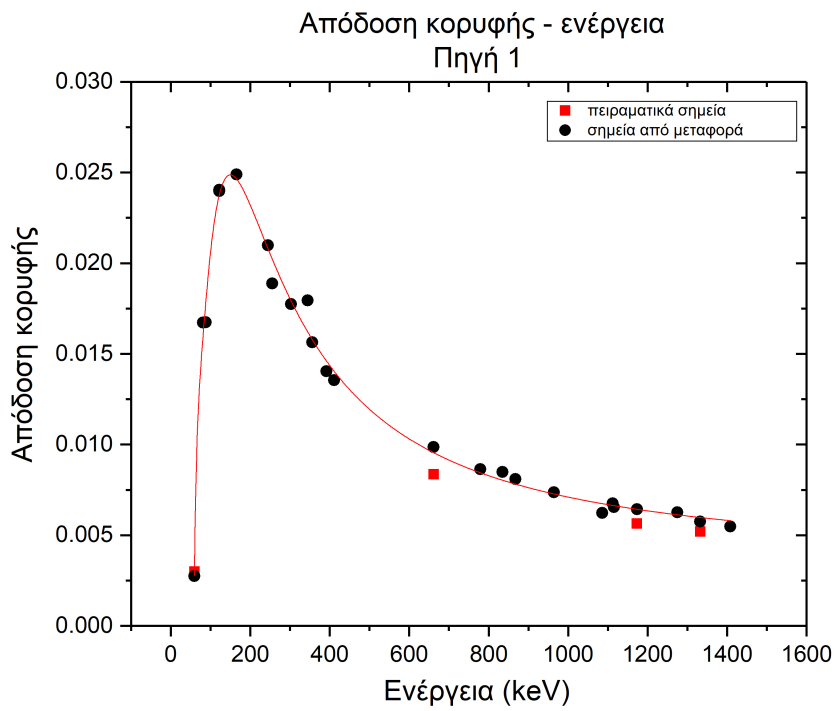
Ισότοπο	Eγ(keV)	FEPE_vol	δ(FEPE_vol)
Am-241	59.54	2.752E-03	4.145E-06
Ba-133	81	1.672E-02	1.948E-04
Cd-109	88	1.673E-02	2.053E-04
Eu-152	121.78	2.404E-02	3.114E-04
Co-57	122.1	2.398E-02	9.345E-04
Ce-139	165.8	2.489E-02	2.687E-04
Eu-152	244.7	2.098E-02	3.517E-04
Sn-113	255.1	1.888E-02	9.935E-04
Ba-133	303	1.774E-02	2.080E-04
Eu-152	344.28	1.795E-02	2.497E-04
Ba-133	356	1.564E-02	1.656E-04
Sn-113	391.6	1.404E-02	1.809E-04
Eu-152	411.12	1.355E-02	4.243E-04
Cs-137	661.6	9.858E-03	1.110E-04
Eu-152	778.9	8.637E-03	1.491E-04
Mn-54	834.8	8.481E-03	3.127E-04
Eu-152	867.37	8.104E-03	2.395E-04
Eu-152	964.08	7.361E-03	1.291E-04
Eu-152	1085.9	6.236E-03	1.305E-04
Eu-152	1112.1	6.236E-03	1.305E-04
Zn-65	1115.5	6.546E-03	7.715E-05
Co-60	1173.2	6.435E-03	8.294E-05
Na-22	1274.5	6.262E-03	7.717E-05
Co-60	1332.5	5.754E-03	7.554E-05
Eu-152	1408	5.474E-03	9.225E-05

Πίνακας 10: Τιμές απόδοσης φωτοκορυφών μετά από μεταφορά για την Πηγή 1.

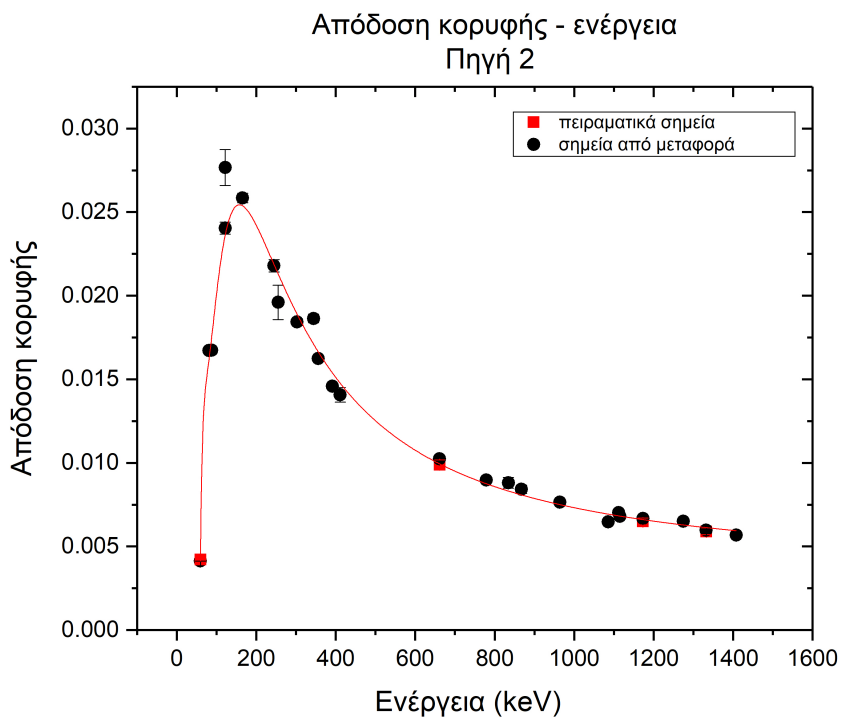
Ισότοπο	E γ (keV)	FEPE_vol	δ (FEPE_vol)
Am-241	59.54	4.128E-03	6.217E-06
Ba-133	81	1.672E-02	1.948E-04
Cd-109	88	1.673E-02	2.053E-04
Eu-152	121.78	2.774E-02	3.593E-04
Co-57	122.1	2.767E-02	1.078E-03
Ce-139	165.8	2.585E-02	2.790E-04
Eu-152	244.7	2.179E-02	3.652E-04
Sn-113	255.1	1.960E-02	1.032E-03
Ba-133	303	1.843E-02	2.161E-04
Eu-152	344.28	1.864E-02	2.593E-04
Ba-133	356	1.624E-02	1.719E-04
Sn-113	391.6	1.458E-02	1.878E-04
Eu-152	411.12	1.407E-02	4.407E-04
Cs-137	661.6	1.024E-02	1.153E-04
Eu-152	778.9	8.969E-03	1.548E-04
Mn-54	834.8	8.807E-03	3.248E-04
Eu-152	867.37	8.416E-03	2.487E-04
Eu-152	964.08	7.644E-03	1.341E-04
Eu-152	1085.9	6.476E-03	1.355E-04
Eu-152	1112.1	7.018E-03	1.273E-04
Zn-65	1115.5	6.798E-03	8.012E-05
Co-60	1173.2	6.683E-03	8.613E-05
Na-22	1274.5	6.503E-03	8.014E-05
Co-60	1332.5	5.976E-03	7.844E-05
Eu-152	1408	5.685E-03	9.580E-05

Πίνακας 11: Τιμές απόδοσης φωτοκορυφών μετά από μεταφορά για την Πηγή 2.

Παρατηρούμε πως στις μικρές ενέργειες οι τιμές της FEPE φαίνεται να παρουσιάζουν μια αυξητική τάση φτάνοντας σε κάποιο μέγιστο σημείο για ενέργειες φωτονίων περίπου 200keV, που συχνά καλείται «γρόνατο». Έπειτα, όσο η ενέργεια αυξάνεται, οι τιμές της FEPE μειώνονται και τείνουν να σταθεροποιηθούν για πολύ μεγάλες ενέργειες. Οι δύο καμπύλες έχουν την αναμενόμενη συμπεριφορά η οποία είναι ίδια ανεξαρτήτως γεωμετρίας και πυκνότητας της πηγής. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε

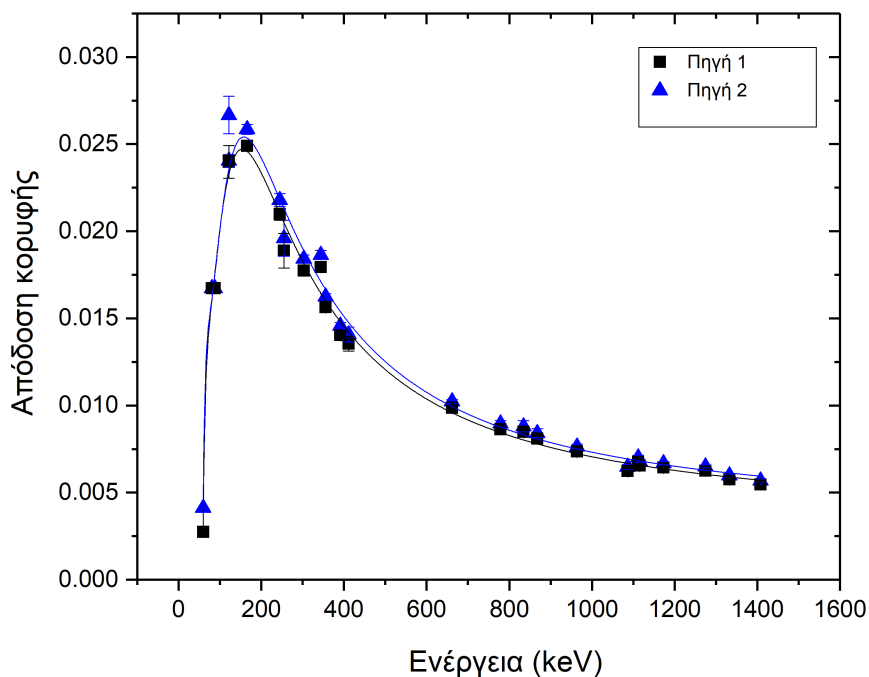


Γράφημα 1: Καμπύλη βαθμονόμησης για γεωμετρία Πηγής 1.



Γράφημα 2: Καμπύλη βαθμονόμησης για γεωμετρία Πηγής 2.

Απόδοση κορυφής - ενέργεια Σύγκριση Πηγών 1 και 2



Γράφημα 3: Σύγκριση των δύο καμπυλών βαθμονόμησης

με βάση τις καμπύλες, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα της πηγής, η απόδοση του ανιχνευτή μειώνεται. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο Γράφημα 3, όπου παρουσιάζονται μαζί οι καμπύλες που αφορούν στις δύο πηγές. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στην Πηγή 1 και η οποία έχει σαφώς μεγαλύτερη πυκνότητα από την Πηγή 2, φαίνεται να είναι ελαφρώς χαμηλότερα από την άλλη. Σημειώνεται ότι, αν και τα πειραματικά σημεία από τις πηγές όγκου ήταν πέντε στο πλήθος, στο Γραφήματα 1 και 2 φαίνονται τέσσερα κόκκινα σημεία. Αυτό συμβαίνει καθώς, στην ενέργεια που αντιστοιχεί το πρώτο πειραματικό σημείο ($E=46.6\text{keV}$), δεν υπήρχε τιμή από την βαθμονόμηση με τις σημειακές πηγές και έτσι δεν μπορούσε να γίνει η μεταφορά της καμπύλης στο σημείο αυτό για τις πηγές όγκου.

Έτσι, έχοντας παράξει τις καμπύλες βαθμονόμησης και είναι δυνατός ο υπολογισμός της τιμής της απόδοσης φωτοκορυφής για οποιαδήποτε ενέργεια φωτονίων.

4.6 Μελέτη για τον προσδιορισμό του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης

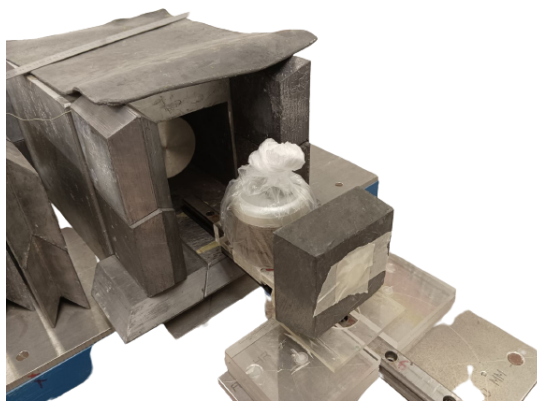
Όταν μια ακτίνα γάμμα αλληλεπιδρά με την ύλη, μπορεί να υποβληθεί σε διάφορες αλληλεπιδράσεις, συμπεριλαμβανομένης της απορρόφησης από το ίδιο το υλικό. Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης είναι ένα μέγεθος που δείχνει τον τρόπο με τον οποίο ένα υλικό εξασθενεί ή μειώνει την ένταση μιας δέσμης ακτινοβολίας καθώς διέρχεται από κάποιο υλικό. Ποσοτικοποιεί, ουσιαστικά, το ρυθμό με τον οποίο η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται ανά μοναδιαίο πάχος του υλικού.

Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης, που υποδηλώνεται από το σύμβολο μ , ορίζεται ως το κλάσμα της έντασης ακτινοβολίας που εξασθενεί ανά μονάδα απόστασης ή πάχους του υλικού. Μαθηματικά, ο συντελεστής γραμμικής εξασθένησης εκφράζεται ως:

$$\mu = \frac{-\ln \frac{I_x}{I_o}}{x}$$

όπου μ είναι ο συντελεστής γραμμικής εξασθένησης, I_x είναι η ένταση της ακτινοβολίας μετά τη διέλευση από το πάχος του υλικού, I_o είναι η αρχική ένταση της ακτινοβολίας πριν από την είσοδο στο υλικό και x το πάχος του υλικού.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προσδιορίστηκε πειραματικά ο συντελεστής αυτός για τα δύο δείγματα φωσφορίτη και φωσφογύψου. Για τον προσδιορισμό αυτό χρησιμοποιήθηκε μία σημειακή πηγή Eu-152, η οποία τοποθετήθηκε στην πίσω πλευρά ενός μολυβδένιου τούβλου στο κέντρο του



οποίου φέρεται οπή πολύ μικρής διαμέτρου έτσι ώστε η δέσμη να είναι κατευθυνόμενη. Η συγκεκριμένη πηγή επιλέχθηκε καθώς εκπέμπει ακτινοβολία γάμμα σε πολλές ενέργειες και μπορεί να προσφέρει τιμές του συντελεστή σε όλο το ενεργειακό εύρος ενδιαφέροντος.

Το Eu-152 μετρήθηκε σε απόσταση 34.5cm από το παράθυρο του ανιχνευτή για χρονικό διάστημα ίσο με 3 ώρες. Η μέτρηση αυτή επαναλήφθηκε άλλες δύο φορές: μία τοποθετώντας το δείγμα φωσφορίτη περίπου 10cm μπροστά από την διάταξη τούβλου-πηγής Eu-152 και μία τοποθετώντας στην ίδια θέση το δείγμα φωσφογύψου. Στο Σχήμα 26 φαίνεται η μέτρηση με το δείγμα φωσφορίτη τοποθετημένο μπροστά από το τούβλο πάνω στο οποίο είναι στερεωμένη η πηγή του Eu-152. Στους Πίνακες 12 και 13 φαίνονται οι τιμές του συντελεστή αυτού για διάφορες τιμές της ενέργειας για το δείγμα φωσφορίτη και φωσφογύψου αντίστοιχα.

Eγ(keV)	$\mu(cm^2/gr)$	$\delta\mu(cm^2/gr)$
121.78	2.244E-01	1.786E-02
244.7	1.769E-01	1.343E-02
344.28	1.673E-01	7.098E-03
411.12	1.564E-01	3.646E-02
443.96	9.957E-02	1.719E-02
768.9	1.031E-01	7.196E-03
867.37	3.615E-02	7.377E-03
964.08	8.851E-02	6.041E-03
1084.38	9.623E-02	9.975E-03
1112.07	1.045E-01	7.154E-03
1408.01	7.485E-02	4.546E-03

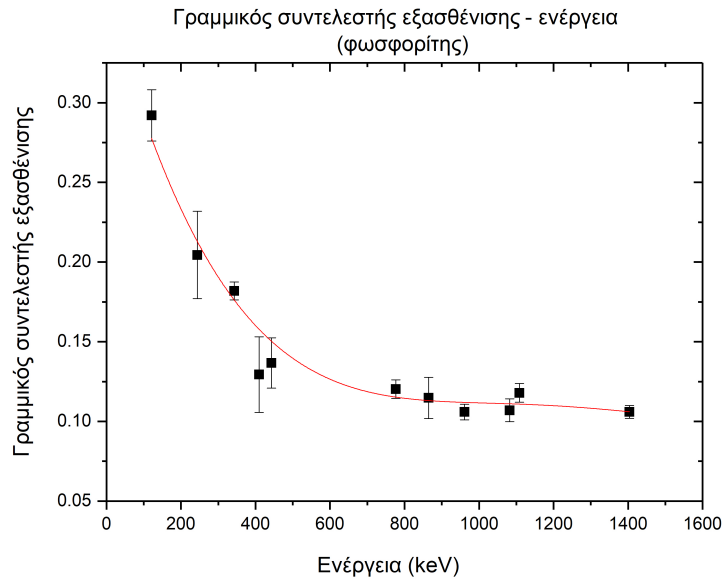
Πίνακας 12: Τιμές του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης για το δείγμα φωσφορίτη.

Eγ(keV)	$\mu(cm^2/gr)$	$\delta\mu(cm^2/gr)$
121.78	1.299E-01	5.139E-03
244.7	1.165E-01	1.101E-02
344.28	1.018E-01	3.679E-03
411.12	1.118E-01	2.674E-02
443.96	6.284E-02	1.107E-02
768.9	5.483E-02	3.569E-03
867.37	6.064E-03	1.128E-03
964.08	5.343E-02	3.365E-03
1084.38	5.005E-02	4.975E-03
1112.07	5.822E-02	3.659E-03
1408.01	3.749E-02	2.119E-03

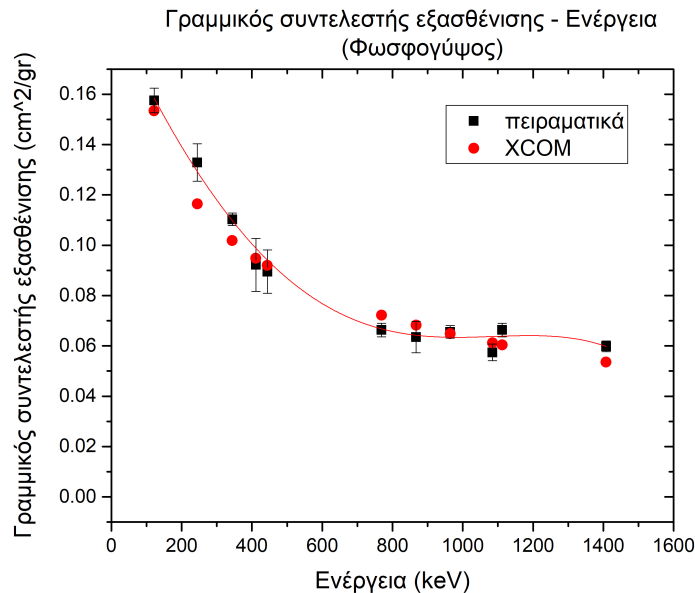
Πίνακας 13: Τιμές του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης για το δείγμα φωσφογύψου.

Ο πειραματικά προσδιορισμένος συντελεστής εξασθένησης συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων απεικονίζεται στα Γραφήματα 4 και 5 για τα δείγματα του φωσφορίτη και του φωσφογύψου, αντίστοιχα. Παρατηρούμε από τα Γραφήματα 4 και 5 ότι στο δείγμα του φωσφορίτη, οι τιμές του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης είναι σαφώς μεγαλύτερες από εκείνες στο δείγμα του φωσφογύψου, καθώς το πρώτο έχει σχεδόν την διπλάσια πυκνότητα από το δεύτερο και άρα λιγότερα φωτόνια καταφέρνουν να το διαπεράσουν. Παρατηρείται επίσης ότι στις μικρές ενέργειες ο συντελεστής έχει έντονη πτωτική τάση ενώ στις μεγάλες είναι αρκετά χαμηλότερος και τείνει να σταθεροποιηθεί. Επιπρόσθετα, στο Γράφημα 5, φαίνεται ενδεικτικά η σύγκριση του πειραματικά προσδιορισμένου συντελεστή εξασθένησης

για το δείγμα φωσφογύψου με αυτόν που υπολογίστηκε για την πηγή αποτελούμενη από SiO₂. Καθώς οι πηγές αναφοράς αποτελούνται από γνωστά υλικά, ο υπολογισμός των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης έγινε μέσω του λογισμικού XCOM της NIST. Ο λόγος που έγινε ο υπολογισμός αυτός ήταν η σύγκρισή του με τον αντίστοιχο συντελεστή που προσδιορίστηκε πειραματικά για τα δείγματα, ώστε να αξιολογηθεί η «συμβατότητα» μεταξύ δειγμάτων και πηγών αναφοράς.



Γράφημα 4: Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για το δείγμα του φωσφορίτης.



Γράφημα 5: Σύγκριση γραμμικού συντελεστή εξασθένησης για το δείγμα του φωσφογύψου με εκείνου της πηγής αναφοράς.

4.7 Μετρήσεις δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου

Τα δύο δείγματα μετρήθηκαν στην ανιχνευτική διάταξη GEM80 που περιγράφηκε παραπάνω με σκοπό τον υπολογισμό της ενεργότητάς τους. Όλες οι μετρήσεις αμφοτέρων των δειγμάτων, πραγματοποιήθηκαν σε απόσταση 1cm από το παράθυρο του ανιχνευτή και είχαν χρονική διάρκεια ίση με 24 ώρες. Στα Σχήματα 26 και 27 φαίνονται τα δείγματα να μετρούνται στον ανιχνευτή. Τόσο για το φωσφορίτη όσο και για το ο φωσφογύψο έγιναν επαναληπτικές μετρήσεις εντός διαστήματος 90 ημερών μετά το σφράγισμά τους.



Σχήμα 25: Μέτρηση του δείγματος φωσφορίτη σε απόσταση 1cm από τον ανιχνευτή.

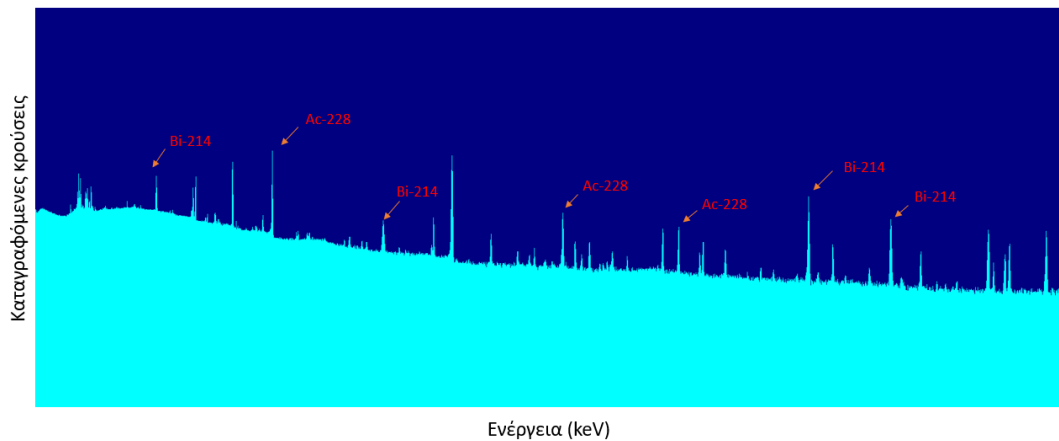


Σχήμα 26: Μέτρηση του δείγματος φωσφογύψου σε απόσταση 1cm από τον ανιχνευτή.

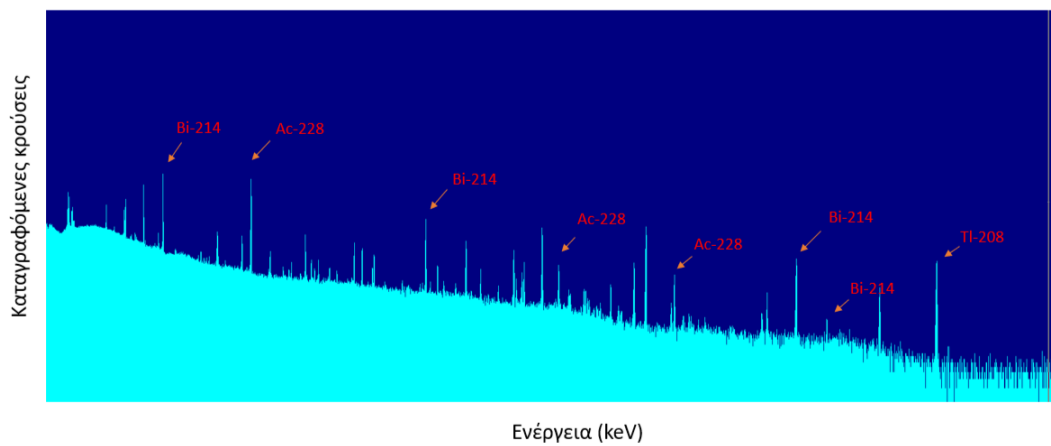
Πιο συγκεκριμένα, τα δύο δείγματα μετρήθηκαν αρχικά πριν το σφράγισμα με τη ρητίνη κι έπειτα 90 μέρες μετά το σφράγισμα με σκοπό την μελέτη της ισορροπίας των ισοτόπων. Όλα τα φάσματα αναλύθηκαν μέσω του λογισμικού Gamma Vision.

Στα Σχήματα 29 και 30 παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο φάσματα από μετρήσεις φωσφορίτη και φωσφογύψου αντίστοιχα 90 μέρες μετά το σφράγισμα.

Παρατηρείται ότι, και στις δύο περιπτώσεις, τα φάσματα έχουν μεγάλο αριθμό φωτοκορυφών. Σημειώνεται ότι τα δείγματα φωσφορίτη και φωσφογύψου αποτελούνται κυρίως από πολυενεργειακά ισότοπα των φυσικών ραδιενεργών σειρών με μερικά από αυτά να εκπέμπουν περισσότερες από 30 φωτοκορυφές. Ενδεικτικά, και στα δύο δείγματα, παρατηρούνται τα ισότοπα Ac-228, Bi-214, Th-234 και U-235 μερικές φωτοκορυφές των οποίων σημειώνονται στα φάσματα που παρουσιάζονται.



Σχήμα 27: Φάσμα από μέτρηση φωσφορίτη (90 μέρες μετά το σφράγισμα).



Σχήμα 28: Φάσμα από μέτρηση φωσφογύψου (90 μέρες μετά το σφράγισμα).

4.8 Μέτρηση υποστρώματος

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μέτρηση του υποστρώματος είναι αναπόσπαστο κομμάτι των πειραμάτων της φασματοσκοπίας-γ. Χρειάζεται, αφού μετρηθούν τα δείγματα, να ληφθεί μία μέτρηση με τον ανιχνευτή χωρίς να τοποθετηθεί δείγμα σε αυτόν. Στην περίπτωση της διπλωματικής εργασίας αυτής, η μέτρηση του υποστρώματος διήρκεσε 24 ώρες, όπως και οι μετρήσεις των δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου ενώ η ανάλυσή του έγινε πάλι με το λογισμικό Gamma Vision και ελέγχθηκε ποιες φωτοκορυφές του αντιστοιχούσαν σε φωτοκορυφές που υπήρχαν στα φάσματα των δύο δειγμάτων με σκοπό να αφαιρεθούν από αυτά.

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ MONTE CARLO

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά την μέτρηση δειγμάτων μεγάλου όγκου, παρατηρούνται διάφορα φαινόμενα για τα οποία χρειάζεται ο υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης. Οι προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται ευρέως με σκοπό τον υπολογισμό των συντελεστών αυτών. Οι συντελεστές ενδοαπορρόφησης, η βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή καθώς και οι συντελεστές διόρθωσης της πραγματικής σύμπτωσης, είναι μόνο μερικά παραδείγματα υπολογισμών κατά τους οποίους αξιοποιούνται οι προσομοιώσεις Monte Carlo. Στο παρόν Κεφάλαιο, αναλύεται η τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo, ακολουθεί ο κώδικας MCNP που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας και τέλος παρατίθεται η λεπτομερής διαδικασία προσομοίωσης της διάταξης και των δειγμάτων.

5.1 Τεχνική Monte Carlo

Οι προσομοιώσεις Monte Carlo είναι υπολογιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούν τυχαία δειγματοληψία για να μοντελοποιήσουν και να αναλύσουν πολύπλοκα συστήματα. Αυτές οι προσομοιώσεις λειτουργούν δημιουργώντας ένα μεγάλο αριθμό τυχαίων δειγμάτων ή επανάληψης προκειμένου να εκτιμηθεί η συμπεριφορά, τα αποτελέσματα ή οι πιθανότητες που συνδέονται με το σύστημα που μελετάται.

Σε μια προσομοίωση Monte Carlo, το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός του συστήματος που αποτελεί το αντικείμενο της έρευνας. Αυτό περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των μεταβλητών και των παραμέτρων που διέπουν τη συμπεριφορά του συστήματος καθώς και τη γεωμετρική περιγραφή του ίδιου του συστήματος.

Κατά τις προσομοιώσεις αυτές, η διαδρομή ενός σωματιδίου μέσα στην ύλη αντιμετωπίζεται ως μία σειρά τυχαίων διαδρομών, η κάθε μία από τις οποίες λήγει με την αλληλεπίδραση του σωματιδίου. Μόλις λοιπόν καθοριστεί το πρόβλημα, η προσομοίωση προχωρεί σε μία στατιστική δειγματοληψία, δηλαδή σε κατέπανάληψη δειγματοληπτικές τιμές, η οποία υλοποιείται με την επιλογή τυχαίων αριθμών. Η διαδικασία αυτή μπορεί να θωρηθεί αντίστοιχη με τη ρίψη ενός ζαριού σε ένα καζίνο, λόγος για τον οποίο η τεχνική πήρε το όνομα “Monte Carlo”. Κάθε τέτοια τιμή αποτελεί μία τυχαία διαδρομή ενός σωματιδίου. Στη συνέχεια, η προσομοίωση εφαρμόζει τα καθορισμένα μαθηματικά μοντέλα ή αλγόριθμους για τον υπολογισμό της απόκρισης ή των αποτελεσμάτων του συστήματος χρησιμοποιώντας τις τιμές του δείγματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται χιλιάδες φορές για να δημιουργηθεί στατιστικώς σημαντικός αριθμός δειγμάτων και ολοκληρώνεται όταν το σωματίδιο χάσει όλη την ενέργειά του ή όταν εξέλθει από τα όρια του συστήματος.

Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης καταγράφονται τα διάφορα φυσικά μεγέθη που αφορούν τη διάδοση-πορεία του σωματιδίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του συστήματος όπως η ενέργεια που απέθεσε σε συγκεκριμένη θέση

στο χώρο, γωνία εισόδου ή εξόδου από ορισμένη επιφάνεια κ.ά. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo είναι ιδιαίτερα χρήσιμες όταν οι πειραματικές λύσεις δεν είναι πρακτικές ή δεν είναι εφικτές λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος ή της αβεβαιότητας που τις συνοδεύουν.

Συνολικά, οι προσομοιώσεις Monte Carlo προσφέρουν μια αξιόπιστη και ευέλικτη προσέγγιση για τη μελέτη συστημάτων που χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα. Χρησιμοποιώντας τυχαία δειγματοληψία και στατιστική ανάλυση, οι προσομοιώσεις αυτές παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση της συμπεριφοράς διαφόρων συστημάτων σε διάφορους τομείς όπως η φυσική, η μηχανική και η βιολογία. Μερικές εφαρμογές των προσομοιώσεων Monte Carlo είναι ο υπολογισμός δόσεων, ο προσδιορισμός του παράγοντα επαύξησης της έκθεσης (exposure build-up factor), ο υπολογισμός και ο σχεδιασμός θωρακίσεων και η μελέτη και σχεδίαση συστημάτων στα οποία εμπλέκονται ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και συνεχίζουν να αναπτύσσονται και να βελτιώνονται πολλοί κώδικες που βασίζονται στην τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, για τον υπολογισμό των διορθωτικών παραγόντων και για την βαθμονόμηση του ανιχνευτή για πηγές όγκου, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MCNP και πιο συγκεκριμένα, η έκδοση 5 του κώδικα [18].

5.2 Ο κώδικας MCNP

Ο κώδικας MCNP (Monte Carlo N-Particle) είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος κώδικας για την προσομοίωση και ανάλυση της συμπεριφοράς των σωματιδίων σε σύνθετα συστήματα, ιδίως στον τομέα της πυρηνικής μηχανικής και της φυσικής ακτινοβολίας. Βασίζεται στη μέθοδο Monte Carlo και χρησιμοποιεί δειγματοληπτικές τεχνικές για την προσομοίωση αλληλεπιδράσεων και μεταφοράς σωματιδίων όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Ο κώδικας MCNP αναπτύχθηκε αρχικά τη δεκαετία του 1970 στο Εθνικό Εργαστήριο του Los Alamos στις Ηνωμένες Πολιτείες. Έκτοτε, έχει υποστεί πολυάριθμες βελτιώσεις και επικαιροποιήσεις για τη βελτίωση των δυνατοτήτων και των επιδόσεών του. Το λογισμικό έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τη συμπεριφορά διαφόρων τύπων σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων των νετρονίων, των φωτονίων, των ηλεκτρονίων και άλλων φορτισμένων σωματιδίων, καθώς αλληλεπιδρούν με την ύλη.

Ο MCNP επιτρέπει στους χρήστες να καθορίζουν λεπτομερείς γεωμετρικές, υλικά και πηγές σωματιδίων μέσα σε μία προσομοίωση. Μπορεί να χειριστεί φωτόνια και ηλεκτρόνια, οι ενέργειες των οποίων κυμαίνονται από 1keV-1000MeV και νετρόνια με ενέργειες από 10^{-11} MeV-20MeV. Παρέχει ένα φάσμα επιλογών για την μοντελοποίηση διαφόρων τύπων αλληλεπιδράσεων σωματιδίων, όπως η διασπορά, η απορρόφηση και οι πυρηνικές αντιδράσεις. Αφού «διαβάσει» το αρχείο εισόδου, επεξεργάζεται τα δεδομένα και ξεκινά να δημιουργεί ιστορίες χρησιμοποιώντας βιβλιογραφικές βιβλιοθήκες που περιέχουν δεδομένα για τις πιθανότητες αλληλεπίδρασης και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων με διαφορετικά υλικά. Έπειτα, με την λήξη των ιστοριών, υπολογίζει τα ζητούμενα μεγέθη και τα καταγράφει στο αρχείο εξόδου.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του MCNP είναι η ικανότητά του να χειρίζεται σύνθετες τρισδιάστατες γεωμετρίες, επιτρέποντας την ακριβή μοντελοποίηση των περίπλοκων συστημάτων. Χρησιμοποιείται ευρέως στον σχεδιασμό και την ανάλυση πυρηνικών αντιδραστήρων, σχεδιασμός θωράκισης ακτινοβολίας, στην ιατρική φυσική και διάφορες άλλες εφαρμογές στις οποίες η συμπεριφορά σωματιδίων και ακτινοβολίας πρέπει να κατανοηθεί και να αναλυθεί.

Ο κώδικας MCNP διαθέτει ευρεία κοινότητα χρηστών και ενημερώνεται συνεχώς. Συντηρείται από οργανισμούς όπως το National Alamos National Laboratory και το κέντρο πληροφοριών για την ασφάλεια των πληροφοριών (RSICC). Έχει καταστεί πρότυπο της βιομηχανίας για προσομοιώσεις Monte Carlo στον τομέα της πυρηνικής μηχανικής και της φυσικής ακτινοβολίας, προσφέροντας στους ερευνητές και μηχανικούς ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων σωματιδίων και της μεταφοράς ακτινοβολίας σε σύνθετα συστήματα.

5.3 Μοντελοποίηση

Η προσομοίωση των πειραματικών διατάξεων έχει ως βασική προϋπόθεση την ανάπτυξη γεωμετρικών μοντέλων στην οποία οφείλει να γίνει λεπτομερής περιγραφή της εκάστοτε διάταξης.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί αναλυτικά η μοντελοποίηση της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, καθώς επίσης των δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου και των πηγών αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται το καθένα από αυτά, με βάση τα οποία αναπτύχθηκαν τα αντίστοιχα μοντέλα..

5.3.1 Μοντελοποίηση του ανιχνευτή GEM80

Για την προσομοίωση της ανιχνευτικής διάταξης απαιτείται ακριβής προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών αυτής με σκοπό την ακριβή περιγραφή στο αρχείο εισόδου. Κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά θεωρούνται γνωστά καθώς είθισται να δίνονται από τον κατασκευαστή και άλλα θεωρούνται άγνωστα και χρειάζεται να μετρηθούν από τον πειραματιστή. Ένα μέγεθος που συχνά ο πειραματιστής καλείται να προσδιορίσει είναι η ανενεργή ή 'νεκρή' ζώνη του κρυστάλλου Γερμανίου (dead layer) και το οποίο είναι συνήθως ένα εξωτερικό περιμετρικό στρώμα του κρυστάλλου Γερμανίου. Παρά το γεγονός ότι ο κρύσταλλος του ανιχνευτή αποτελείται από υπερκαθαρό Γερμάνιο, υπάρχουν περιοχές του ενεργού όγκου του κρυστάλλου (active crystal volume) στις οποίες αν αλληλεπιδράσει κάποιο φωτόνιο, δεν θα γίνει καταγραφή αυτού σε αντίθεση με όλον τον υπόλοιπο όγκο. Οι περιοχές αυτές συνιστούν το dead layer. Στο πιστοποιητικό που δίνεται από τον κατασκευαστή, σε πολλές περιπτώσεις, δεν προσδιορίζονται τα όρια του ενεργού όγκου και του dead layer αλλά μόνο ο συνολικός όγκος που περιλαμβάνει και τα δύο. Παρόλα αυτά, ακόμα και στις περιπτώσεις όπου όλα τα στοιχεία της διάταξης είναι γνωστά, είναι επιθυμητό να ελέγχονται όσες διαστάσεις είναι δυνατόν να μετρηθούν ή να ελεγχθούν.

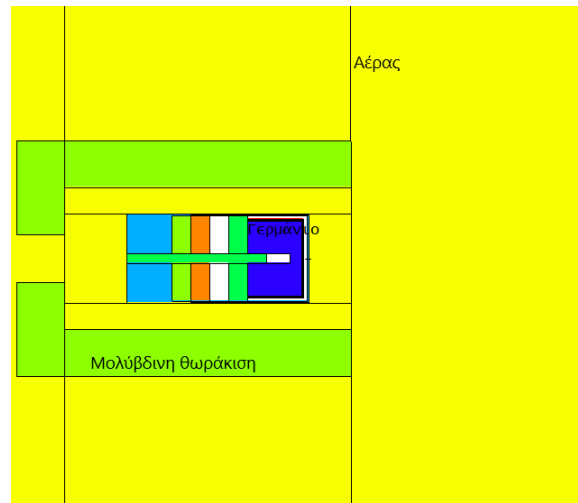
τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή GEM80 που αναγράφονταν στο πιστοποιητικό

που τον συνόδευε και το οποίο παρουσιάζεται στο Παράρτημα Δ. Μόνη εξαίρεση το πάχος της ανενεργής ζώνης (dead layer), για το οποίο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η τιμή που έχει προσδιοριστεί στα πλαίσια αντίστοιχης μελέτης (σύγκρισης προσομοιωμένων έναντι πειραματικών τιμών απόδοσης) και όχι η ονομαστική τιμή που δίνει ο κατασκευαστής. Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκαν στο αντίστοιχο μοντέλο.

Διάμετρος κρυστάλλου Γερμανίου	81.5mm
Μήκος κρυστάλλου Γερμανίου	57.7cm
Πάχος ανενεργής ζώνης	1mm
Απόσταση από παράθυρο	4mm

Πίνακας 14: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή Γερμανίου.

Σύμφωνα με τις πληροφορίες για την γεωμετρία και τα υλικά του ανιχνευτή από το πιστοποιητικό του, αναπτύχθηκε το γεωμετρικό μοντέλο της ανιχνευτικής διάταξης, του οποίου η απεικόνιση φαίνεται στο Σχήμα 29. Η απεικόνιση αυτή προκύπτει από το λογισμικό VisEdX, το οποίο περιέχεται στο πακέτο του MCNP.

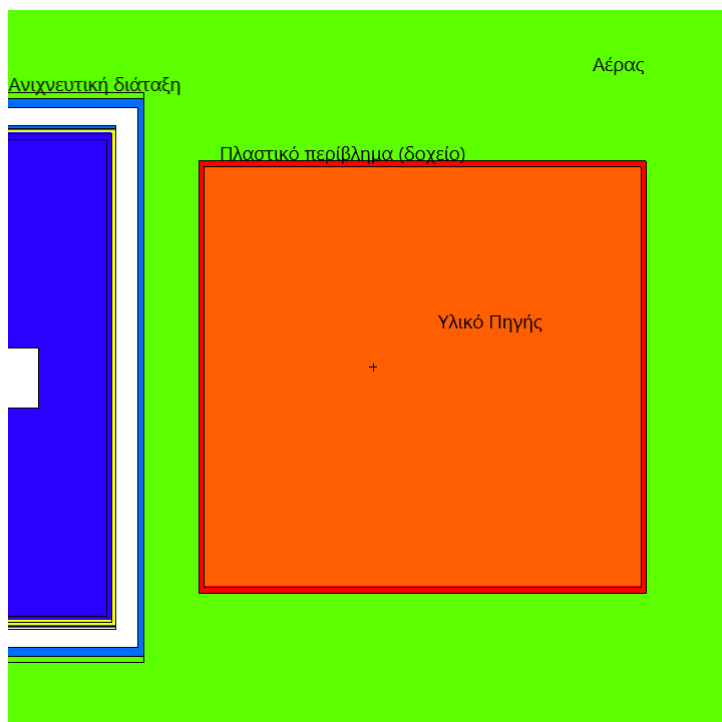


Σχήμα 29: Δισδιάστατη απεικόνιση της ανιχνευτικής διάταξης (κάτοψη).

5.3.2 Μοντελοποίηση δειγμάτων και πηγών αναφοράς

Στην παράγραφο αυτή, περιγράφεται η ανάπτυξη των μοντέλων των δύο δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου, καθώς επίσης και των πηγών αναφοράς. Για την περιγραφή αυτών χρειάστηκαν τα γεωμετρικά στοιχεία των δοχείων που τα περιέβαλαν και τα οποία είναι κοινά για όλα τα προαναφερθέντα (δείγματα και πηγές), αλλά και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τόσο τα δείγματα και οι πηγές, όσο

και τα δοχεία τους. Σε ότι αφορά τις πηγές αναφοράς, η περιγραφή τους ήταν αναγκαία για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων που θα συνέβαλλαν στην βαθμονόμηση του ανιχνευτή για τη γεωμετρία όγκου (μέσω της διαδικασίας μεταφοράς της καμπύλης απόδοσης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3). Για την περιγραφή των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών, δηλαδή την ακτίνα (τόσο εξωτερική όσο και εσωτερική) και το ύψος του δοχείου χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που είχαν γίνει για τον υπολογισμό του όγκου των δοχείων αυτών, διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.4. Τα υλικά που αποτελούν τις πηγές και το δοχείο αυτών, περιγράφηκαν σύμφωνα με πληροφορίες από τα πιστοποιητικά τους που, φαίνονται στο Παράρτημα Β. Πιο συγκεκριμένα, η Πηγή 1 αποτελείται από ένα είδος άμμου την οποία περιγράφει επαρκώς το διοξείδιο του πυριτίου με μοριακό τύπο SiO_2 . Αντίστοιχα, η Πηγή 2, περιγράφηκε ως ένα είδος ρητίνης (epoxy resin) με μοριακό τύπο $C_{21}H_{25}ClO_5$. Το υλικό του δοχείου αμφοτέρων των δειγμάτων είναι πολυαιθυλένιο (κοινό πλαστικό). Το μοντέλο της πηγής απεικονίζεται στο Σχήμα 30 όπως έχει προκύψει από το λογισμικό VisEdX.

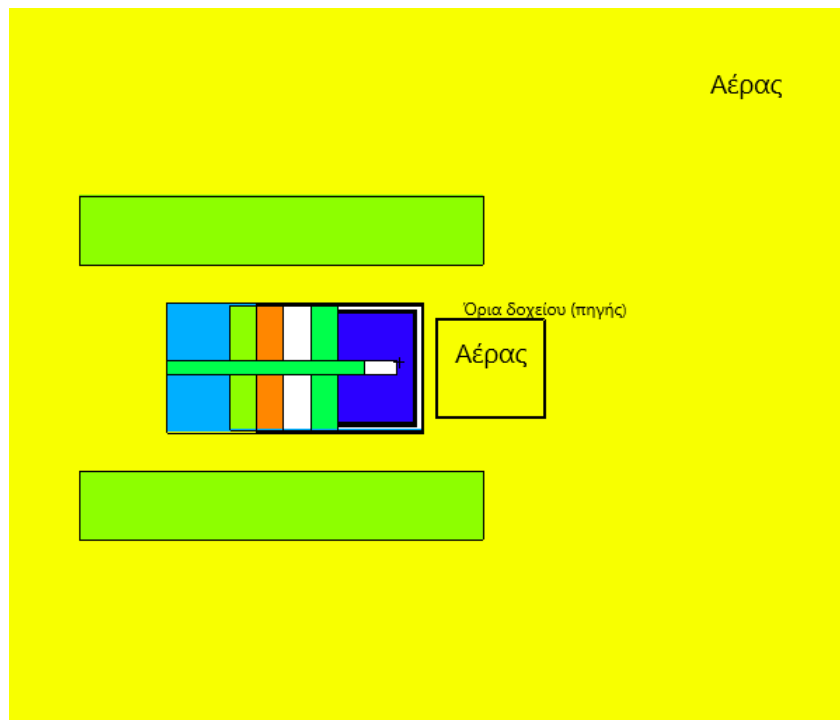


Σχήμα 30: Δισδιάστατη απεικόνιση της πηγής (τομή).

Στο παραπάνω Σχήμα φαίνεται με διαφορετικό χρώμα (κόκκινο) το περίβλημα γύρω από τον όγκο της Πηγής (πορτοκαλί). Αριστερά της Πηγής φαίνεται κομμάτι της ανιχνευτικής διάταξης.

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό του συντελεστή αυτοαπορρόφησης των ακτίνων γάμμα μέσα στο υλικό των δειγμάτων, ήταν αναγκαία η μοντελοποίηση των δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου. Καθώς το δοχείο τους είναι κοινό με εκείνο των πηγών αναφοράς, η περιγραφή του έγινε ακριβώς με τον ίδιο τρόπο. Ο ορισμός των υλικών από τα οποία αποτελούνται τα δύο δείγματα προέκυψε και πάλι από τα πιστοποιητικά αυτών που φαίνονται στο Παράρτημα Α. Για να υπολογιστεί ο συντελεστής ενδοαπορρόφησης, τα δείγματα περιγράφηκαν μία φορά με το πλαστικό περίβλημα και το υλικό του

αντίστοιχου δείγματος, και έπειτα, περιγράφηκαν θέτοντας τον αέρα ως υλικό από το οποίο αποτελείται η γεωμετρία δοχείο-δείγμα. Η δεύτερη περίπτωση φαίνεται στο Σχήμα 31 για αυτό και το εσωτερικό του δείγματος απεικονίζεται με το ίδιο χρώμα που απεικονίζεται και ο αέρας (κίτρινο). Τα αρχεία εισόδου του κώδικα MCNP με την λεπτομερή περιγραφή των δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου αλλά και μίας εκ των δύο πηγών αναφοράς φαίνονται στο Παράρτημα Δ.



Σχήμα 31: Δισδιάστατη απεικόνιση της υπο μελέτη γεωμετρίας, με τον όγκο του δείγματος πληρωμένο με αέρα (τομή).

Συγκρίνοντας λοιπόν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα δείγματα γεμισμένα με φωσφορίτη ή φωσφογύψο και αέρα, ήταν δυνατός ο υπολογισμός της ενδοαπορρόφησης των δειγμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά, συζητώνται στο Κεφάλαιο 6.

5.4 Προσομοιώσεις

Τα μοντέλα, τόσο της ανιχνευτικής διάταξης, όσο και των δειγμάτων και των πηγών, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό διαφόρων μεγεθών. Αρχικά, προσομοιώθηκαν τα δύο δείγματα φωσφορίτη και φωσφογύψου με σκοπό τον υπολογισμό του συντελεστή ενδοαπορρόφησης. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως :

$$f_{\gamma} = \frac{FEPE_{sample}}{FEPE_{air}}$$

όπου $FEPE_{sample}$ η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για το υπό μελέτη δείγμα (φωσφορίτη ή φωσφογύψου) και όπου $FEPE_{air}$ η τιμή απόδοσης φωτοκορυφής για το δείγμα γεμισμένο με αέρα. Και τα δύο μεγέθη υπολογίστηκαν με χρήση του εικονικού ανιχνευτή ύψους παλμών (pulse high Tally-f8).

Στην συνέχεια, με χρήση του μοντέλου των πηγών αναφοράς και του εικονικού ανιχνευτή ύψους παλμών, υπολογίστηκαν οι τιμές και μέσω αυτών η καμπύλη της απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας για τη γεωμετρία όγκου (γεωμετρία πηγών). Εκτός από την απόδοση φωτοκορυφής, μέσω αυτών των προσομοιώσεων, υπολογίστηκε επίσης και η ολική απόδοση του ανιχνευτή και κατασκευάστηκε η αντίστοιχη καμπύλη. Και οι δύο αυτές εξισώσεις (απόδοσης φωτοκορυφής και ολικής απόδοσης) χρειάζεται να εισαχθούν στο πρόγραμμα TrueCoinc, με σκοπό τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των διαδικασιών που περιγράφηκαν παραπάνω. Αρχικά, παρατίθενται οι συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης που υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού TrueCoinc (όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.3.3), και έπειτα οι συντελεστές διόρθωσης της ενδοαπορρόφησης που προσδιορίστηκαν μέσω του κώδικα MCNP (όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 4.3.4). Τέλος, μέσω των σχέσεων της Ενότητας 4.4, υπολογίστηκαν οι τιμές της ενεργότητας των ισotόπων των δύο δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται και σχολιάζονται στο τέλος του Κεφαλαίου αυτού.

6.1 Συντελεστές διόρθωσης φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης

Προκειμένου να διορθωθεί το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, έγινε χρήση του λογισμικού “TrueCoinc”. Το λογισμικό αυτό αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Πειραματικής Φυσικής του πανεπιστημίου Kossuth της Ουγγαρίας (S.Sudar, 2000) και χαρακτηρίζεται από το φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον του. Το πρόγραμμα αυτό, υπολογίζει συντελεστές διόρθωσης για σχηματιζόμενες φωτοκορυφές λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Οι υπολογισμοί αυτοί γίνονται με την χρήση εμπορικών βάσεων δεδομένων και οι οποίες περιέχουν όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για τα διαγράμματα διάσπασης των ισotόπων.

Ο χρήστης καλείται να εισάγει εξωτερικά, την περιγραφή της εκάστοτε εξεταζόμενης ανιχνευτικής διάταξης, γεγονός που συμβαίνει μέσω της απόδοσης φωτοκορυφής (FEPE) και της ολικής απόδοσης της διάταξης (total efficiency). Καθώς τα μεγέθη αυτά εισάγονται ως συναρτήσεις της ενέργειας, είναι προαπαιτούμενη η βαθμονόμηση τόσο απόδοσης κορυφής, όσο και ολικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης που εξετάζεται. Σχετικά με την ολική απόδοση, το πρόγραμμα δίνει την επιπλέον δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει τη συνάρτηση ως προς την ενέργεια του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση κορυφής (total-to-peak ratio) αντί της συνάρτησης του συγκεκριμένου μεγέθους με την ενέργεια, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως και στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι ευκολότερος ο υπολογισμός του συγκεκριμένου λόγου.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, η συνάρτηση της απόδοσης κορυφής προέκυψε από πειραματική βαθμονόμηση του ανιχνευτή ενώ η συνάρτηση του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση κορυφής βρέθηκε με προσομοιώσεις MCNP. Στα Σχήματα 32 και 33 φαίνονται τα «παράθυρα» του προγράμματος μέσω των οποίων γίνεται η εισαγωγή των συναρτήσεων της απόδοσης κορυφής και της ολικής απόδοσης (ή του λόγου) αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή συνέβη δύο φορές: μία για την Πηγή 1 και μία για την Πηγή 2.

Μετά την εισαγωγή των εξισώσεων αυτών, ακολουθεί η επιλογή της βάσης δεδομένων από τον χρήστη. Η επιλογή αυτή γίνεται μέσω της επιλογής Database από όπου επιλέγεται το ισotόπο για το οποίο θα υπολογιστούν οι συντελεστές διόρθωσης. Στην περίπτωση της εργασίας αυτής, χρησιμοποιήθηκε η βάση isotopedata η οποία διανέμεται μαζί με το πρόγραμμα.

Parameters for efficiency function ? X

Detector description

§1FEPE

OK

Cancel

Eff=a+b*E⁻¹+c*E⁻²+d*E⁻³+e*E⁻⁴+f*E

Emin 58 keV

a 3.19e-003 b 3.04108 c 1413.17 d -348869.

e 2.56916e f -6.28732 g 0. h 0.

Σχήμα 32: Ορισμός της συνάρτησης απόδοσης κορυφής για την Πηγή 1.

Total efficiency / peak efficiency ratio X

R=exp(a0+a1*ln(E)+a2*ln(E

Detector Description

§1TTF

a0 -44.19007 a3 2.69117

a1 40.8841 a4 -0.23641

a2 -14.9447 a5 8.14e-003

OK

Cancel

Σχήμα 33: Ορισμός της συνάρτησης του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση κορυφής για την Πηγή 1.

Ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφηκε για τις δύο Πηγές και για όλα τα ισότοπα ενδιαφέροντος, προκύπτουν οι αντίστοιχοι συντελεστές διόρθωσης. Σε ό,τι αφορά το σφάλμα των συντελεστών αυτών, θεωρείται ότι είναι ίσο με το 3% της τιμής του συντελεστή. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στους Πίνακες 15 και 16 για τον φωσφορίτη και τον φωσφογύψο αντίστοιχα.

Παρατηρείται στους Πίνακες 15-16 ότι, οι τιμές όλων των συντελεστών διόρθωσης είναι κοντά στη μονάδα. Στις περιπτώσεις όπου είναι μικρότεροι από την μονάδα, υποδηλώνεται ότι οι φωτοκορυφές υπόκεινται σε απώλειες χρούσεων (summing out) εξαιτίας της παρουσίας του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Αντίθετα, στις περιπτώσεις όπου οι τιμές των συντελεστών είναι μεγαλύτερες από την μονάδα, στις φωτοκορυφές αποδίδονται περισσότερες χρούσεις (summing in) άρα και μεγαλύτερες επιφάνειες εξαιτίας της παρουσίας του φαινομένου.

6.2 Συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της ενδοαπορρόφησης

Οι συντελεστές διόρθωσης της ενδοαπορρόφησης f_{γ} για τα δύο δείγματα φωσφορίτη και φωσφο-

Ισότοπο	E γ (keV)	f_{TCC}	δf_{TCC}
Th-234	63.29	1.000	0.030
Th-234	92.37	1.000	0.030
U-235	143.76	0.997	0.029
U-235	163.35	0.999	0.029
U-235	185.71	0.997	0.029
Ac-228	209.25	0.968	0.029
Pb-212	238.53	0.999	0.029
Pb-214	242.15	0.999	0.029
Pb-214	295.22	0.999	0.029
Pb-212	300.08	0.977	0.029
Ac-228	327.58	0.899	0.026
Ac-228	338.32	0.984	0.029
Pb-214	351.93	0.999	0.029
Tl-208	583.18	0.920	0.027
Bi-214	609.32	0.947	0.028
Bi-214	665.44	0.897	0.026
Ac-228	727.33	0.938	0.028
Bi-214	768.36	0.939	0.028
Tl-208	860.22	0.951	0.028
Ac-228	911.18	0.989	0.029
Ac-228	964.26	0.973	0.029
Ac-228	968.97	0.989	0.029
Bi-214	1120.31	0.947	0.028
Bi-214	1238.12	0.949	0.028
Bi-214	1377.66	1.009	0.030
K-40	1460.82	1.000	0.030
Ac-228	1588.2	1.002	0.030
Bi-214	1764.49	1.000	0.030
Bi-214	2204.1	1.000	0.030
Tl-208	2614.51	0.930	0.027

Πίνακας 15: Συντελεστές διόρθωσης φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης για το δείγμα φωσφορίτη.

Ισότοπο	Εγ(keV)	f_{TCC}	δf_{TCC}
Th-234	63.29	1.000	0.030
Th-234	92.37	1.000	0.030
U-235	143.76	0.996	0.029
U-235	163.35	0.999	0.029
U-235	185.71	0.996	0.029
Ac-228	209.25	0.963	0.028
Pb-212	238.53	0.999	0.029
Pb-214	242.15	0.999	0.029
Pb-214	295.22	0.999	0.029
Pb-212	300.08	0.976	0.029
Ac-228	327.58	0.981	0.029
Ac-228	338.32	0.984	0.029
Pb-214	351.93	0.999	0.029
Tl-208	583.18	0.926	0.027
Bi-214	609.32	0.939	0.028
Bi-214	665.44	0.883	0.026
Ac-228	727.33	0.929	0.027
Bi-214	768.36	0.931	0.027
Tl-208	860.22	0.959	0.028
Ac-228	911.18	0.987	0.029
Ac-228	964.26	0.969	0.029
Ac-228	968.97	0.987	0.029
Bi-214	1120.31	0.939	0.028
Bi-214	1238.12	0.942	0.028
Bi-214	1377.66	1.007	0.030
K-40	1460.82	1.000	0.030
Ac-228	1588.2	1.002	0.030
Bi-214	1764.49	0.999	0.029
Bi-214	2204.1	1.000	0.030
Tl-208	2614.51	0.921	0.027

Πίνακας 16: Συντελεστές διόρθωσης φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης για το δείγμα φωσφογύψου.

γύψου, υπολογίστηκαν μέσω προσομοιώσεων με χρήση του κώδικα MCNP. Όπως αναφέρεται και στην ενότητα 5.3.2, τα δύο δείγματα περιγράφηκαν λεπτομερώς μία φορά γεμισμένα με το αντίστοιχο υλικό και μία φορά γεμισμένα με αέρα. Στο αρχείο εξόδου της προσομοίωσης δίνεται μεταξύ άλλων η απόδοση της φωτοκορυφής. Έτσι, διαιρώντας την τιμή απόδοσης της φωτοκορυφής για το γεμισμένο με υλικό δείγμα με εκείνη για το δείγμα γεμισμένο με αέρα, υπολογίστηκαν οι τιμές των συντελεστών αυτών. Τα αρχεία, τόσο εισόδου όσο και εξόδου, φαίνονται στο Παράρτημα Γ.

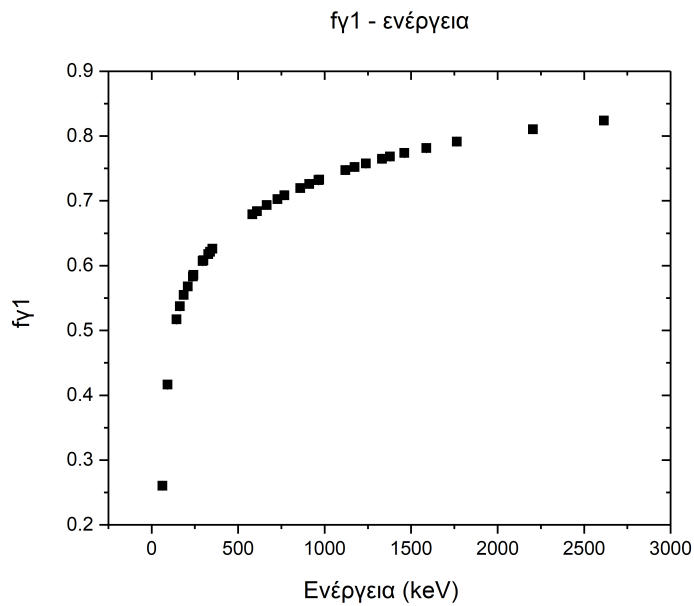
Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται οι συντελεστές f_{γ} για τα δύο δείγματα με τα σφάλματα αυτών όπως αυτά προκύπτουν από τον MCNP. Οι συντελεστές $f_{\gamma 1}$ αφορούν τον φωσφορίτη ενώ οι $f_{\gamma 2}$ τον φωσφογύψο.

Eγ (keV)	$f_{\gamma 1}$	$\delta f_{\gamma 1}$	$f_{\gamma 2}$	$\delta f_{\gamma 2}$
63.29	2.604E-01	1.668E-04	3.843E-01	2.461E-04
92.37	4.164E-01	2.082E-04	5.655E-01	2.827E-04
143.76	5.170E-01	2.585E-04	6.756E-01	3.378E-04
163.35	5.373E-01	2.686E-04	6.906E-01	2.930E-04
185.71	5.548E-01	2.774E-04	7.063E-01	2.997E-04
209.25	5.677E-01	2.409E-04	7.177E-01	3.589E-04
238.53	5.833E-01	2.916E-04	7.307E-01	3.100E-04
242.15	5.855E-01	2.927E-04	7.325E-01	3.662E-04
295.22	6.070E-01	3.035E-04	7.497E-01	3.749E-04
300.08	6.083E-01	3.042E-04	7.508E-01	3.185E-04
327.58	6.179E-01	3.496E-04	7.581E-01	4.288E-04
338.32	6.212E-01	3.978E-04	7.606E-01	4.303E-04
351.93	6.260E-01	3.130E-04	7.643E-01	3.821E-04
583.18	6.792E-01	4.803E-04	8.032E-01	5.679E-04
609.32	6.840E-01	4.932E-04	8.062E-01	5.162E-04
665.44	6.935E-01	5.001E-04	8.128E-01	5.205E-04
727.33	7.026E-01	5.487E-04	8.196E-01	6.401E-04
768.36	7.086E-01	5.535E-04	8.231E-01	5.821E-04
860.22	7.198E-01	5.622E-04	8.313E-01	6.493E-04
911.18	7.261E-01	6.695E-04	8.356E-01	7.090E-04
64.26	7.318E-01	6.747E-04	8.392E-01	7.121E-04
968.97	7.325E-01	6.301E-04	8.399E-01	6.560E-04
1120.31	7.474E-01	6.430E-04	8.499E-01	6.638E-04
1173.16	7.523E-01	6.471E-04	8.528E-01	6.661E-04
1238.12	7.575E-01	6.984E-04	8.564E-01	7.267E-04
1332.61	7.649E-01	7.052E-04	8.611E-01	7.307E-04
1377.66	7.682E-01	7.682E-04	8.633E-01	7.959E-04
1460.82	7.738E-01	7.134E-04	8.668E-01	7.992E-04
1588.2	7.813E-01	7.813E-04	8.710E-01	8.030E-04
1764.49	7.915E-01	8.414E-04	8.776E-01	8.688E-04
2204.1	8.105E-01	9.760E-04	8.844E-01	1.001E-03
2614.51	8.240E-01	1.006E-03	8.978E-01	8.888E-04

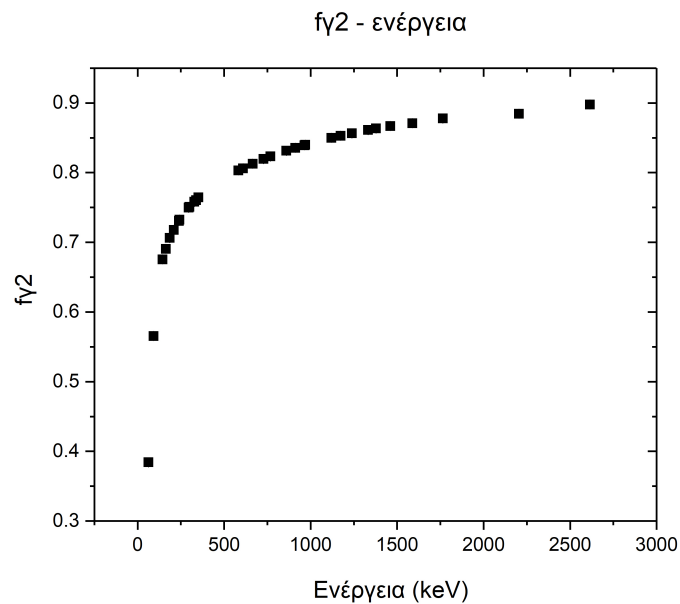
Πίνακας 17: Συντελεστές για διόρθωση φαινομένου ενδοαπορρόφησης για τα δείγματα φωσφορίτη και φωσφογύψου.

Στα Γραφήματα 6 και 7 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις των συντελεστών ενδοαπορρόφησης συναρτήσει της ενέργειας για τα δύο δείγματα.

Από τα Γραφήματα αυτά, αλλά και από τον Πίνακα 17, παρατηρείται ότι οι συντελεστές και στις δύο



Γράφημα 6: Συντελεστές διόρθωσης ενδοαπορρόφησης συναρτήσει της ενέργειας για το δείγμα του φωσφορίτη.



Γράφημα 7: Συντελεστές διόρθωσης ενδοαπορρόφησης συναρτήσει της ενέργειας για το δείγμα του φωσφογύψου.

περιπτώσεις παρουσιάζουν αυξητική τάση όσο αυξάνεται η ενέργεια των φωτονίων. Το γεγονός αυτό είναι λογικό και φανερώνει ότι, όσο η ενέργεια αυξάνεται, τόσο μικρότερο ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας απορροφάται εν μέρει ή πλήρως από το δείγμα.

Επιπλέον, στο δείγμα φωσφορίτη, οι τιμές των συντελεστών είναι μικρότεροι (πιο μακριά από τη

μονάδα) από τους αντίστοιχους του δείγματος φωσφογύψου για τις ίδιες ενέργειες. Η διαφοροποίηση αυτή μεταξύ των συντελεστών στα δύο δείγματα οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στη διαφορά των πυκνοτήτων τους. Καθώς το δείγμα φωσφορίτη έχει σαφώς μεγαλύτερη πυκνότητα από εκείνο του φωσφογύψου, είναι εύλογο να χαρακτηρίζεται από πιο έντονη ενδοαπορρόφηση.

6.3 Ενεργότητες ισοτόπων

Αφού ο υπολογισμός των συντελεστών διόρθωσης ολοκληρώθηκε, υπολογίστηκαν οι τιμές της ενεργότητας, μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε στην Ενότητα 4.4. Οι τιμές που προέκυψαν όμως, αντιστοιχούσαν η κάθε μία σε μία φωτοκορυφή και όχι σε ένα ισότοπο. Έτσι, από όλες τις φωτοκορυφές που αφορούν το ίδιο ισότοπο, και μέσω της μεθόδου του σταθμισμένου μέσου, υπολογίστηκε η τιμή της ενεργότητας για κάθε ισότοπο ξεχωριστά, τόσο για το δείγμα φωσφορίτη, όσο και του φωσφογύψου. Η μέθοδος και οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Ε. Στην συνέχεια, οι τιμές αυτές διαιρέθηκαν με τη μάζα του δείγματος φωσφορίτη και φωσφογύψου αντίστοιχα και έτσι υπολογίστηκε η ειδική ενεργότητα κατά ξηρή μάζα δείγματος (R). Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στους Πίνακες 18 και 19.

Ισότοπο	R (Bq/kg)	δR
Ac-228	42.384	2.144
Bi-214	557.267	21.359
U-235	524.255	2.443
Pb-214	345.522	26.109
Pb-212	52.121	2.794
Tl-208	16.693	0.806
K-40	30.351	1.970
Th-234	571.240	31.625

Πίνακας 18: Τιμές της ειδικής ενεργότητας ανά ξηρή μάζα στο δείγμα του φωσφορίτη.

Σημειώνεται εδώ ότι όλες οι τιμές της ειδικής ενεργότητας ανά ξηρή μάζα είναι υπολογισμένες σε κοινή ημερομηνία αναφοράς με αυτήν να είναι η 22η Δεκεμβρίου του έτους 2022. Συγκρίνοντας τις τιμές της ενεργότητας των αντίστοιχων ισοτόπων στα δύο δείγματα, φαίνεται ότι αυτές είναι σταθερά μεγαλύτερες στο δείγμα του φωσφορίτη σε σχέση με τις αντίστοιχες στο δείγμα του φωσφογύψου. Σε μερικά ισότοπα, όπως στο Ac-228 το Bi-214, το Pb-214 Tl-208 και το K-40, οι τιμές της ενεργότητας

Ισότοπο	R (Bq/kg)	δR
Ac-228	24.484	1.147
Bi-214	322.984	9.274
U-235	21.364	0.436
Pb-214	196.391	8.038
Pb-212	4.305	0.251
Tl-208	5.979	0.269
K-40	14.459	1.193
Th-234	52.306	5.243

Πίνακας 19: Τιμές της ειδικής ενεργότητας ανά ξηρή μάζα των ισοτόπων στο δείγμα του φωσφογύψου.

στο δείγμα του φωσφορίτη είναι μεγαλύτερες από τις τιμές στο δείγμα του φωσφογύψου κατά 1.7 έως 2.7 φορές. Όσον αφορά στα ισότοπα U-235, Pb-212 και Th-234, οι τιμές της ενεργότητας στο δείγμα του φωσφορίτη είναι από 10 έως και 17 φορές μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές στο άλλο δείγμα. Οι μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές της ειδικής ενεργότητας μεταξύ των ισοτόπων ενός δείγματος οφείλονται στην περιεκτικότητα των διαφόρων ισοτόπων μέσα στο δείγμα αλλά και σε άλλα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με αυτά, όπως ο χρόνος ημιζωής τους και οι ενέργειες εκπομπής τους. Οι διαφορές, τώρα, στα επίπεδα της ειδικής ενεργότητας για το ίδιο ισότοπο ανάμεσα στα δείγματα φωσφορίτη και φωσφογύψου είναι λογικές, καθώς τα επίπεδα αυτά μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με την τοποθεσία, τη γεωλογική σύνθεση και τις μεθόδους μεταποίησης που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες παραγωγής φωσφορικών και φωσφορικού οξέος. Επιβεβαιώνεται μέσω των αποτελεσμάτων στους Πίνακες 18 και 19, ότι τα δύο δείγματα έχουν σχετικά χαμηλές τιμές ενεργότητας (της τάξης των Bq/kg), καθώς όμως υπάρχει περίπτωση να εντοπιστούν σε τέτοιου είδους δείγματα επίπεδα ραδιενέργειας αρκετά υψηλά ώστε να κριθούν επικίνδυνα, είναι μεγάλης σημασίας ο έλεγχος των δειγμάτων.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής ήταν η μελέτη δειγμάτων NORM. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν με τη βοήθεια της φασματοσκοπίας γάμμα, ένα δείγμα φωσφοριτή και ένα δείγμα φωσφογύψου, υλικά που σχετίζονται αμφοτέρωθεν με τη βιομηχανία του φωσφόρου. Η μελέτη αυτή αφορούσε την κατάλληλη προετοιμασία των δειγμάτων και έπειτα τη μέτρηση των επιπέδων της ραδιενέργειας τους μέσω του ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας GEM80 που διαθέτει το εργαστήριο φασματοσκοπίας γάμμα του ΙΠΡΕΤΕΑ στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Παράλληλα, για την επίτευξη αυτής της μέτρησης, κρίθηκε απαραίτητη η βαθμονόμηση ως προς την απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης του εργαστηρίου καθώς επίσης και η χρήση κώδικα MCNP με σκοπό τη διόρθωση διαφόρων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη μέτρηση των δειγμάτων.

Με σκοπό τη διεκπεραίωση όλων των προαναφερθέντων, αρχικά τα δύο δείγματα μετρήθηκαν ως προς την υγρασία τους, τη μάζα τους και την πυκνότητά τους. Στην συνέχεια, χρειάστηκε να σφραγιστούν με στόχο τον εγκλωβισμό του αερίου ραδονίου και την ισορροπία των θυγατρικών του με τα πατρικά τους. Τα δείγματα φωσφοριτή και φωσφογύψου μετρήθηκαν στην ανιχνευτική διάταξη γερμανίου σε διάφορα διαστήματα μετά την ολοκλήρωση του σφραγίσματος, συγκεκριμένα μετά από 15, 30 και 90 μέρες. Για τον υπολογισμό της ειδικής ενεργότητας των ισοτόπων των δύο αυτών δειγμάτων ήταν απαραίτητη η διόρθωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και της ενδοαπορρόφησης των ακτίνων γάμμα μέσω κατάλληλων συντελεστών. Οι συντελεστές για την πραγματική σύμπτωση υπολογίστηκαν μέσω του ειδικού προγράμματος TrueCoins, ενώ για την ενδοαπορρόφηση μέσω του κώδικα MCNP.

Προκειμένου να παραχθούν οι καμπύλες της απόδοσης φωτοκορυφής που αντιστοιχούσαν στα δύο δείγματα όγκου, χρησιμοποιήθηκαν πηγές αναφοράς οι οποίες ήταν αντίστοιχης πυκνότητας και όγκου με αυτά των δειγμάτων. Καθώς όμως, για την παραγωγή των καμπυλών αυτών χρειάζονταν παραπάνω σημεία από εκείνα που προέκυπταν πειραματικά από τις πηγές όγκου, έγινε πάλι χρήση του κώδικα MCNP με στόχο την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων του στη διαδικασία μεταφοράς απόδοσης.

Επιπρόσθετα, προσδιορίστηκε πειραματικά ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης και για τα δύο δείγματα. Παρόλο που ο συντελεστής αυτός δεν έχει κάποια άμεση συνεισφορά στον υπολογισμό της ειδικής ενεργότητας, αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος ενός υλικού και για αυτόν τον λόγο θεωρήθηκε μεγάλης σημασίας η μελέτη του. Επιπλέον, μέσω της σύγκρισης με τον αντίστοιχο συντελεστή που υπολογίστηκε για το υλικό της πηγής, επιδιώχθηκε να διερευνηθεί η «συμβατότητα» δειγμάτων-πηγών αναφοράς.

Αφού όλα τα προηγούμενα ολοκληρώθηκαν, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η εξασθένηση των φωτονίων στο δείγμα του φωσφοριτή ήταν πολύ πιο έντονη συγκριτικά με αυτή στο δείγμα του φωσφογύψου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη πυκνότητα του πρώτου που προφανώς ευνοεί το φαινόμενο.

- Η ενδοαπορρόφηση στα δύο δείγματα είναι σε σχετικά κοντινά επίπεδα. Παρόλα αυτά, στο δείγμα του φωσφορίτη, που έχει και την μεγαλύτερη πυκνότητα, το φαινόμενο είναι πιο έντονο.
- Και στα δύο δείγματα ανιχνεύθηκαν τα ισότοπα Ac-228, Bi-214, Th-234, U-235, Pb-214, Pb-212, Tl-208 και K-40. Για το Ac-228 το Bi-214, το U-235, το Pb-212, το Pb-214 και Th-234, οι τιμές της ενεργότητας είναι σαφώς μεγαλύτερες στο δείγμα του φωσφορίτη και χαμηλότερες σε εκείνο του φωσφογύψου. Αντίθετα, όσον αφορά στο ισότοπο K-40, οι τιμές της ενεργότητας είναι υψηλότερες στο δείγμα του φωσφογύψου, γεγονός που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης καθώς δεν αναμενόταν σημαντική διαφορά ανάμεσα στα δύο δείγματα. Τέλος, για το ισότοπο Tl-208, η ενεργότητα αυτού στα δύο δείγματα φαίνεται να κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα αφού οι δύο αντίστοιχες τιμές είναι πολύ κοντά.
- Οι τιμές της ειδικής ενεργότητας ανά ξηρή μάζα υλικού των δύο δειγμάτων βρέθηκαν να είναι σχετικά χαμηλές. Είναι γνωστό ότι τα δείγματα φωσφορίτη και φωσφογύψου δεν χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας αλλά είναι ύψιστης σημασίας να μετρούνται για την ασφάλεια του περιβάλλοντος και των εργαζομένων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις σχετικές με τον φώσφορο.

Συμπερασματικά, όλη η μελέτη αυτή αφορά ένα ζήτημα που απασχολεί έντονα την επιστημονική κοινότητα και δεν είναι άλλο από την ασφάλεια του προσωπικού σε δυνητικά επικίνδυνες περιοχές, του περιβάλλοντος αλλά φυσικά και του γενικού πληθυσμού από τη φυσική ραδιενέργεια περιβάλλοντος. Φυσικά, η επαφή με τη ραδιενέργεια περιβάλλοντος είναι αναπόφευκτη, όμως κρίνεται απαραίτητη η λήψη μέτρων ασφαλείας και ο τακτικός έλεγχος του εργασιακού περιβάλλοντος όταν αυτό σχετίζεται με NORM υλικά, προκειμένου να βεβαιωθεί η καταλληλότητα των συνθηκών και να επιτευχθεί η μικρότερη δυνατή έκθεση.

Όσον αφορά στις μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αυτές θα μπορούσαν να είναι οι εξής:

- Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ενεργοτήτων των ισότοπων των δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφογύψου με εκείνα του Intercomparison: Τα αποτελέσματα από τα διάφορα εργαστήρια όπου συμμετείχαν στο Intercomparison δεν έχουν δημοσιευθεί ακόμα, με αποτέλεσμα η σύγκριση αυτή να μην μπορεί να συμβεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αλλά θα ήταν μία μελέτη μεγάλου ενδιαφέροντος για το μέλλον.
- Βάση για παρόμοιες μελέτες NORM υλικών: Υπάρχει συνεχές ενδιαφέρον για τη μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των NORM και των πιθανών κινδύνων για τα οικοσυστήματα και για την ανθρώπινη υγεία. Η ορθή διαχείριση των υλικών NORM βιομηχανίας είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη της περιβαλλοντικής μόλυνσης και την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Οι μελλοντικές μελέτες μπορούν να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών για την ασφαλή διάθεση, επεξεργασία ή ανακύκλωση αποβλήτων τέτοιων υλικών

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kefalloniti, Vasiliki, “Occupational and Public Exposure in Industries Involving NORM”, Project Work, IAEA & EEAE PGEC (2019)
- [2] C. Tan, "Big Gaps and Short Bridges: A Model for Solving the Discontinuity Problem", Answers Research Journal, vol. 9, 2016
- [3] "IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection", International Atomic Energy
- [4] US EPA, OAR. “Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM).”, www.epa.gov, 12 Nov. 2014
- [5] Zaidan, Jamal Abdul Rahman. “Natural Occurring Radioactive Materials (NORM) in the Oil and Gas Industry”, no. 1 (2010)
- [6] Arneodo, Francesco, Marco Balata, Mohamed Lotfi Benabderrahmane, Gianmarco Bruno, Adriano Di Giovanni, Osama Fawwaz, Matthias Laubenstein, Laura Manenti, Stefano Nisi, and Rüdiger B. Richter. “Characterization of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) Generated from the Lower Cretaceous Carbonate Formations in the Arabian Peninsula and Gulf.” BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte 165, no. 8 (August 2020)
- [7] J. G. Hunt, "UNSCEAR Review of Radiation Exposure due to Activities Involving NORM", in Naturally Occuring Radioactive Material (NORM VIII), Brazil, 2016
- [8] "Naturally Occuring Radioactive Material (NORM VI)", in Proceedings of an International Symposium, Morocco, 2010
- [9] RADIATION PROTECTION AND MANAGEMENT OF NORM RESIDUES IN THE PHOSPHATE INDUSTRY, International Atomic Energy Agency, Vienna 2013
- [10] A. Khachatryan, Characterization of NORMs in industrial activities, Athens, 2019
- [11] Servitzoglou, N G, S Stoulos, D Katsantonis, M Papageorgiou, and A Siountas. “NATURAL RADIOACTIVITY STUDIES OF PHOSPHATE FERTILIZERS APPLIED ON GREEK FARM SOILS USED FOR WHEAT CULTIVATION.” Radiation Protection Dosimetry 181, no. 3 (October 1, 2018)

[12] Gilmore, Gordon. Practical Gamma-Ray Spectrometry. 2nd ed. Chichester, England; Hoboken, NJ: Wiley, 2008

[13] Knoll G.F., "Radiation Detection and Measurement", John Wiley and Sons, (1989)

[14] Khandaker, Mayeen Uddin. "High Purity Germanium Detector in Gamma-Ray Spectrometry." International Journal of Fundamental Physical Sciences 1, no. 2 (June 2011)

[15] Καλαμαρά Α., ' Μέτρηση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{241}\text{Am} (\nu, 2\nu) ^{240}\text{Am}$; Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2011

[16] Sudar S., " RUECOINC, A program for calculation of true coincidence corrections for gamma rays", True Coincidence Program Version 1.01, Institute of Experimental Physics, Kossuth University, Debrecen, Hungary (2000)




[17] X-5 Monte Carlo Team, 'MCNP - A general Monte Carlo N-Particle transport code, Version 5', LA-UR-03-1987 (2003)

[18] Βασιλοπούλου Θ., "Ανάπτυξη πυρηνικών τεχνικών στοιχειωκής ανάλυσης δειγμάτων μεγάλου όγκου"; Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Ιούνιος 2012

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πιστοποιητικά δειγμάτων φωσφορίτη και φωσφο- γύψου

A1. Πιστοποιητικό δείγματος φωσφορίτη

 αναλυτικά εργαστήρια αθηνών α.ε <small>Εργαστηριακές Αναλύσεις, Μελέτες - Εφαρμογές</small>	ΕΚΘΕΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ Αρ. Έκθεσης : 22-9046-001-4066-02 Ημ/νία Έκδοσης : 15/02/2022 Αρ. Έκδοσης : 1	  Δοκιμές Αρ. Πιστ. 102
Ναυπλίου 29 • Μεταμόρφωση 144 52 Τηλ: +30 210 7470500 • Φαξ: +30 210 7470501 email: waternet@ergastiria.gr • website: www.ergastiria.gr		

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΛΑΤΗ
Πελάτης : **ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**
Διεύθυνση :

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ
Υπεύθυνος δειγματοληψίας : **ΠΕΛΑΤΗΣ**
Ημ/νία δειγματοληψίας : **20/01/2022**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ
Κωδικός δείγματος : **32034066**
Περιγραφή δείγματος : **ΤΕΡΠ 1 - PHOSPHATE ORE - M: 32.87g**
Διεξαγωγή Αναλύσεων : **ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΑΘΗΝΩΝ Α.Ε.** Ημ/νία έναρξης αναλύσεων : **20/01/2022**
Κατάσταση / Ποσότητα Δείγματος : **ΚΑΝΟΝΙΚΗ** Ημ/νία περάτωσης αναλύσεων : **11/02/2022**
Ημ/νία παραλαβής : **20/01/2022**

Παράμετρος	Μέθοδος	Μονάδα	Όριο Ανίχνευσης	Παραμετρική Τιμή	Αποτέλεσμα
Ολικός Φώσφορος (P)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	166	-	113558
Αντιμόνιο (Sb)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.1	-	1.2
Αρσενικό (As)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.1	-	5.3
Βάριο (Ba)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.8	-	21
Βόριο (B)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	51
Κάδμιο (Cd)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.05	-	14
Ασβέστιο (Ca)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	100	-	37390
Χρώμιο (Cr)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.8	-	78
Κοβάλτιο (Co)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	0.53
Χαλκός (Cu)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	1.5	-	7.3
Σίδηρος (Fe)	OE-7.0-93 (ICP-MS) *	mg/Kg	-	-	472
Μόλυβδος (Pb)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	1.15	-	< 3.75
Μαγνήσιο (Mg)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	1713
Μαγγάνιο (Mn)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.15	-	13
Υδράργυρος (Hg)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.15	-	Δεν Ανιχνεύθηκε
Μολυβδαίνιο (Mo)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.4	-	7.0
Νικέλιο (Ni)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.4	-	14
Κάλιο (K)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	821
Σελήνιο (Se)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.8	-	47
Άργυρος (Ag)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	0.39
Νάτριο (Na)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	6713
Στρόντιο (Sr)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	1439
Θάλλιο (Tl)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	3.7
Κασσίτερος (Sn)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	0.13
Τιτάνιο (Ti)	OE-7.0-93 (ICP-MS) *	mg/Kg	-	-	168
Ουράνιο (U)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	44
Βανάδιο (V)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	28

Ο Υπεύθυνος
Χημικού Εργαστηρίου



Πάυλος Νησιανάκης
DVM, Χημικός MSc

Το παρόν πιστοποιητικό φέρει ηλεκτρονική υπογραφή και δεν μπορεί να αναπαραχθεί χωρίς τη γραπτή έγκριση του εργαστηρίου, παρά μόνο σε πλήρη μορφή.
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αναφέρονται μόνο στα δείγματα που εξετάστηκαν.

Σελίδα 1 από 2

Παράμετρος	Μέθοδος	Μονάδα	Όριο Ανίχνευσης	Παραμετρική Τιμή	Αποτέλεσμα
Ψευδάργυρος (Zn)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	10	-	123

(*) Δοκιμή εκτός πεδίου διαπίστευσης.

Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην ξηρά ουσία.

ΤΕΛΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Ο Υπεύθυνος
Χημικού Εργαστηρίου



Παύλος Νησιανάκης
DVM, Χημικός MSc

Το παρόν πιστοποιητικό φέρει ηλεκτρονική υπογραφή και δεν μπορεί να αναπαραχθεί χωρίς τη γραπτή έγκριση του εργαστηρίου, παρά μόνο σε πλήρη μορφή.
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αναφέρονται μόνο στα δείγματα που εξετάσθηκαν.

Σελίδα 2 από 2

A2. Πιστοποιητικό δείγματος φωσφογύψου



Εργαστηριακές Αναλύσεις, Μελέτες - Εφαρμογές

Ναυπλίου 29 • Μεταμόρφωση 144 52
Τηλ: +30 210 7470500 • Φαξ: +30 210 7470501
email: waternet@ergastiria.gr • website: www.ergastiria.gr

ΕΚΘΕΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

Αρ. Έκθεσης : 22-9046-001-4067-02
Ημ/νία Έκδοσης : 15/02/2022

Αρ. Έκδοσης : 1



Δοκιμές
Αρ. Πιστ. 102

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΛΑΤΗ

Πελάτης : ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Διεύθυνση :

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Υπεύθυνος δειγματοληψίας : ΠΕΛΑΤΗΣ
Ημ/νία δειγματοληψίας : 20/01/2022

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Κωδικός δείγματος : 32034067
Περιγραφή δείγματος : ΤΕΡΠ 2 - PHOSPHOGYPSUM - M: 24.80g
Διεξαγωγή Αναλύσεων : ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΑΘΗΝΩΝ Α.Ε. Ημ/νία έναρξης αναλύσεων : 20/01/2022
Κατάσταση / Ποσότητα Δείγματος : ΚΑΝΟΝΙΚΗ Ημ/νία περάτωσης αναλύσεων : 11/02/2022
Ημ/νία παραλαβής : 20/01/2022

Παράμετρος	Μέθοδος	Μονάδα	Όριο Ανίχνευσης	Παραμετρική Τιμή	Αποτέλεσμα
Ολικός Φώσφορος (P)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	166	-	9965
Αντιμόνιο (Sb)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.1	-	0.88
Αρσενικό (As)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.1	-	6.2
Βάριο (Ba)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.8	-	19
Βόριο (B)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	22
Κάδμιο (Cd)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.05	-	14
Ασβέστιο (Ca)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	100	-	18970
Χρώμιο (Cr)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.8	-	7.3
Κοβάλτιο (Co)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	0.42
Χαλκός (Cu)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	1.5	-	9.6
Σίδηρος (Fe)	OE-7.0-93 (ICP-MS) *	mg/Kg	-	-	296
Μόλυβδος (Pb)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	1.15	-	< 3.75
Μαγνήσιο (Mg)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	149
Μαγγάνιο (Mn)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.15	-	10
Υδράργυρος (Hg)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.15	-	Δεν Ανιχνεύθηκε
Μολυβδαίνιο (Mo)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.4	-	1.6
Νικέλιο (Ni)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.4	-	15
Κάλιο (K)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	481
Σελήνιο (Se)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	0.8	-	52
Αργυρος (Ag)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	0.25
Νάτριο (Na)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	12486
Στρόντιο (Sr)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	1020
Θάλλιο (Tl)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	3.1
Κασσίτερος (Sn)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	0.11
Τίτανο (Ti)	OE-7.0-93 (ICP-MS) *	mg/Kg	-	-	99
Ουράνιο (U)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	4.0
Βανάδιο (V)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	-	-	3.1

Ο Υπεύθυνος
Χημικού Εργαστηρίου

Πάυλος Νησιανάκης
DVM, Χημικός MSc

Το παρόν πιστοποιητικό φέρει ηλεκτρονική υπογραφή και δεν μπορεί να αναπαραχθεί χωρίς τη γραπτή έγκριση του εργαστηρίου, παρά μόνο σε πλήρη μορφή.
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αναφέρονται μόνο στα δείγματα που εξετάστηκαν.

Σελίδα 1 από 2

Παράμετρος	Μέθοδος	Μονάδα	Όριο Ανίχνευσης	Παραμετρική Τιμή	Αποτέλεσμα
Ψευδάργυρος (Zn)	OE-7.0-93 (ICP-MS)	mg/Kg	10	-	103

(*) Δοκιμή εκτός πεδίου διαπίστευσης.

Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην ξηρά ουσία.

ΤΕΛΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Ο Υπεύθυνος
Χημικού Εργαστηρίου



Παύλος Νησιανάκης
DVM, Χημικός MSc

Το παρόν πιστοποιητικό φέρει ηλεκτρονική υπογραφή και δεν μπορεί να αναπαραχθεί χωρίς τη γραπτή έγκριση του εργαστηρίου, παρά μόνο σε πλήρη μορφή.
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αναφέρονται μόνο στα δείγματα που εξετάσθηκαν.

Σελίδα 2 από 2

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Πιστοποιητικά πηγών αναφοράς

B1. Πιστοποιητικό πηγής αναφοράς 1

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / *accredited by the*
Akkreditierungsstelle des DKD bei der
PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
Isotope Products
Valencia, California 91355
Tel: 661-309-1919

ISOTOPE: Multinuclide
ACTIVITY: 1.46 µCi
ACTIVITY: 54.0 kBq
REF DATE: 1 Mar 07
SOURCE #: 1232-29-19

CAUTION
RADIOACTIVE MATERIALS

NOT FOR DRUG USE

DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000496
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand <i>Object</i>	Multiple gamma ray emitting large volume source	Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich. This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products	
Typ <i>Type</i>	EG-ML	
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1232-29-19	
Auftraggeber <i>Customer</i>	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany	
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	110788	
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	3	
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	1 Mar 07	

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07		Catterson	

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
Burbank, CA 91504

000496
DKD-K-36901
07-03

• **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 1.7 ± 0.1 g/cc sand matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (443.6 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

• **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

• **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

• **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM08-05, Revision C "Large Volume Gamma Standards - Sand". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

• **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

• **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.4 kBq ($0.335 \mu\text{Ci}$)	518.3	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.24 kBq ($0.0335 \mu\text{Ci}$)	446.4	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.4 kBq ($0.470 \mu\text{Ci}$)	631.6	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.652 kBq ($0.0176 \mu\text{Ci}$)	558.1	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.813 kBq ($0.0220 \mu\text{Ci}$)	649.6	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.46 kBq ($0.0665 \mu\text{Ci}$)	2005	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.94 kBq ($0.0795 \mu\text{Ci}$)	1908	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.95 kBq ($0.107 \mu\text{Ci}$)	3887	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.62 kBq ($0.0708 \mu\text{Ci}$)	2230	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.28 kBq ($0.170 \mu\text{Ci}$)	5903	2.9%

000496

DKD-K-
36901

07-03

- **Uncertainty of Measurement:**

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.







15-Mar-07

Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1986. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1,000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

B2. Πιστοποιητικό πηγής αναφοράς 2

<p>DEUTSCHER KALIBRIERDIENST DKD</p> <p>Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität <i>Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux</i></p> <p>Akkreditiert durch die / <i>accredited by the</i> Akkreditierungsstelle des DKD bei der PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)</p> <p>Isotope Products Laboratories DBA Isotope Products Laboratories 24937 Avenue Tibbits Valencia, CA 91355</p>		<p>Eckert & Ziegler Isotope Products Valencia California 91355 Tel 661-309-1010</p> <p>ISOTOPE: Multinuclide ACTIVITY: 1.45 µCi ACTIVITY: 53.7 kBq REF DATE: 1 Mar 07 SOURCE #: 1232-29-4</p> <p>NOT FOR DRUG USE</p> <p>CAUTION RADIOACTIVE MATERIALS</p> <p> Deutscher Akkreditierungs- Rat DAK DKD-K-36901</p>			
<p>Kalibrierschein <i>Calibration Certificate</i></p>		<p>Kalibrierzeichen <i>Calibration label</i></p> <table border="1"> <tr><td>000485</td></tr> <tr><td>DKD-K-36901</td></tr> <tr><td>07-03</td></tr> </table>	000485	DKD-K-36901	07-03
000485					
DKD-K-36901					
07-03					
<p>Gegenstand <i>Object</i></p> <p>Hersteller <i>Manufacturer</i></p> <p>Typ <i>Type</i></p> <p>Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i></p> <p>Auftraggeber <i>Customer</i></p> <p>Auftragsnummer <i>Order No.</i></p> <p>Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i></p> <p>Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i></p>	<p>Multiple gamma ray emitting large volume source</p> <p>Eckert & Ziegler Isotope Products</p> <p>EG-ML</p> <p>1232-29-4</p> <p>Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany</p> <p>110788</p> <p>3</p> <p>1 Mar 07</p>	<p>Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI). Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich. <i>This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.</i></p> <p>Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit. <i>This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.</i></p>			
<p>Stempel <i>Seal</i></p>	<p>Datum <i>Date</i></p>	<p>Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i></p>	<p>Stellvertreter <i>Deputy</i></p>	<p>Bearbeiter <i>Person in charge</i></p>	
<p></p>	<p>15 Mar 07</p>	<p> Dr. Van Dalsem</p>	<p>Catterson</p>	<p> Catterson / Dey / Milford Van Dalsem</p>	
<p>24937 Avenue Tibbits Valencia, CA 91355</p>		<p>Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303 www.isotopeproducts.com</p>		<p>1800 North Keystone Street Burbank, CA 91504</p>	

000485

DKD-K-
36901

07-03

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 0.9 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (232.8 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibblitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-10, Revision B "Large Volume Gamma Standards - Epoxies, Low Density Using Microbubbles". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.3 kBq (0.332 μ Ci)	514.1	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	38.0	1.23 kBq (0.0332 μ Ci)	442.8	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.3 kBq (0.468 μ Ci)	628.0	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.648 kBq (0.0175 μ Ci)	554.7	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.809 kBq (0.0219 μ Ci)	646.4	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.45 kBq (0.0662 μ Ci)	1997	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.93 kBq (0.0792 μ Ci)	1902	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.92 kBq (0.106 μ Ci)	3857	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.60 kBq (0.0703 μ Ci)	2213	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.25 kBq (0.169 μ Ci)	5875	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.25 kBq (0.0878 μ Ci)	3245	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.25 kBq (0.0878 μ Ci)	3249	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.25 kBq (0.169 μ Ci)	6213	2.9%
Total:				53.7 kBq (1.45 μ Ci)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000485
DKD-K- 36901
07-03

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1,000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πιστοποιητικό ανιχνευτή γερμανίου GEM80

QUALITY ASSURANCE DATA SHEET GEM Series HPGe (High-Purity Germanium) Coaxial Detector System

Model and Serial Numbers

Detector Model No. GEM80
 Cryostat Configuration SH-GEM
 Dewar Model DWR-30
 Preamplifier Model 257P
 Preamplifier S/N 1087
 H.V. Filter Model 138
 H.V. Filter S/N 10735

Important Reference Data

Ship Date 6/4/02
 Serial No. 42-P41150A

When calling Customer Service, always reference this Detector Serial No.

Cryogenic Information

Dewar Capacity 30L Static Holding Time 14 days Detector Cool-Down Time 12 hrs

Dimensions

Crystal Diameter 81.5 mm
 Crystal Length 57.7 mm
 End Cap to Crystal 4 mm

Absorbing Layers

Aluminum 1.00 mm
 Magnesium — mm
 Inactive Germanium 700 μm

High Voltage Bias

Recommended Operating Bias, POSITIVE 2500 V

Performance Specifications*

	Warranted	Measured	Amplifier Time Constant
Resolution (FWHM) at 1.33 MeV, ⁶⁰ Co	<u>2.00</u> keV	<u>1.67</u> keV	<u>6</u> μs
Peak-to-Compton Ratio, ⁶⁰ Co	<u>77.1</u>	<u>93.1</u>	<u>6</u> μs
Relative Efficiency at 1.33 MeV, ⁶⁰ Co	<u>80</u> %	<u>85</u> %	<u>6</u> μs
Peak Shape (FWTM/FWHM), ⁶⁰ Co	<u>2.0</u>	<u>1.9</u>	<u>6</u> μs
Peak Shape (FWFM/FWHM), ⁶⁰ Co	<u>—</u>	<u>2.5</u>	<u>6</u> μs
Resolution (FWHM) at 122 keV, ⁵⁷ Co	<u>1.10</u> keV	<u>0.67</u> keV	<u>6</u> μs

Other: _____

Data Certified by: Carol DePorter

Date: 6/4/02

*Measured at a nominal rate of 1000 counts/s unless otherwise specified.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Αρχεία εισόδου και εξόδου MCNP

Δ1. Αρχείο εισόδου για το δείγμα φωσφορίτη

```

c Cell cards
c
1 3 -8.96 -1 23 -17 $ Cu rod
2 0 -1 17 -16 $ hole
3 1 -5.323 -2 18 -15 #1 #2 $ active Ge
4 1 -5.323 -3 18 -14 #1 #2 #3 $ Ge dl
5 7 -0.534 -4 18 -13 #1 #2 #3 #4 $ Lithium
6 2 -2.699 -5 18 -12 #1 #2 #3 #4 #5 $ Al housing
7 0 -6 18 -11 #1 #2 #3 #4 #5 #6 $ Detect vacuum
8 2 -2.699 -7 21 -10 #1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #9 #10 #11 $ Al end-cap
9 3 -8.96 -6 19 -18 #1 $ Cu pedestal
10 0 -6 20 -19 #1 $ Void
11 6 -1.18 -6 21 -20 #1 $ Lucite
12 4 -11.35 -6 22 -21 #1 $ Pb
13 2 -2.699 -8 23 -21 #1 #12 $ Al end-cap
14 4 -11.35 (-236 238 -29 30 -231 221 ):-42 $ Pb Shielding (p
15 4 -11.35 (-239 237 -29 30 -231 221 ):-43 $ Pb Shielding (p
16 4 -11.35 (-238 239 -32 30 -231 221 ):-41 $ Pb Shielding (p
17 4 -11.35 (-238 239 -29 31 -231 221 ):-40 $ Pb Shielding (p
18 4 -11.35 -221 222 -245 26 -29 33 $ Pb brick 1 (bac
19 4 -11.35 -221 222 -245 26 -34 30 $ Pb brick 2 (bac
20 5 -0.001205 (-8 10 -231 #23 #22 ):(-9 8 221 -231 #14 #15 $ Air (mi
#16 #17 #14 #15 #22 #23 ):(-9 231 -233 #22 #23 #17 #16 #14 #15 ):
(-9 -221 223 #18 #19 #17 #16 #14 #15 #22 #23 ):
(-8 221 -23 #17 #16 #14 #15 #22 #23 )
21 5 -0.001205 -8 7 -10 21 $ Air (middle)
22 10 -0.92 -35 36 $ plastic
23 11 -1.63 -36 $ source
24 0 9 :-223 :233 $ Outer universe

1 cx 0.5
2 cx 3.975
3 cx 4.075
4 cx 4.145
5 cx 4.195
6 cx 4.5
7 cx 4.65
8 cx 4.75
c 81 cx 1.0
9 cx 60

c
100 c/z 25 0 5.7
101 c/z 25 0 6
102 c/z 25 0 6.5

c
c Planes perpendicular to x-axis
c
10 px 0
11 px -0.1
12 px -0.5
13 px -0.503
14 px -0.573
15 px -0.673
16 px -1.903
17 px -4.343
18 px -6.343
19 px -8.343
20 px -10.343
21 px -12.343
22 px -14.343
221 px -25.5
222 px -30.5
223 px -32
23 px -19

```

```

231      px 0.5
232      px 14.5
233      px 80
c
c   Planes perpendicular to z-axis
c
234      pz 15
235      pz -15
236      pz 12.5
237      pz -12.5
238      pz 7.5
239      pz -7.5
241      pz -0.1
242      pz -0.4
243      pz 14.1
244      pz 14.6
245      pz 10
25      pz -4.9
251      pz -5.4
26      pz -10
c
c   Planes perpendicular to y-axis
c
27      py 15
28      py -15
29      py 12.5
30      py -12.5
31      py 7.5
32      py -7.5
33      py 2.5
34      py -2.5
c
c
c   Voluminous Source
c
35      rcc 5.04 0 -3.6 0 0 7.22 4.04 $outer plastic shield
36      rcc 5.04 0 -3.5 0 0 7.02 3.945 $source
37      pz -3.5
38      pz 3.5
c
39      c/z 5.04 0 3.945 $ source
40      box 0.5 12.5 -7.5 0 -5 0 4 0 0 0 0 15
41      box 0.5 -12.5 -7.5 0 5 0 4 0 0 0 0 15
42      box 0.5 12.5 7.5 0 -25 0 4 0 0 0 0 5
43      box 0.5 12.5 -7.5 0 -25 0 4 0 0 0 0 -5

mode p
c
c   material cards
c
m1      32000.          1 $ Ge
m2      13027.         1 $ Al
m3      29000.         1 $ Cu
m4      82000.         1 $ Pb p=-11.35
m5      7014.          -0.755 $ Air
          8016.          -0.232 18000.          -0.013
m6      1001.          -8.05 $ Lucite
          6012.          -59.98 8016.          -31.96
m7      3007.          -0.975 $ Lithium
          3006.          -0.025
m8      1001.          -0.08054 $ Plexiglas & lucite p=-1.18
          6000.          -0.59985 8016.          -0.31961
m9      14000.         1 $ SiO2    p=-1.25 (calculated)
          8016.         2

```

```

m10 1001.          -0.14372 $ Polyethylene p=-0.92
      6000.          -0.85628
m11 15030.         -0.7005  $Phosphate ore
      20040.         -0.23065
      26055.         -0.0029
      12024.         -0.01
      19039.         -0.005
      11022.         -0.0414
      38087.         -0.0088
imp:p 1 22r        0          $ 1, 24
c
c source specification
sdef erg=0.20925 axs=0 0 1 pos=5.04 0 -3.5 ext=d1 rad=d2

si1 0 7.02
si2 0 3.9
c
c tallies specification
c
f8:p 3
c ft8 GEB a b c $ fwhm=a+b*(E+c*E2)1/2
e8 0 3499i 2
c
c problem cut-offs
c
ctme 120

```


Δ2. Αρχείο εισόδου για το δείγμα φωσφογύψου

```

c Cell cards
c
1 3 -8.96 -1 23 -17 $ Cu rod
2 0 -1 17 -16 $ hole
3 1 -5.323 -2 18 -15 #1 #2 $ active Ge
4 1 -5.323 -3 18 -14 #1 #2 #3 $ Ge dl
5 7 -0.534 -4 18 -13 #1 #2 #3 #4 $ Lithium
6 2 -2.699 -5 18 -12 #1 #2 #3 #4 #5 $ Al housing
7 0 -6 18 -11 #1 #2 #3 #4 #5 #6 $ Detect vacuum
8 2 -2.699 -7 21 -10 #1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #9 #10 #11 $ Al end-cap
9 3 -8.96 -6 19 -18 #1 $ Cu pedestal
10 0 -6 20 -19 #1 $ Void
11 6 -1.18 -6 21 -20 #1 $ Lucite
12 4 -11.35 -6 22 -21 #1 $ Pb
13 2 -2.699 -8 23 -21 #1 #12 $ Al end-cap
14 4 -11.35 (-236 238 -29 30 -231 221):-42 $ Pb Shielding (p
15 4 -11.35 (-239 237 -29 30 -231 221):-43 $ Pb Shielding (p
16 4 -11.35 (-238 239 -32 30 -231 221):-41 $ Pb Shielding (p
17 4 -11.35 (-238 239 -29 31 -231 221):-40 $ Pb Shielding (p
18 4 -11.35 -221 222 -245 26 -29 33 $ Pb brick 1 (bac
19 4 -11.35 -221 222 -245 26 -34 30 $ Pb brick 2 (bac
20 5 -0.001205 (-8 10 -231 #23 #22 ):(-9 8 221 -231 #14 #15 $ Air (mi
#16 #17 #14 #15 #22 #23 ):(-9 231 -233 #22 #23 #17 #16 #14 #15 ):
(-9 -221 223 #18 #19 #17 #16 #14 #15 #22 #23 ):
(-8 221 -23 #17 #16 #14 #15 #22 #23 )
21 5 -0.001205 -8 7 -10 21 $ Air (middle)
22 10 -0.92 -35 36 $ plastic
23 11 -0.868 -36 $ source
24 0 9 :-223 :233 $ Outer universe

1 cx 0.5
2 cx 3.975
3 cx 4.075
4 cx 4.145
5 cx 4.195
6 cx 4.5
7 cx 4.65
8 cx 4.75
c 81 cx 1.0
9 cx 60
c
100 c/z 25 0 5.7
101 c/z 25 0 6
102 c/z 25 0 6.5
c
c Planes perpendicular to x-axis
c
10 px 0
11 px -0.1
12 px -0.5
13 px -0.503
14 px -0.573
15 px -0.673
16 px -1.903
17 px -4.343
18 px -6.343
19 px -8.343
20 px -10.343
21 px -12.343
22 px -14.343
221 px -25.5
222 px -30.5
223 px -32
23 px -19

```

```

231      px 0.5
232      px 14.5
233      px 80
c
c   Planes perpendicular to z-axis
c
234      pz 15
235      pz -15
236      pz 12.5
237      pz -12.5
238      pz 7.5
239      pz -7.5
241      pz -0.1
242      pz -0.4
243      pz 14.1
244      pz 14.6
245      pz 10
25      pz -4.9
251      pz -5.4
26      pz -10
c
c   Planes perpendicular to y-axis
c
27      py 15
28      py -15
29      py 12.5
30      py -12.5
31      py 7.5
32      py -7.5
33      py 2.5
34      py -2.5
c
c
c   Voluminous Source
c
35      rcc 5.04 0 -3.6 0 0 7.22 4.04 $outer plastic shield
36      rcc 5.04 0 -3.5 0 0 7.02 3.945 $source
37      pz -3.5
38      pz 3.5
c
39      c/z 5.04 0 3.945 $ source
40      box 0.5 12.5 -7.5 0 -5 0 4 0 0 0 0 15
41      box 0.5 -12.5 -7.5 0 5 0 4 0 0 0 0 15
42      box 0.5 12.5 7.5 0 -25 0 4 0 0 0 0 5
43      box 0.5 12.5 -7.5 0 -25 0 4 0 0 0 0 -5

mode p
c
c   material cards
c
m1      32000.          1 $ Ge
m2      13027.         1 $ Al
m3      29000.         1 $ Cu
m4      82000.         1 $ Pb p=-11.35
m5      7014.          -0.755 $ Air
          8016.          -0.232 18000.          -0.013
m6      1001.          -8.05 $ Lucite
          6012.          -59.98 8016.          -31.96
m7      3007.          -0.975 $ Lithium
          3006.          -0.025
m8      1001.          -0.08054 $ Plexiglas & lucite p=-1.18
          6000.          -0.59985 8016.          -0.31961
m9      14000.         1 $ SiO2    p=-1.25 (calculated)
          8016.         2

```

```

m10 1001.          -0.14372 $ Polyethylene p=-0.92
      6000.          -0.85628
m11 15030.         -0.229   $Phosphogypsum
      20040.         -0.4374
      26055.         -0.0068
      12024.         -0.0034
      19039.         -0.011
      11022.         -0.2879
      38087.         -0.0235
imp:p  1 22r      0           $ 1, 24
c
c source specification
sdef  erg=0.20925 axs=0 0 1 pos=5.04 0 -3.5 ext=d1 rad=d2

si1 0 7.02
si2 0 3.9
c
c tallies specification
c
f8:p  3
c ft8  GEB a b c $ fwhm=a+b*(E+c*E2)1/2
e8    0 3499i 2
c
c problem cut-offs
c
ctme 120

```

Δ3. Αρχείο εισόδου για την πηγή 1

```

c Cell cards
c
1 3 -8.96 -1 23 -17 $ Cu rod
2 0 -1 17 -16 $ hole
3 1 -5.323 -2 18 -15 #1 #2 $ active Ge
4 1 -5.323 -3 18 -14 #1 #2 #3 $ Ge dl
5 7 -0.534 -4 18 -13 #1 #2 #3 #4 $ Lithium
6 2 -2.699 -5 18 -12 #1 #2 #3 #4 #5 $ Al housing
7 0 -6 18 -11 #1 #2 #3 #4 #5 #6 $ Detect vacuum
8 2 -2.699 -7 21 -10 #1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #9 #10 #11 $ Al end-cap
9 3 -8.96 -6 19 -18 #1 $ Cu pedestal
10 0 -6 20 -19 #1 $ Void
11 6 -1.18 -6 21 -20 #1 $ Lucite
12 4 -11.35 -6 22 -21 #1 $ Pb
13 2 -2.699 -8 23 -21 #1 #12 $ Al end-cap
14 4 -11.35 (-236 238 -29 30 -231 221):-42 $ Pb Shielding (p
15 4 -11.35 (-239 237 -29 30 -231 221):-43 $ Pb Shielding (p
16 4 -11.35 (-238 239 -32 30 -231 221):-41 $ Pb Shielding (p
17 4 -11.35 (-238 239 -29 31 -231 221):-40 $ Pb Shielding (p
18 4 -11.35 -221 222 -245 26 -29 33 $ Pb brick 1 (bac
19 4 -11.35 -221 222 -245 26 -34 30 $ Pb brick 2 (bac
20 5 -0.001205 (-8 10 -231 #23 #22 ):(-9 8 221 -231 #14 #15 $ Air (mi
#16 #17 #14 #15 #22 #23 ):(-9 231 -233 #22 #23 #17 #16 #14 #15 ):
(-9 -221 223 #18 #19 #17 #16 #14 #15 #22 #23 ):
(-8 221 -23 #17 #16 #14 #15 #22 #23 )
21 5 -0.001205 -8 7 -10 21 $ Air (middle)
22 10 -0.92 -35 36 $ plastic
23 9 -1.7 -36 $ source
24 0 9 :-223 :233 $ Outer universe

1 cx 0.5
2 cx 3.975
3 cx 4.075
4 cx 4.145
5 cx 4.195
6 cx 4.5
7 cx 4.65
8 cx 4.75
c 81 cx 1.0
9 cx 60

c
100 c/z 25 0 5.7
101 c/z 25 0 6
102 c/z 25 0 6.5

c
c Planes perpendicular to x-axis
c
10 px 0
11 px -0.1
12 px -0.5
13 px -0.503
14 px -0.573
15 px -0.673
16 px -1.903
17 px -4.343
18 px -6.343
19 px -8.343
20 px -10.343
21 px -12.343
22 px -14.343
221 px -25.5
222 px -30.5
223 px -32
23 px -19

```

```

231      px 0.5
232      px 14.5
233      px 80
c
c   Planes perpendicular to z-axis
c
234      pz 15
235      pz -15
236      pz 12.5
237      pz -12.5
238      pz 7.5
239      pz -7.5
241      pz -0.1
242      pz -0.4
243      pz 14.1
244      pz 14.6
245      pz 10
25      pz -4.9
251      pz -5.4
26      pz -10
c
c   Planes perpendicular to y-axis
c
27      py 15
28      py -15
29      py 12.5
30      py -12.5
31      py 7.5
32      py -7.5
33      py 2.5
34      py -2.5
c
c
c   Voluminous Source
c
35      rcc 5.04 0 -3.6 0 0 7.22 4.04 $outer plastic shield
36      rcc 5.04 0 -3.5 0 0 7.02 3.945 $source
37      pz -3.5
38      pz 3.5
c
c 39      c/z 5.04 0 3.945 $ source
40      box 0.5 12.5 -7.5 0 -5 0 4 0 0 0 0 15
41      box 0.5 -12.5 -7.5 0 5 0 4 0 0 0 0 15
42      box 0.5 12.5 7.5 0 -25 0 4 0 0 0 0 5
43      box 0.5 12.5 -7.5 0 -25 0 4 0 0 0 0 -5

mode p
c
c   material cards
c
m1 32000.          1 $ Ge
m2 13027.          1 $ Al
m3 29000.          1 $ Cu
m4 82000.          1 $ Pb p=-11.35
m5 7014.           -0.755 $ Air
      8016.           -0.232 18000.          -0.013
m6 1001.           -8.05 $ Lucite
      6012.           -59.98 8016.          -31.96
m7 3007.           -0.975 $ Lithium
      3006.           -0.025
m8 1001.           -0.08054 $ Plexiglas & lucite p=-1.18
      6000.           -0.59985 8016.          -0.31961
m9 14000.          1 $ SiO2
      8016.           2

```

```

m10 1001.          -0.14372 $ Polyethylene p=-0.92
      6000.          -0.85628
c m11 6012.          21      $Epoxy resin (C21H25Cl05)
c      1001.          25
c      17035.         1
c      8016.          5
imp:p 1 22r        0          $ 1, 24
c
c source specification
sdef erg=0.0466 axs=0 0 1 pos=5.04 0 -3.5 ext=d1 rad=d2
si1 0 7.02
si2 0 3.9
c
c tallies specification
c
f8:p 3
c ft8 GEB a b c $ fwhm=a+b*(E+c*E2)1/2
e8 0 3198i 1.6
c
c problem cut-offs
c
ctme 120

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Μέθοδος σταθμισμένου μέσου

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ

Στο παρόν παράρτημα περιγράφεται η διαδικασία στάθμισης μιας δέσμης τιμών, ο υπολογισμός δηλαδή του σταθμισμένου μέσου των τιμών αυτών και της αντίστοιχης αβεβαιότητας, ο οποίος βασίζεται στη μεθοδολογία που προτείνεται στη βιβλιογραφία (Gilmore & Hemingway, 1995).

Έστω ότι i μετρήσεις της παραμέτρου x δίνουν

$$x_1 \pm \delta x_1, x_2 \pm \delta x_2, \dots, x_i \pm \delta x_i$$

όπου

x_1, x_2, \dots, x_i : οι μετρούμενες τιμές του μεγέθους και

$\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_i$: οι αντίστοιχες αβεβαιότητες.

Στην περίπτωση που οι αβεβαιότητες είναι ίσες μεταξύ τους, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η μέση τιμή των x_i . Αν όμως οι αβεβαιότητες διαφέρουν, δεν είναι στατιστικά σωστός ο απλοϊκός αυτός υπολογισμός, καθώς λαμβάνει εξίσου υπόψη όλες τις τιμές, ανεξαρτήτως του αν αυτές συνοδεύονται από μικρό ή μεγαλύτερο σφάλμα. Η ορθή διαδικασία είναι ο υπολογισμός του «σταθμισμένου» μέσου, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i w_i}{\sum w_i} \quad (\Gamma.1)$$

όπου

w_i : συντελεστές στάθμισης, οι οποίοι είναι ίσοι με το αντίστροφο κλάσμα της

απόκλισης της κάθε τιμής, δηλαδή $w_i = \frac{1}{(\delta x_i)^2}$.

Η τυπική απόκλιση της σταθμισμένης μέσης τιμής θα δίνεται τότε από τη σχέση:

$$\text{var}(x) = \frac{1}{\sum w_i} \quad (\Gamma.2)$$

η οποία ονομάζεται και «εσωτερική διακύμανση» (internal variance), διότι λαμβάνει υπόψη μόνο τις αβεβαιότητες των τιμών.

Διαφορετικά, αν συνυπολογιστεί και η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή, προκύπτει η «εξωτερική διακύμανση», η οποία δίνεται από τη σχέση

$$\text{var}(x) = \frac{\sum [x_i - \bar{x}]^2 w_i}{\sum w_i} \quad (\Gamma.3)$$

Ανάμεσα στις δύο, επιλέγεται η αβεβαιότητα με τη μεγαλύτερη τιμή, ώστε να αποφεύγεται υποεκτίμηση του σφάλματος. Η πλήρης έκφραση του αποτελέσματος περιλαμβάνει τελικά το σταθμισμένο μέσο και την αντίστοιχη αβεβαιότητα

$$\bar{x} \pm \text{var}(x) \quad (\Gamma.4)$$

Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος και η αβεβαιότητα δέσμης τιμών στα πλαίσια της Δ.Ε.