



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Ανάλυση Νευτρονικής Ενεργοποίησης με χρήση δεσμών ταχέων
νετρονίων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μπάρη Ζωή

Τριμελής Επιτροπή: Μ. Κόκκορης (Καθ. ΕΜΠ)

Μ. Διακάκη (Επικ. Καθ. ΕΜΠ)

Ρ. Βλαστού (Ομ. Καθ. ΕΜΠ)

Επιβλέπων Ερευνητής: Δρ. Ι. Σταματελάτος, ΕΚΕΦΕ 'Δημόκριτος'

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Σταματελάτο Έλινα, Ερευνητή Α΄ του Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α. του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» για την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κόκκορη Μιχάλη και την Ομότιμη Καθηγήτρια Δρ. Ρόζα Βλαστού- Ζάννη οι οποίοι με δέχτηκαν στην ομάδα Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Μ.Π. και με έφεραν σε επαφή με την επιστημονική έρευνα. Τους ευχαριστώ όλους για τις γνώσεις που μου προσέφεραν και τα απαραίτητα εφόδια για τη μετέπειτα πορεία μου.

Ευχαριστώ τις Δρ. Δώρα Βασιλοπούλου, Αντιγόνη Καλαμαρά και Μαρίλια Σάββα για την έμπρακτη βοήθειά τους όποτε τη χρειάστηκα.

Ευχαριστώ, επίσης, όλα τα μέλη της ομάδας Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Μ.Π. για την βοήθεια και την υποστήριξή τους.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου που είναι πάντα δίπλα μου.

Περίληψη

Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση με δέσμες ταχέων νετρονίων (Fast Neutron Activation Analysis) που παράγονται από επιταχυντή σωματιδίων έχει εφαρμοστεί για στοιχειακή ανάλυση σε μια σειρά υλικών παρά τη φτωχότερη ευαισθησία της σε σύγκριση με τις τεχνικές ανάλυσης νετρονικής ενεργοποίησης που χρησιμοποιούν σαν πηγές νετρονίων πυρηνικούς αντιδραστήρες. Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση με ταχέα νετρόνια στις εγκαταστάσεις του επιταχυντή Tandem του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος». Ο κώδικας Neutron Activation Analysis and Prognosis (NAAPRO) χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη των προϊόντων ενεργοποίησης, τις επαγόμενες ενεργότητες, τους ρυθμούς μέτρησης, τους ρυθμούς δόσης από το δείγμα, καθώς και τα ελάχιστα όρια ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης με βάση το προσομοιωμένο φάσμα των προϊόντων ενεργοποίησης για συγκεκριμένες συνθήκες ανάλυσης. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για δείγματα βιολογικών και γεωλογικών υλικών που ακτινοβολήθηκαν με δέσμη νετρονίων ενέργειας 14 MeV . Οι προγνώσεις συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα ενός προκαταρκτικού πειράματος που πραγματοποιήθηκε στον επιταχυντή Tandem του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» που αφορούσε στην ακτινοβολήση δειγμάτων υλικών αναφοράς του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IAEA) (Soil-7, A-13). Ωστόσο, λόγω τεχνικών προβλημάτων τα πειραματικά αποτελέσματα δεν μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Τα αποτελέσματα της θεωρητικής μελέτης κατέδειξαν τις δυνατότητες της ανάλυσης με ταχέα νετρόνια του επιταχυντή Tandem του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» και, επιπλέον, επέτρεψαν τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίησης με ταχέα νετρόνια, αποφεύγοντας παράλληλα την εκτέλεση δύσκολων και χρονοβόρων πειραματικών δοκιμών στην εγκατάσταση του επιταχυντή.

Abstract

Fast Neutron Activation Analysis (FNAA) using particle accelerator produced neutron beams has been applied for elemental analysis in a range of materials despite of its poorer sensitivity as compared to nuclear reactor based Neutron Activation Analysis techniques. The scope of this work was the optimization of the FNAA parameters at the NCSR Tandem accelerator facility. The Neutron Activation Analysis and Prognosis (NAAPRO) code was employed for the prediction of activation products, induced activities, count rates, dose rates from the sample, as well as minimum detection and quantification limits on the basis of the simulated spectrum of the activation products for specified analysis conditions. Simulations were performed for samples of biological and geological materials irradiated at a 14 MeV neutron beam. The predictions were compared against the results of a preliminary experiment performed at the NCSR Tandem accelerator irradiating IAEA reference material samples (Soil-7, A-13). However, technical problems at the accelerator facility did not allow us to compare the calculated and experimental results. Nevertheless, the results of the study demonstrated the fast neutron analytical capabilities of the NCSR Tandem accelerator and, moreover, allowed for the optimization of the FNAA parameters, while avoiding the performance of difficult and time-consuming experimental tests at the accelerator facility.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες

Περίληψη

Abstract

1 Εισαγωγή	12
1.1 Γενικά.....	12
1.2 Σκοπός.....	14
1.3 Δομή της εργασίας.....	14
1.4 Συνεισφορά της εργασίας.....	15
2 Ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση	16
2.1 Αρχές της Νετρονικής Ενεργοποίησης.....	16
2.2 Μέθοδος της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση.....	18
2.3 Πηγές Νετρονίων.....	19
2.3.1 Πυρηνικοί αντιδραστήρες.....	19
2.3.2 Ισοτοπικές πηγές.....	20
2.3.3 Επιταχυντές.....	20
2.4 Ανίχνευση ακτίνων γάμμα.....	22
2.4.1 Κρύσταλλος ημιαγωγού γερμανίου.....	23
2.4.2 Αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών Ge.....	23
2.4.3 Χαρακτηριστικά των ανιχνευτών.....	25
2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση.....	26
3 Μέθοδος	28
3.1 Βασικές πληροφορίες για τον κώδικα NAAPRO.....	28
3.2 Υπολογισμοί προϊόντων ενεργοποίησης.....	33
3.3 Υπολογισμοί ρυθμών αντιδράσεων.....	35
3.4 Βιβλιοθήκες δεδομένων.....	36
3.5 Αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της ανάλυσης.....	37

3.6 Δείγματα.....	39
3.7 Κύκλοι ακτινοβολήσης και μέτρησης.....	41
4 Αποτελέσματα	44
4.1 Υπολογιστικά αποτελέσματα.....	44
4.1.1 Κύκλοι ανάλυσης.....	44
4.1.2 Προσομοίωση πειράματος.....	49
5 Συμπεράσματα	57
5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	57
5.2 Προοπτικές.....	59
Βιβλιογραφία	61
Παράρτημα <i>I</i>	63
Παράρτημα <i>II</i>	81

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η ανάλυση της σύστασης δειγμάτων υλικών έχει μεγάλη σημασία και εφαρμογή σε όλα σχεδόν τα πεδία της επιστήμης και τεχνολογίας, όπως σε περιβαλλοντικές, γεωλογικές, αρχαιολογικές, βιοϊατρικές εφαρμογές, καθώς και στον ποιοτικό έλεγχο τροφίμων, ποτών, φαρμάκων ή καλλυντικών. Η ταυτοποίηση και η ποσοτικοποίηση των ουσιών σε ένα άγνωστο δείγμα ύλης επιτυγχάνεται μέσω των διάφορων αναλυτικών τεχνικών, όπως για παράδειγμα η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση.

Αναλυτική τεχνική ορίζεται ως η εφαρμογή ενός χημικού ή φυσικού φαινομένου (π.χ. απορρόφηση ή εκπομπή ακτινοβολίας) για την παροχή πληροφοριών σχετικά με τη σύσταση ενός υλικού. Κατά την ποιοτική ανάλυση ενός δείγματος, πραγματοποιείται χαρακτηρισμός των στοιχείων που υπάρχουν σε ένα άγνωστο δείγμα. Στην ποσοτική ανάλυση προσδιορίζεται ακριβώς η συγκέντρωση ενός ή περισσότερων συστατικών του δείγματος [1].

Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση αποτελεί μια πυρηνική αναλυτική τεχνική, η οποία βασίζεται στην μετατροπή σταθερών ισότοπων ενός δείγματος σε ραδιενεργά ισότοπα κατά την ακτινοβολήση του με νετρόνια [1]. Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση διακρίνεται στην ενόργανη ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση και στην ραδιοχημική ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση. Η ενόργανη νετρονική ενεργοποίηση, με την οποία θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία, εφαρμόζεται ευρύτατα για την ποιοτική και ποσοτική στοιχειακή ανάλυση δειγμάτων λόγω της εξαιρετικής ευαισθησίας που την χαρακτηρίζει. Η μάζα των δειγμάτων προς μελέτη μπορεί να είναι από μερικά μg έως μερικά kg . Το ελάχιστο όριο ανίχνευσης της τεχνικής είναι για πολλά στοιχεία της τάξης των $\mu g/kg$ - ενώ για ορισμένα άλλα μπορεί να φτάσει την τάξη των ng/kg , επομένως η τεχνική αυτή είναι ικανή να ανιχνεύσει στο επίπεδο των ιχνοστοιχείων. Επίσης, είναι μη καταστροφική μέθοδος που την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάλυση έργων τέχνης, αρχαιολογικών ευρημάτων ή γενικότερα υλικών που δεν είναι επιθυμητή η καταστροφή τους κατά την ανάλυση. Επιπλέον, καθώς δεν απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία του δείγματος, αποφεύγονται οι επιμολύνσεις αυτού. Οι παραπάνω λόγοι καθιστούν την ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση κατάλληλη να εφαρμοστεί σε ένα πλήθος επιστημονικών πεδίων, όπως για την ανάλυση περιβαλλοντικών, γεωλογικών, βιοϊατρικών δειγμάτων και βιομηχανικών προϊόντων, τροφών και ποτών [2].

Η εφαρμογή της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση για τον προσδιορισμό της στοιχειακής σύστασης ενός υλικού χρήζει λεπτομερούς διερεύνησης ώστε να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση της τεχνικής ως προς την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας της μέτρησης, την αποφυγή των παρεμβολών ή την ελαχιστοποίηση

του ορίου ανίχνευσης. Συνήθως, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ανάλυσης πραγματοποιείται βάση των γνωστών φυσικών παραμέτρων των δειγμάτων, των πυρηνικών δεδομένων και της προηγούμενης εμπειρίας. Ωστόσο, ο σημαντικότερος τρόπος βελτιστοποίησης της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση, ο οποίος βρίσκεται εφαρμογή και στην παρούσα εργασία, είναι η χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης όπως το NAAPRO (Neutron Activation Analysis PROgnosis and Optimization). Η χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος δίνει τη δυνατότητα της συστηματικής μελέτης των παραμέτρων της ανάλυσης -όπως ο χρόνος ακτινοβολήσης, ο χρόνος της μέτρησης, τα χαρακτηριστικά της διάταξης και του ανιχνευτή- της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση για συγκεκριμένα δείγματα και πεδία νετρονίων. Μέσω του κώδικα NAAPRO μπορούν να μελετηθούν τα προϊόντα της ενεργοποίησης καθώς και να επιλεγούν οι παράμετροι που επηρεάζουν το αποτέλεσμα του πειράματος για την βελτιστοποίηση της μέτρησης [6].

Στην πράξη η χρήση του κώδικα NAPRO επιτρέπει στον πειραματιστή να μελετήσει λεπτομερώς τις παραμέτρους της ανάλυσης πριν από την εκτέλεση του πειράματος. Για παράδειγμα, μπορούν να μελετηθούν οι παρεμβολές που μπορεί να προκύψουν όταν από διαφορετικά στοιχεία του δείγματος παράγονται ακτίνες γάμμα της ίδιας ή κοντινής ενέργειας με αυτή που εκπέμπεται από το ισότοπο που μας ενδιαφέρει και για να παρακαμφθεί αυτό το πρόβλημα μπορούν να επιλεγούν εναλλακτικές ακτίνες γάμμα ή να ληφθεί μέτρηση μόνο μετά την πάροδο ικανού χρόνου ώστε να ελαττωθεί η ενεργότητα του νουκλεϊδίου με το μικρότερο χρόνο ημιζωής. Ένας άλλος τρόπος ώστε να ληφθούν καλύτερα αποτελέσματα κατά την ανάλυση είναι να αυξηθεί ο αριθμός των γεγονότων για ένα δεδομένο ισότοπο, το οποίο επιτυγχάνεται αυξάνοντας την απόδοση του ανιχνευτή μετακινώντας το δείγμα πιο κοντά, αυξάνοντας τον χρόνο ακτινοβολήσης ή μειώνοντας τον χρόνο από το τέλος της ακτινοβολήσης μέχρι την αρχή της μέτρησης. Η αύξηση του αριθμού των γεγονότων που καταγράφονται στον ανιχνευτή μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του ελαχίστου ορίου ανίχνευσης για ένα συγκεκριμένο στοιχείο επειδή αυτό εξαρτάται από τον αριθμό των κρούσεων που καταγράφονται για μια συγκεκριμένη ακτίνα γάμμα και από το υπόβαθρο στη συγκεκριμένη κορυφή. Η ευαισθησία μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση των γεγονότων ή με την αύξηση του χρόνου μέτρησης. Ο πιο σημαντικός περιορισμός όμως της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση είναι ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την ακτινοβολήση του δείγματος στο πεδίο νετρονίων και με την μέτρηση της ακτινοβολίας-γ. Επομένως, η χρήση του κώδικα NAPRO επιτρέπει την επιλογή του βέλτιστου χρονικού κύκλου ακτινοβολήσης – μέτρησης ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος ανάλυσης για το συγκεκριμένο στοιχείο ή στοιχεία του δείγματος που ενδιαφέρουν. Τα ραδιενεργά ισότοπα που προκύπτουν κατά την ενεργοποίηση μπορούν επομένως να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον χρόνο ημιζωής τους και τα νουκλίδια που είναι επιθυμητά ώστε να αναλυθούν.

Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση πραγματοποιείται συνήθως με τη χρήση νετρονίων που παράγονται σε ερευνητικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες αξιοποιώντας την υψηλή ροή θερμικών νετρονίων. Ωστόσο, η ελάττωση του αριθμού

των διαθέσιμων ερευνητικών αντιδραστήρων που δίνουν τη δυνατότητα εκτέλεσης πειραμάτων ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση δημιούργησε την ανάγκη εξέτασης εναλλακτικών πηγών νετρονίων όπως για παράδειγμα επιταχυντών, γεννητριών ή ισοτοπικών πηγών νετρονίων που ωστόσο παρέχουν χαμηλότερες ροές ταχέων νετρονίων.

1.2 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των δυνατοτήτων ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση που παρέχονται από ακτινοβόληση δειγμάτων σε πεδίο ταχέων νετρονίων ενέργειας 14 MeV . Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί με τη χρήση του κώδικα NAAPRO για δύο υλικά αναφοράς, ένα βιολογικό (IAEA-A-13) και ένα γεωλογικό (IAEA-SOIL-7). Τα δύο αυτά υλικά μελετήθηκαν σε 5 κύκλους όπου κάθε φορά διέφεραν οι χρόνοι ακτινοβόλησης, αναμονής μέχρι την αρχή της μέτρησης και μέτρησης και για κάθε κύκλο καθορίστηκαν τα νουκλίδια τα οποία μπορούν να ανιχνευτούν για κάθε συνθήκη αλλά και τα ελάχιστα όρια ανίχνευσης, τα όρια της μέτρησης και τα όρια ποσοτικοποίησης των νουκλεϊδίων.

Επιπλέον, έγινε προσπάθεια σύγκρισης των προβλέψεων με τα αποτελέσματα ενός προκαταρκτικού πειράματος που πραγματοποιήθηκε στον επιταχυντή Tandem του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής (ΙΠΣΦ) του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

1.3 Δομή της εργασίας

Στην εργασία παρουσιάζεται αρχικά η περιγραφή της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση καθώς και οι διάφορες μορφές με τις οποίες μπορεί να υλοποιηθεί η τεχνική αυτή (Κεφάλαιο 2). Παρατίθενται πληροφορίες για τη μέθοδο και συγκεκριμένα πως υπολογίζονται τα προϊόντα ενεργοποίησης και οι ρυθμοί αντίδρασης. Γίνεται μια σύντομη αναφορά στην ακτινοβόληση υλικών με νετρόνια, η οποία προσομοιώνεται με τον κώδικα NAAPRO και δίνονται απαραίτητες πληροφορίες για τις λειτουργίες του και τα βήματα που ακολουθήθηκαν. Επιπλέον παρουσιάζονται οι βιβλιοθήκες δεδομένων καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση των αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 3). Στη συνέχεια, ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν (Κεφάλαιο 4). Γίνεται συνολική συζήτηση επί των αποτελεσμάτων και παρατίθενται τα συμπεράσματα από τη συνολική μελέτη και εξετάζεται η επίτευξη του στόχου της παρούσας εργασίας (Κεφάλαιο 5). Στα πλαίσια της εργασίας έγινε μια προσπάθεια να επιβεβαιωθούν πειραματικά τα αποτελέσματα όπως παρουσιάζεται στο Παράρτημα I όπου παρουσιάζεται η διάταξη του επιταχυντή tandem και των ανιχνευτών γερμανίου που χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση των θεωρητικών

αποτελεσμάτων και ακολουθούν τα πειραματικά αποτελέσματα και γίνεται ο σχολιασμός τους.

1.4 Συνεισφορά της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελεί συστηματική μελέτη των δυνατοτήτων ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση με ταχεία νετρόνια στον επιταχυντή TANDEM του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» για εφαρμογές στην βιοϊατρική και γεωλογία. Τα αποτελέσματα της εργασίας θα προσφέρουν στους ερευνητές που πρόκειται να χρησιμοποιήσουν τον επιταχυντή για την πραγματοποίηση πειραμάτων ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση τα απαραίτητα θεωρητικά δεδομένα για να επιλέξουν τις παραμέτρους ακτινοβολήσης και μέτρησης των δειγμάτων ώστε να επιτύχουν την βελτιστοποίηση της πειραματικής διαδικασίας.

Επιπλέον, η παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη μελέτη άγνωστων δειγμάτων με την τεχνική της νετρονικής ενεργοποίησης παρόμοιας μήτρας όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δείγματα που μελετήθηκαν ως δείγματα αναφοράς για την ταυτοποίηση των στοιχείων καθώς και για τον ποσοτικό προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των στοιχείων του άγνωστου δείγματος μέσω σύγκρισης.

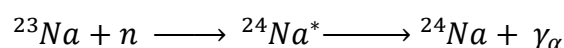
Κεφάλαιο 2: Ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση

2.1 Αρχές της Νετρονικής Ενεργοποίησης

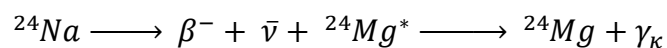
Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση (Neutron Activation Analysis, N.A.A.) είναι μια αναλυτική τεχνική η οποία βασίζεται στη μέτρηση της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας γάμμα των ραδιονουκλιδίων που παράγονται κατά την ακτινοβόληση ενός υλικού με νετρόνια επιτρέποντας έτσι την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των στοιχείων του δείγματος. Σαν πηγή νετρονίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν πυρηνικοί αντιδραστήρες, επιταχυντές ή ισοτοπικές πηγές νετρονίων. Τα προϊόντα της ενεργοποίησης τα οποία είναι δυνατό να ανιχνευτούν είναι είτε η ακτινοβολία- γ που εκπέμπεται σχεδόν στιγμιαία κατά τη σύλληψη των νετρονίων (Prompt Gamma Neutron Activation Analysis. P.G.N.A.A.), είτε η ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων που προέκυψαν από την ακτινοβόληση (Delayed Gamma Neutron Activation Analysis D.G.N.A.A.). Η νετρονική ενεργοποίηση είναι μια ευαίσθητη, πολύ ακριβής και μη καταστροφική τεχνική που έχει βρει εφαρμογή σε όλους σχεδόν τους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας όπως για παράδειγμα η αρχαιομετρία, η μελέτη του περιβάλλοντος και η βιοϊατρική.

Κατά τη νετρονική ενεργοποίηση, στις περισσότερες εφαρμογές, η πυρηνική αντίδραση η οποία λαμβάνει χώρα είναι η σύλληψη νετρονίου ή η αντίδραση (n,γ) . Τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες του δείγματος-στόχου με σκέδαση ή με απορρόφηση. Κατά την αλληλεπίδραση, λοιπόν, των νετρονίων με τον πυρήνα-στόχο δημιουργείται ένας σύνθετος πυρήνας σε διεγερμένη κατάσταση. Ο σύνθετος πυρήνας θα αποδιεγερθεί σχεδόν στιγμιαία σε ένα σταθερό ή ραδιενεργό πυρήνα μέσω της εκπομπής χαρακτηριστικών άμεσων ακτίνων γάμμα. Αυτή η ακτινοβολία μπορεί να ανιχνευτεί κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης (P.G.N.A.A.). Αν ο πυρήνας είναι ραδιενεργός τότε αποδιεγείρεται, με χαρακτηριστικό χρόνο ημιζωής, εκπέμποντας ένα σωματίδιο β και εκπέμπονται ακτίνες γάμμα οι οποίες μπορούν να ανιχνευτούν μετά το τέλος της ακτινοβόλησης του δείγματος. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από την ανίχνευση των χρονικά καθυστερημένων ακτίνων γάμμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για τον ποιοτικό προσδιορισμό όσο και για τον ακριβή ποσοτικό προσδιορισμό των στοιχείων του δείγματος (D.G.N.A.A.). Οι ενέργειες των ακτίνων γάμμα που εκπέμπονται είναι χαρακτηριστικές του ισοτόπου και μέσω αυτών είναι δυνατό να προσδιοριστούν τα στοιχεία που περιέχονται στο δείγμα. Η ποσότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται είναι ανάλογη με τον αριθμό των ραδιενεργών πυρήνων που παράγονται (και διασπώνται) αλλά και με τον αριθμό των πυρήνων των σταθερών ισοτόπων, άρα με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι ποσότητες των στοιχείων του δείγματος [1],[3].

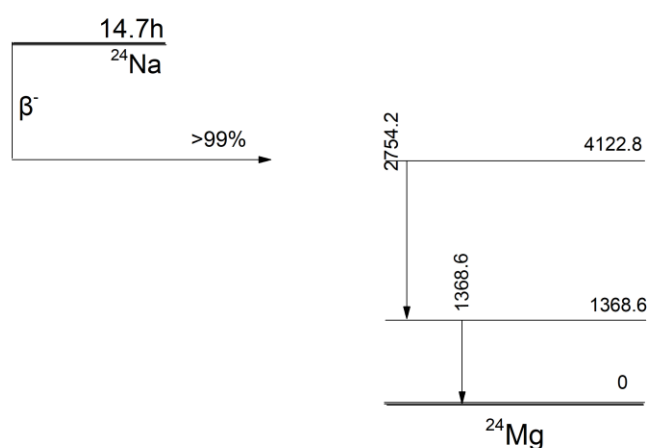
Παρακάτω δίνεται ως παράδειγμα η ενεργοποίηση του Na:



Όπου γ_{α} είναι η άμεση ακτινοβολία γάμμα.

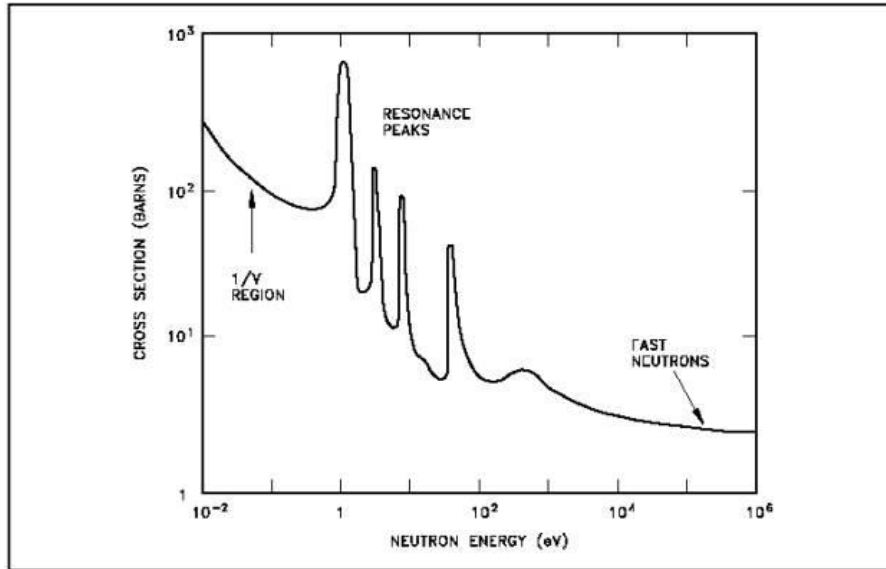


Όπου γ_{κ} είναι η ακτινοβολία που εκπέμπεται με χρονική καθυστέρηση.



Διάγραμμα 2.1: Ενεργειακό διάγραμμα για τις διασπάσεις του ^{24}Na . Οι ενέργειες δίνονται σε keV. Παρατηρούμε ότι κατά τη διάσπαση εκπέμπονται δύο φωτόνια ενέργειας 2754.2 και 1368.6 keV

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός νετρονίου με έναν πυρήνα είναι συνάρτηση της ενέργειας των νετρονίων. Όσο η ενέργεια των νετρονίων αυξάνεται στο διάγραμμα των ενεργών διατομών εμφανίζονται κορυφές συντονισμού όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.2, δηλαδή κορυφές στις οποίες η ενεργός διατομή των νετρονίων μπορεί να είναι πολύ υψηλή για μια ορισμένη ενέργεια.



Διαγραμμα 2.2: Ενεργός διατομή συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων [18]

2.2 Μέθοδος της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση

Ο ρυθμός διασπάσεων ενός συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου, οποιαδήποτε χρονική στιγμή t κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης δίνεται από τη σχέση

$$\frac{dN}{dt} = N\Phi\sigma - \lambda N \quad (2.1)$$

όπου N : ο αριθμός των πυρήνων του στόχου, Φ : η ροή των νετρονίων η οποία συνήθως δίνεται σε μονάδες $cm^{-2} \cdot s^{-1}$, σ : η ενεργός διατομή σε μονάδες cm^{-2} , λ : η σταθερά διάσπασης (s^{-1}) και t : ο χρόνος ακτινοβόλησης (s). [1] Η σταθερά διάσπασης συνδέεται με τον χρόνο ημιζωής με τη σχέση

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.2)$$

Εάν ο χρόνος ακτινοβόλησης είναι πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο ημιζωής τότε ο ρυθμός παραγωγής με τον ρυθμό αποσύνθεσης βρίσκονται σε ισορροπία και η περαιτέρω ακτινοβόληση δε θα οδηγήσει σε αλλαγή της ενεργότητας των νουκλιδίων ενδιαφέροντος.

Ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων στο τέλος της ακτινοβόλησης δίνεται από τη σχέση

$$N_e = \frac{R}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (2.3)$$

όπου t_i είναι ο χρόνος της ακτινοβόλησης. Η μέτρηση ενός δείγματος το οποίο ακτινοβολήθηκε και μετατράπηκε σε ραδιενεργό δεν ξεκινάει απευθείας μετά το τέλος της ακτινοβόλησης. Επομένως, ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων αφού έχει επέλθει κάποιος χρόνος από το τέλος της ακτινοβόλησης (t_d) δίνεται από τη σχέση

$$N_c = \frac{R}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} \quad (2.4)$$

Ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων σχετίζεται με την ενεργότητα (A)

$$A = \lambda N \quad (2.5)$$

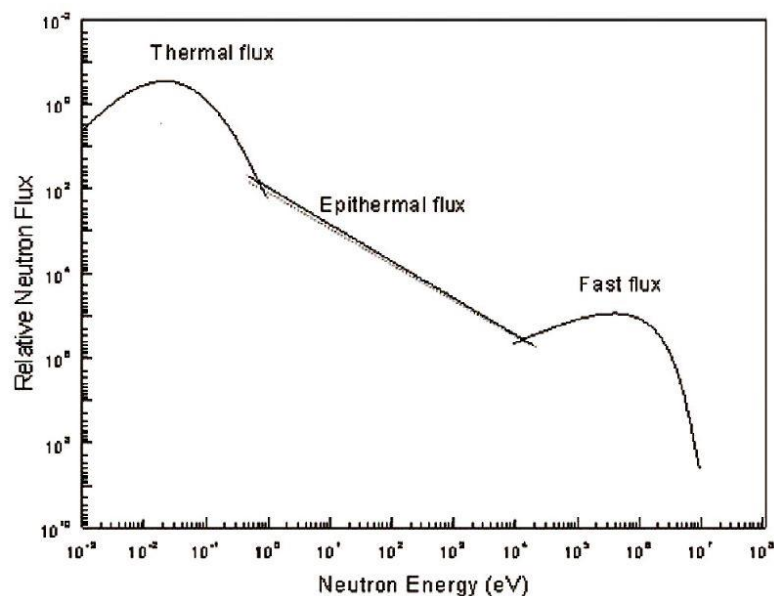
Μονάδα ενεργότητας ενεργότητας είναι το 1 Bq (=1 διάσπαση/s)

2.3 Πηγές Νετρονίων

Η νετρονική ενεργοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας πυρηνικούς αντιδραστήρες, επιταχυντικές διατάξεις ή ισοτοπικές πηγές νετρονίων.

2.3.1 Πυρηνικοί αντιδραστήρες

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες πλεονεκτούν σε σχέση με τις άλλες πηγές νετρονίων λόγω της μεγάλης ροής των νετρονίων που παράγουν καθώς και λόγω των υψηλών ενεργών διατομών σύλληψης των νετρονίων στην περιοχή των θερμικών νετρονίων. Το φάσμα των νετρονίων σε ένα αντιδραστήρα αποτελείται από τρεις περιοχές όπως φαίνονται στο Διάγραμμα 2.3. Κατά μια κατηγοριοποίηση στην υψηλή ενεργειακή περιοχή $E > 0.1 \text{ MeV}$ τα νετρόνια καλούνται ταχέα. Τα νετρόνια στην ενεργειακή περιοχή $0.5 \text{ eV} - 0.1 \text{ MeV}$ καλούνται επιθερμικά νετρόνια, ενώ τα νετρόνια με ενέργεια μικρότερη των 0.5 eV ονομάζονται θερμικά. [3]



Διάγραμμα 2.3: Τυπικό φάσμα ενεργειών νετρονίων από έναν αντιδραστήρα

2.3.2 Ισοτοπικές πηγές

Ως πηγές νετρονίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορισμένα ισότοπα υπερουράνιων στοιχείων που διασπώνται με αυθόρμητη σχάση. Το πιο διαδεδομένο από αυτά είναι το ^{252}Cf που εκπέμπει κατά μέσον όρο 3.76 νετρόνια ανά σχάση πιθανότερης ενέργειας 1.1 MeV και μέσης ενέργειας 2.1 MeV . Επιπλέον, ορισμένες ραδιοϊσοτοπικές πηγές νετρονίων βασίζονται στην παραγωγή νετρονίων από πυρηνικές αντιδράσεις, οι οποίες προκύπτουν από σωματίδια που είναι παράγωγα διάσπασης ραδιενεργών πυρήνων. Οι αντιδράσεις μέσω των οποίων μπορούν να παραχθούν νετρόνια είναι συνήθως οι (α, n) . Ειδικά στην περίπτωση των ραδιενεργών πηγών που χρησιμοποιούν σωματίδια α , οι πυρήνες που επιλέγονται πιο συχνά είναι οι ^{241}Am , ^{210}Po και ^{239}Pu ενώ η μεγαλύτερη απόδοση της (α, n) πυρηνικής αντίδρασης παρατηρείται όταν επιλέγεται σαν πυρήνας στόχος το ^9Be . [2]

Κύριο πλεονέκτημα των ισοτοπικών πηγών αποτελεί το γεγονός ότι είναι εύκολο να μεταφερθούν και επομένως έχουν βρει εφαρμογές σε επιτόπιες (in situ) μετρήσεις. Ωστόσο, οι ροές των νετρονίων που μπορούν να παράξουν οι ισοτοπικές πηγές είναι κατά τάξεις μεγέθους μικρότερες από αυτές των πυρηνικών αντιδραστήρων ή των επιταχυντών. Για παράδειγμα, οι πηγές ^{252}Cf εκπέμπουν $2 \cdot 10^6\text{ n}/\mu\text{g}/\text{s}$ (4π) σε σχέση με θερμικές ροές νετρονίων της τάξης των $10^{12} - 10^{14}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ που συναντώνται στις θέσεις ακτινοβολήσης των ερευνητικών πυρηνικών αντιδραστήρων.

2.3.3 Επιταχυντές

Στους επιταχυντές είναι δυνατό να παραχθούν ταχέα νετρόνια από πυρηνικές αντιδράσεις διευθύνοντας μια δέσμη συγκεκριμένων φορτισμένων σωματιδίων, με ορισμένη ενέργεια, σε ένα στόχο. Οι επιταχυντές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτόν τον σκοπό είναι τα κύκλοτρα, οι γραμμικοί επιταχυντές ή οι ηλεκτροστατικοί επιταχυντές, όπως ο tandem Van de Graff.

Οι πλέον διαδεδομένες αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων είναι οι:

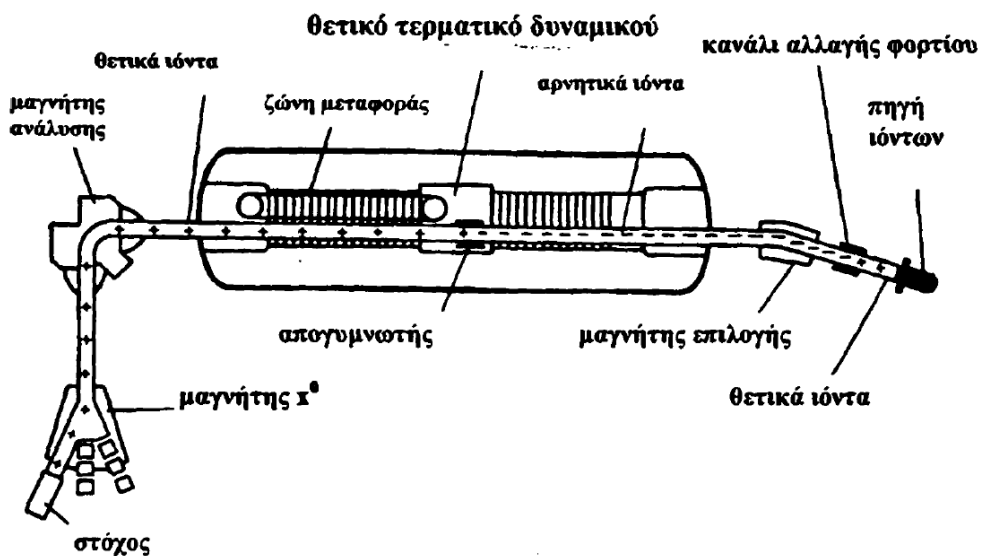
- $^2\text{H}(^2\text{H}, n)^3\text{He}$ η οποία παράγει μονοενεργειακά νετρόνια ενέργειας 2.5 MeV και τυπικές τιμές ροής της τάξης των $10^7 - 10^{10}\text{ s}^{-1}$ και
- $^3\text{H}(^2\text{H}, n)^4\text{He}$ η οποία παράγει μονοενεργειακά νετρόνια ενέργειας 14 MeV και τυπικές τιμές ροής της τάξης των $10^8 - 10^{11}\text{ s}^{-1}$. [8]

Η λειτουργία ενός ηλεκτροστατικού επιταχυντή στηρίζεται στο ότι όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο βρεθεί σε μια σταθερή διαφορά δυναμικού κινείται από τα χαμηλότερα στα υψηλότερα δυναμικά, αποκτώντας κινητική ενέργεια ίση με qV . Για μια επιταχυντική διάταξη είναι απαραίτητα:

- μια πηγή θετικών ή αρνητικών ιόντων,

- ένα σύστημα μεταφοράς των ιόντων σε μια δέσμη και
- μια διαφορά δυναμικού που θα κινήσει τα ιόντα αυτά.

Ένας επιταχυντής tandem, συγκροτείται από δυο ηλεκτροστατικούς επιταχυντές σε σειρά. Αρχικά, μέσω ιονισμού κάποιου αερίου όπως για παράδειγμα του υδρογόνου, δημιουργείται το πλάσμα από όπου εξάγονται τα αρνητικά ιόντα τα οποία επιταχύνονται και οδηγούνται σε ένα σωλήνα υπο συνθήκες κενού. Ο σωλήνας οδηγεί τα αρνητικά ιόντα σε μια μεγάλη μεταλλική δεξαμενή όπου εκεί μετατρέπονται σε θετικά με ένα μηχανισμό μερικής ή ολικής απογύμνωσης φορτίου. Τα ιόντα αυξάνουν σταδιακά την ταχύτητά τους, επομένως και την ενέργειά τους λόγω της διαφοράς δυναμικού της πηγής των ιόντων και του κέντρου της δεξαμενής. Λόγω της υψηλής τάσης που αναπτύσσεται στη δεξαμενή είναι δυνατό να προκληθούν ηλεκτρικές εκκενώσεις οι οποίες αποφεύγονται με την ύπαρξη ενός αερίου SF_6 στη δεξαμενή. Στη συνέχεια τα ιόντα διαπερνούν ένα λεπτό φύλλο άνθρακα, χάνουν μερικά από τα ηλεκτρόνια που διαθέτουν και ξαφνικά από αρνητικά φορτισμένα ιόντα μετατρέπονται σε θετικά. Βγαίνοντας από τη δεξαμενή οι τροχιές των ιόντων, με τη βοήθεια μαγνητών και πυκνωτών, διορθώνονται ώστε να είναι παράλληλες προς τον άξονα του σωλήνα. Έπειτα, τα ιόντα ενός στοιχείου διαχωρίζονται με τη βοήθεια ενός μαγνήτη ο οποίος επιτρέπει τη διέλευση ενός μόνο ισότοπου το οποίο και στρίβει κατά 90 μοίρες ως προς την αρχική διεύθυνση της τροχιάς του. Οι πυρήνες που διαχωρίστηκαν οδηγούνται σε σωλήνες, υπό συνθήκες κενού, οι οποίοι τους οδηγούν σε θαλάμους που είναι τοποθετημένοι οι στόχοι με τους οποίους αλληλεπιδρούν και είτε σκεδάζονται οι πυρήνες των επιταχυνόμενων ιόντων είτε επάγονται πυρηνικές αντιδράσεις [4], [15].



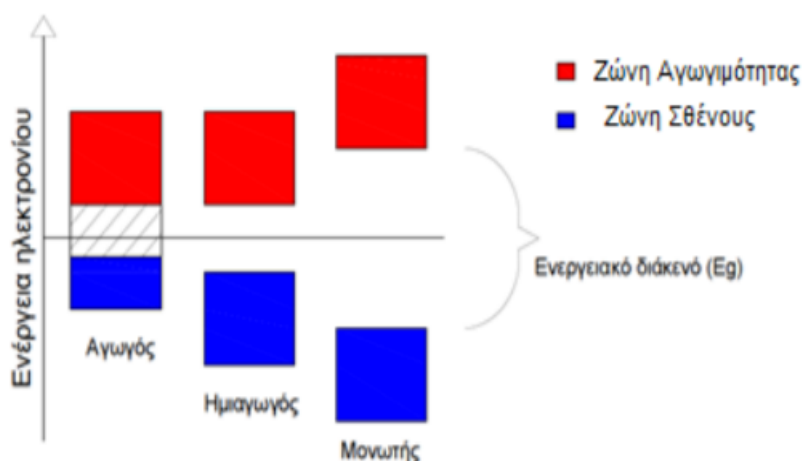
Εικόνα 2.1: Σχηματική διάταξη επιταχυντή tandem

Η αντίδραση ${}^3\text{H}({}^2\text{H}, n){}^4\text{He}$ υλοποιείται με τη βοήθεια του επιταχυντή αποδίδοντας μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων ενέργειας $> 14 \text{ MeV}$. Η συγκεκριμένη αντίδραση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παραγωγή νετρονίων αν και γενικά οι ενεργές διατομές των ταχέων νετρονίων είναι μικρότερες από αυτές των θερμικών νετρονίων. Η ροή των νετρονίων που παράγεται στον στόχο είναι μερικές τάξεις μεγέθους μικρότερη από την ροή που παράγεται σε ένα πυρηνικό αντιδραστήρα.

2.4 Ανίχνευση ακτίνων γάμμα

Απαραίτητη προϋπόθεση για την υλοποίηση της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση αποτελεί η χρήση κατάλληλου ανιχνευτή για ανίχνευση των ακτίνων γάμμα οι οποίες παράγουν φωτοκορυφές στο φάσμα που λαμβάνεται. Οι ανιχνευτές ημιαγωγών είναι αυτοί που προτιμούνται σε σχέση με άλλους ανιχνευτές για την ανίχνευση ακτίνων γάμμα, λόγω της καλύτερης ενεργειακής διακριτικής ικανότητας τους. Ο κρύσταλλος αυτών των ανιχνευτών είναι ένας ημιαγωγός και το πιο συνηθισμένο υλικό που χρησιμοποιείται είναι το *Ge* με πρόσμειξη *Li*.

Η λειτουργία αυτών των ανιχνευτών μπορεί να περιγραφεί από τη θεωρία των ζωνών των στερεών.



Εικόνα 2.2: Κατηγοριοποίηση υλικών με κριτήριο την αγωγιμότητά τους [19]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2 υπάρχουν δύο ζώνες, η ζώνη αγωγιμότητας η οποία είναι η υψηλότερη κατειλημμένη ενεργειακή ζώνη και η ζώνη σθένους που είναι χαμηλότερη ενεργειακά και είναι τελείως κενή από ηλεκτρόνια (οπές). Οι δύο ζώνες χωρίζονται μεταξύ τους με την απαγορευμένη ζώνη ή το ενεργειακό χάσμα (E_g). Τα δέσμια ηλεκτρόνια ή οπές της ζώνης σθένους μπορούν να μεταβούν στην ζώνη αγωγιμότητας όταν αποκτήσουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα E_g . Το εύρος του ενεργειακού χάσματος ενός ημιαγωγού είναι μεγαλύτερο

από το χάσμα των αγωγών και μικρότερο από το χάσμα των μονωτών και κατά συνεπεια στους ημιαγωγούς χρειάζεται να προσφερθεί μικρότερη ενέργεια για να μεταβεί ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας σε σχέση με τους μονωτές [11], [12].

2.4.1 Κρύσταλλος ημιαγωγού γερμανίου

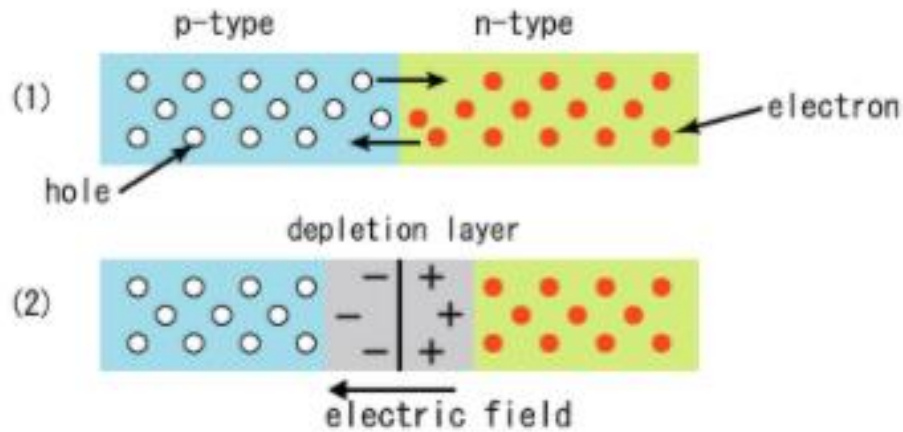
Οι κρύσταλλοι των ημιαγωγών στην περίπτωση που τους ασκηθεί ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο συμπεριφέρονται σαν αγωγός. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι με την πρόσληψη ενέργειας τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους μεταβαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας και συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου.

Οι ημιαγωγοί μπορούν να διακριθούν στους ενδογενείς και στους εξωγενείς ημιαγωγούς. Στους ενδογενείς ημιαγωγούς ανήκουν το υπερκαθαρό γερμάνιο (*Ge*) και (*Si*). Με την ελεγχόμενη προσθήκη προσμίξεων είναι δυνατό να δημιουργηθούν εξωγενείς ημιαγωγοί τύπου *p* ή τύπου *n*. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση ενός κρυστάλλου που έχει ορισμένα ελεύθερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, με την προσθήκη ατόμων άλλων στοιχείων με λιγότερα ηλεκτρόνια (δέκτες) από τα ελεύθερα του κρυστάλλου είναι δυνατό να δημιουργηθούν εξωγενείς ημιαγωγοί τύπου *p*, ενώ με την προσθήκη ατόμων άλλων στοιχείων με περισσότερα ηλεκτρόνια (δότες) από των ελεύθερων του κρυστάλλου δημιουργούνται εξωγενείς ημιαγωγοί τύπου *n*. Άρα, ημιαγωγός τύπου *p* είναι ένας ημιαγωγός που έχει προσμίξεις δέκτες ηλεκτρονίων, ενώ ημιαγωγός τύπου *n*, είναι ένας ημιαγωγός που έχει προσμίξεις δέκτες ηλεκτρονίων.

Οι ανιχνευτές γερμανίου αποτελούνται από μια επαφή *p – n*, η οποία κατασκευάζεται με εμπλουτισμό ενός κρυστάλλου γερμανίου υψηλής καθαρότητας (*HPGe*) ώστε από τη μια πλευρά του να γίνει τύπου *p* ενώ από την άλλη τύπου *n*. Στους ανιχνευτές αυτού του είδους δημιουργείται μια περιοχή απογύμνωσης (depletion layer) στον κρύσταλλο του ημιαγωγού, ανάμεσα στις περιοχές *n* και *p*, στην οποία δεν υπάρχουν φορείς φορτίου. Ο όγκος της περιοχής απογύμνωσης αποτελεί τον ενεργό όγκο του κρυστάλλου (active volume).

2.4.2 Αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών Ge

Στην περιοχή απογύμνωσης που δημιουργείται σε ένα ημιαγωγό στηρίζεται η λειτουργία ενός ανιχνευτή *Ge*. Όταν εφαρμόζεται στα άκρα του κρυστάλλου υψηλή τάση η περιοχή απογύμνωσης μεγαλώνει ενώ οι περιοχές *p* και *n* συρρικνώνονται.

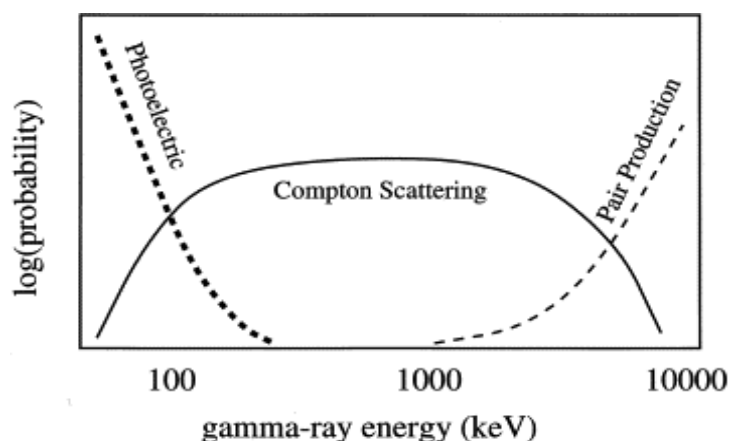


Εικόνα 2.3: Λειτουργία ανιχνευτή Ge υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου[20]

Αυτοί οι ανιχνευτές απαιτούν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους ψύξη σε θερμοκρασία υγρού αζώτου ($77\text{ }^{\circ}\text{K}$), πρώτον, για την αποφυγή του ηλεκτρονικού θορύβου εξαιτίας της εμφάνισης ηλεκτρονίων και οπών στην περιοχή απογύμνωσης και δεύτερον γιατί με αυτό τον τρόπο αυξάνεται ελαφρά το ενεργειακό χάσμα (energy gap, E_g) μεταξύ της ζώνης αγωγιμότητας και της ζώνης σθένους του ημιαγωγού.

Οι πιο σημαντικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας- γ με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή είναι:

- i) το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο απορροφάται όλη η ενέργεια των ακτίνων γάμμα από τα ηλεκτρόνια των ατόμων του κρυστάλλου του Ge ,
- ii) το φαινόμενο Compton κατά το οποίο το φωτόνιο που προσπίπτει σκεδάζεται από ηλεκτρόνια των ατόμων του Ge , το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα ένα σκεδαζόμενο ηλεκτρόνιο υπό γωνία θ σε σχέση με το προσπίπτον φωτόνιο και ένα φωτόνιο χαμηλότερης ενέργειας το οποίο σκεδάζεται υπο γωνία ϕ ως προς το προσπίπτον φωτόνιο και
- iii) η δίδυμη γέννηση όπου ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας διέρχεται μέσα από το ηλεκτρικό πεδίο που σχηματίζεται κοντά στον πυρήνα ενός ατόμου και παρατηρείται η παραγωγή ενός ζεύγους ηλεκτρονίου- ποζιτρονίου [11].

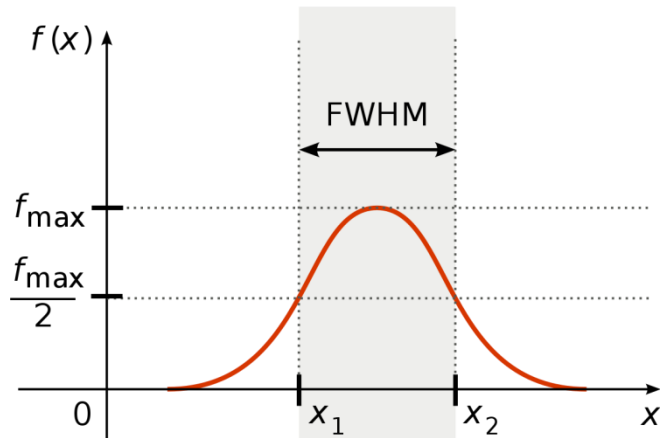


Διάγραμμα 2.4: Πιθανότητα να συμβεί μία από τις τρεις αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο υλικό του ανιχνευτή, σε λογαριθμική κλίμακα, συναρτήσει της ενέργειας των ακτίνων γάμμα [21]

Όταν ένα προσπίπτον φωτόνιο αλληλεπιδρά με τον ενεργό όγκο του ανιχνευτή, τότε αφήνει σε αυτόν όλη, ή μέρος της ενέργειάς του, με έναν από τους τρόπους που περιγράφηκαν παραπάνω. Η ακτινοβολία, λοιπόν, διεγείρει ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργώντας ταυτόχρονα οπές στη ζώνη σθένους του κρυσταλλικού πλέγματος. Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια και οι οπές παρασύρονται από την επίδραση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, συλλέγεται το φορτίο και δημιουργείται ένας παλμός. Η μέτρηση του ηλεκτρικού παλμού επιτρέπει την ανίχνευση του προσπίπτοντος φωτονίου αλλά και τον προσδιορισμό της ενέργειάς του.

2.4.3 Χαρακτηριστικά των ανιχνευτών

Ως προς τα χαρακτηριστικά ενός ανιχνευτή ιδιαίτερη σημασία έχει η ενεργειακή διακριτική ικανότητά του η οποία ερμηνεύεται ως η ικανότητα του ανιχνευτή να μπορεί να διακρίνει δύο κορυφές ενός φάσματος που αντιστοιχούν σε ενέργειες που διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους. Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα συνδέεται άμεσα με την έννοια του FWHM (Full Width Half Maximum), δηλαδή του πλάτους μιας κορυφής στο μισό του μέγιστου ύψους της. Αν το FWHM είναι μεγαλύτερο από τη διαφορά των ενεργειών που αντιστοιχούν σε δύο κορυφές τότε είναι αδύνατο να διακριθούν από τον ανιχνευτή.



Διάγραμμα 2.5: Απεικόνιση του FWHM

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό για έναν ανιχνευτή αποτελεί η απόδοσή του. Η πιθανότητα μιας εκπεμπόμενης ακτίνας γάμμα να αλληλεπιδράσει με τον ανιχνευτή και να καταχωρηθεί ως γεγονός ονομάζεται απόδοση ενός ανιχνευτή. Οι λόγοι για τους οποίους δεν ανιχνεύονται όλα τα φωτόνια που προσπίπτουν στον ανιχνευτή είναι ότι ένα μέρος της ακτινοβολίας μπορεί να απορροφηθεί από το παράθυρο του ανιχνευτή αλλά κυρίως οφείλεται στο γεγονός ότι τα φωτόνια υπάρχει η πιθανότητα να μην αλληλεπιδράσουν με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή και να διαφύγουν. Όσο μεγαλύτερος είναι ένας ανιχνευτής, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η απόδοσή του. Η σχέση (2.5) περιγράφει την απόδοση ενός ανιχνευτή:

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{προσπίπτοντων σωματιδίων που καταμετρώνται}}}{N_{\text{πραγματικός αριθμός προσπιπτόντων σωματιδίων}}} \quad (2.5)$$

Τέλος, ο νεκρός χρόνος ορίζεται ως ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται μετά από την διέγερση του κρυστάλλου του ανιχνευτή από ένα φωτόνιο για να επανέλθει ο ανιχνευτής στις αρχικές συνθήκες και να μπορεί να ανιχνεύσει το επόμενο φωτόνιο που θα προσπέσει ως ξεχωριστό γεγονός [15].

2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση

Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση είναι μια χρήσιμη αναλυτική τεχνική για ποικίλους λόγους. Αποτελεί μια τεχνική κατάλληλη για τον προσδιορισμό των στοιχείων καθώς και για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεών τους στο δείγμα. Η τεχνική έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει όλο το εύρος συγκεντρώσεων των στοιχείων του δείγματος στην ίδια μέτρηση, δηλαδή εφαρμόζεται για την ταυτόχρονη ανάλυση κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων στο δείγμα. Είναι μια ευαίσθητη τεχνική, η οποία δεν απαιτεί την προετοιμασία του δείγματος πριν την ακτινοβόληση και μέτρησή του, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα επιμόλυνσης του

δείγματος κατά την προετοιμασία. Δίνει τη δυνατότητα να μετρηθούν δείγματα πολύ μικρής ποσότητας, της τάξης των mg αλλά και μεγάλα δείγματα της τάξης των kg . Επίσης, έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να μετρηθούν στο ίδιο δείγμα ίσως και πάνω από 50 στοιχεία. Καμία άλλη αναλυτική τεχνική δεν προσφέρει αυτή τη δυνατότητα. Από την άλλη, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί της συγκεκριμένης τεχνικής. Ο κυριότερος όλων ίσως είναι ότι απαιτείται πολύς χρόνος από την ακτινοβόληση του δείγματος μέχρι τη μέτρησή του και τελικά την λήψη αποτελεσμάτων. Οι πηγές νετρονίων, οι οποίες είναι απαραίτητες για την υλοποίηση της τεχνικής δεν είναι πάντα εύκολα προσβάσιμες. Ορισμένα στοιχεία είναι αδύνατο να ανιχνευτούν με τη νετρονική ενεργοποίηση λόγω των μικρών χρόνων ημιζωής ή λόγω των μικρών τιμών των ενεργών διατομών της σύλληψης νετρονίου από ορισμένα από αυτά [2], [9].

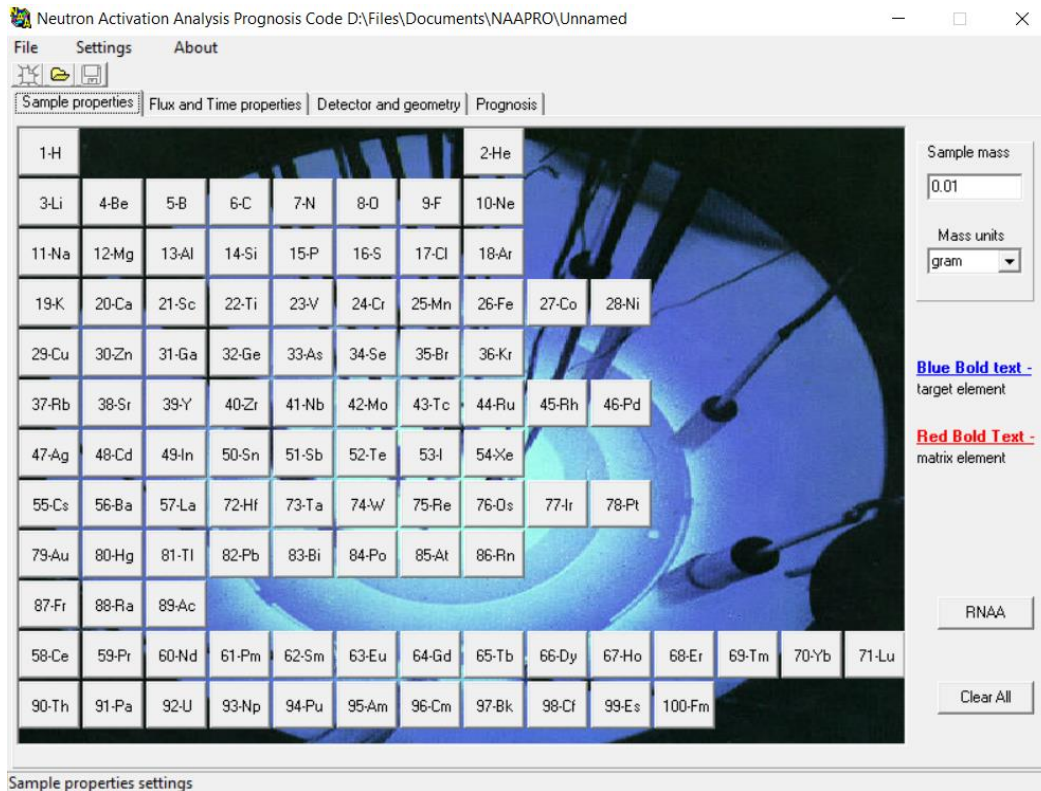
Κεφάλαιο 3: Μέθοδος

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού των κύριων χαρακτηριστικών της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση- όπως τα όρια ανίχνευσης, τα όρια μέτρησης και τα όρια προσδιορισμού- μέσω του προγράμματος προσομοίωσης NAAPRO (Neutron Activation Analysis Prognosis and Optimization) [6]. Ο κώδικας προβλέπει τα προϊόντα ενεργοποίησης για συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβόλησης με νετρόνια καθώς και το φάσμα της παραγόμενης ακτινοβολίας-γ.

3.1 Βασικές πληροφορίες για τον κώδικα NAAPRO

Ο κώδικας NAAPRO αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Έρευνας της Εθνικής Ακαδημίας Επιστημών της Ουκρανίας σε συνεργασία με το Κρατικό Πανεπιστήμιο της Ουάσινγκτον. Είναι ένας κώδικας προσομοίωσης της ακτινοβόλησης ενός υλικού με νετρόνια, από μια καθορισμένη πηγή και παρέχει πληροφορίες για τα νουκλίδια τα οποία παράγονται κατά την ενεργοποίηση. Ο κώδικας NAAPRO βασίζεται στη μαθηματική προσομοίωση της διαδικασίας της ενεργοποίησης και του φάσματος των ακτίνων γάμμα ενώ για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται πληροφορίες από βιβλιοθήκες πυρηνικών δεδομένων. Οι προβλέψεις του προγράμματος NAAPRO στηρίζονται στο φάσμα των ακτίνων γάμμα που προκύπτει από την προσομοίωση για ένα δείγμα του οποίου έχει προσδιοριστεί με ακρίβεια η στοιχεική του σύσταση. Ο κώδικας παρουσιάζει τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, παρέχει πληροφορίες για τα νουκλίδια που παράγονται, τον αριθμό των γεγονότων για κάθε ισότοπο, ενώ υπολογίζονται οι δόσεις, τα όρια ανίχνευσης, μέτρησης και προσδιορισμού με βάση το προσομοιωμένο φάσμα.

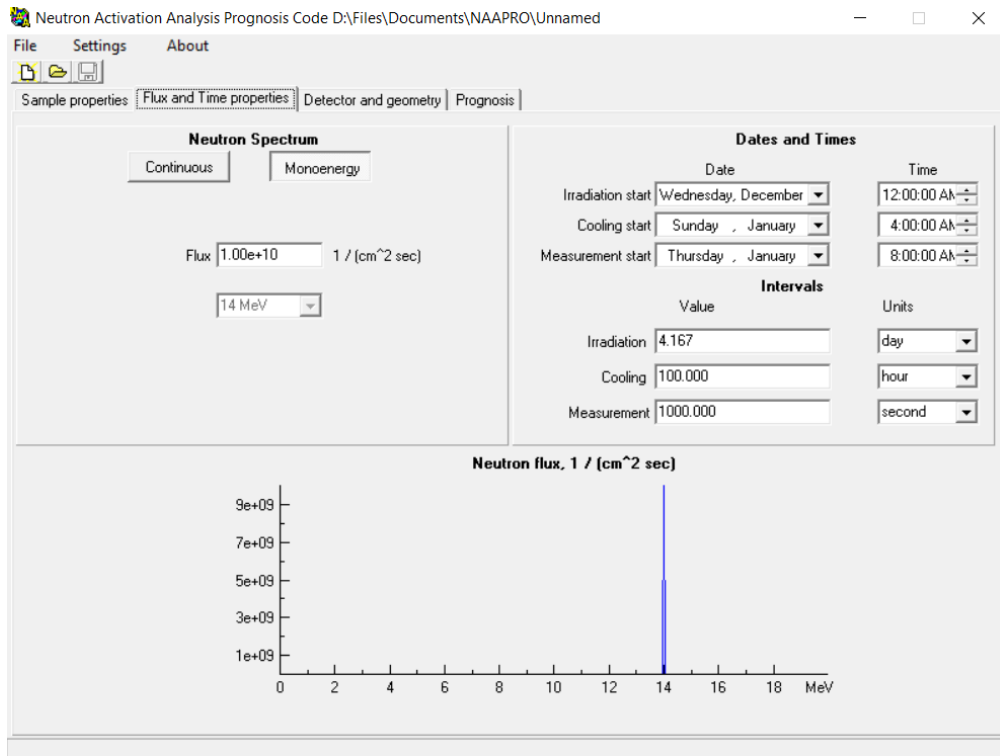
Οι πληροφορίες που απαιτούνται αφορούν στα χαρακτηριστικά του δείγματος, της ακτινοβόλησης και της μέτρησης ώστε να υπολογισθεί το ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας-γ που καταγράφεται στον ανιχνευτή. Στον κώδικα εμφανίζονται τέσσερις διαφορετικές καρτέλες, στις τρεις πρώτες εισάγονται όλες οι πληροφορίες για το υλικό, την πηγή των νετρονίων και τον ανιχνευτή, ενώ στην τέταρτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Ανοίγοντας τον κώδικα εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Σε αυτή την καρτέλα εισάγονται οι πληροφορίες που χρειάζονται για το δείγμα, δηλαδή η μάζα του καθώς και η ακριβής στοιχειακή σύστασή του. Ο κώδικας δίνει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ ραδιοχημικής ή ενόργανης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση. Επιπλέον, για κάθε στοιχείο του δείγματος δίνεται η πληροφορία αν είναι στοιχείο της μήτρας ή όχι.



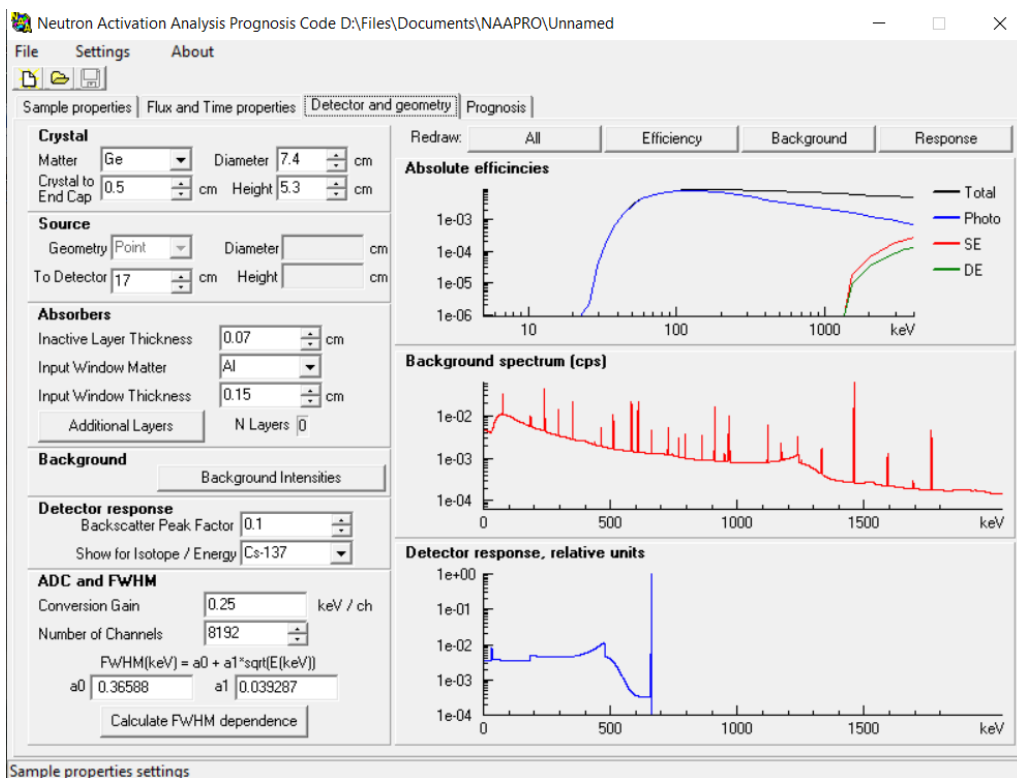
Εικόνα 3.1: Πρώτη καρτέλα του προγράμματος στην οποία εισάγονται η στοιχειακή σύσταση και η μάζα του υλικού

Στην δεύτερη καρτέλα, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.2, εισάγονται οι πληροφορίες σχετικά με την πηγή των νετρονίων όπου δίνεται η επιλογή μεταξύ του πυρηνικού αντιδραστήρα και του επιταχυντή. Στην περίπτωση του επιταχυντή για την ενέργεια υπάρχει η προεπιλογή των 14 MeV , ενώ μπορεί να προσδιοριστεί η ροή των νετρονίων. Εκεί, επιπλέον, ορίζονται και οι χρονικές παράμετροι, όπως ο χρόνος ακτινοβόλησης του δείγματος, ο χρόνος από το τέλος της ακτινοβόλησης μέχρι την αρχή της μέτρησης καθώς και ο χρόνος της μέτρησης του δείγματος.

Στην τρίτη καρτέλα, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.3, εισάγονται τα στοιχεία σχετικά με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή και τη γεωμετρία του. Για τον κρύσταλλο του ανιχνευτή είναι απαραίτητα να προσδιοριστούν το υλικό του κρυστάλλου, η διάμετρός του, το ύψος του, η απόσταση μεταξύ του κρυστάλλου και του παραθύρου του ανιχνευτή καθώς και η απόσταση του παραθύρου του ανιχνευτή από το ακτινοβολημένο δείγμα. Στην ίδια καρτέλα ορίζονται το πάχος του ανενεργού όγκου του κρυστάλλου, το υλικό του παραθύρου του ανιχνευτή, το πάχος του παραθύρου και επιπλέον είναι δυνατό να προσδιοριστούν δέκα υλικά και τα πάχη τους τα οποία μπορούν να βρίσκονται μεταξύ του ακτινοβολημένου δείγματος και του ανιχνευτή. Σε αυτό το σημείο δίνεται η πληροφορία που αφορά στο φάσμα του υποβάθρου, δηλαδή τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που ανιχνεύονται κατά τη μέτρηση. Τέλος, στην τρίτη καρτέλα προσδιορίζονται οι παράμετροι της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας και του μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα.

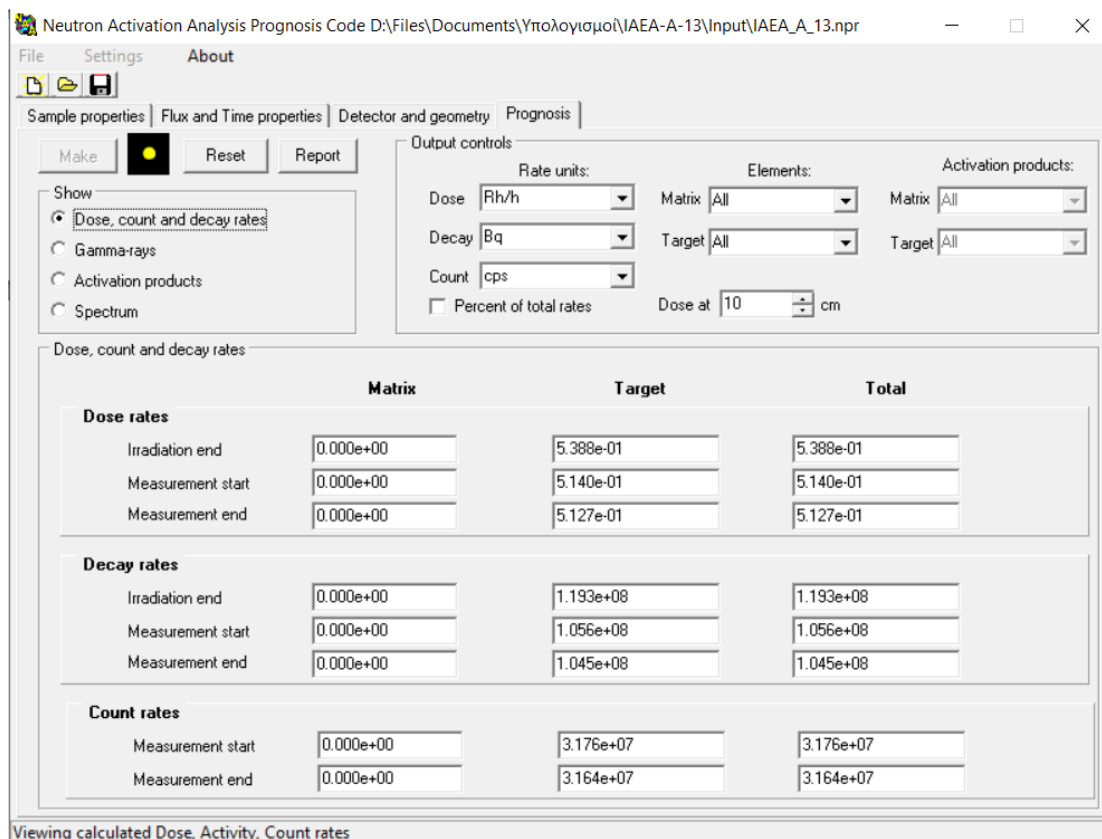


Εικόνα 3.2: Δεύτερη καρτέλα του προγράμματος στην οποία εισάγονται τα χαρακτηριστικά της ακτινοβόλησης

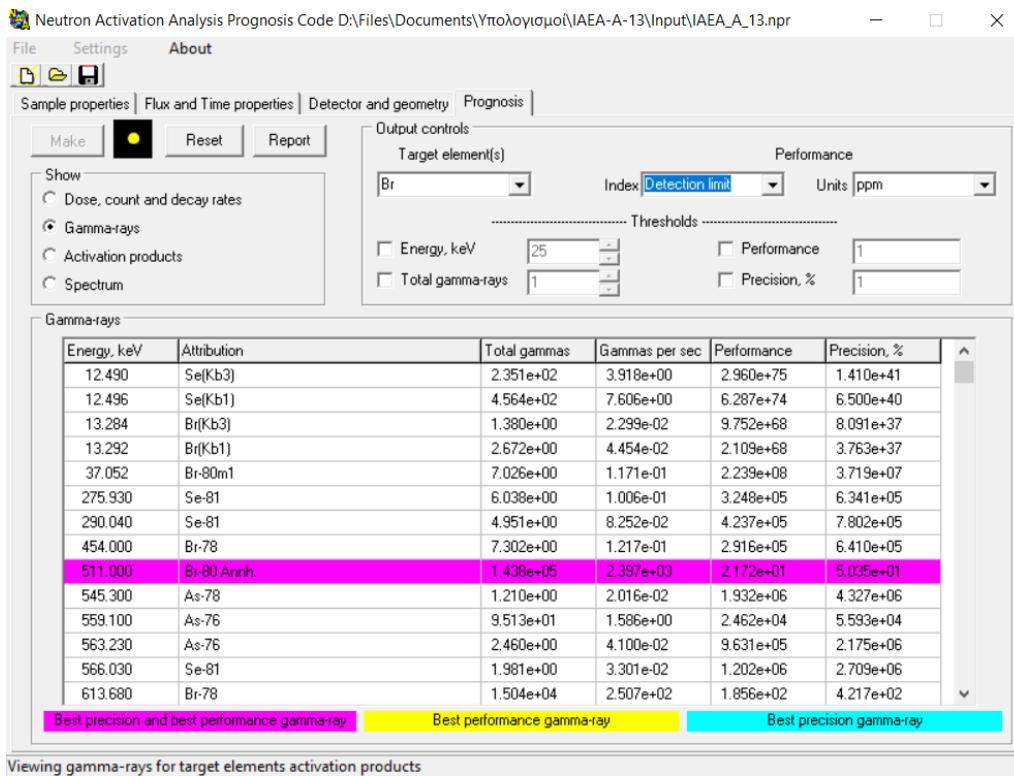


Εικόνα 3.3: Τρίτη καρτέλα του προγράμματος στην οποία εισάγονται τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή

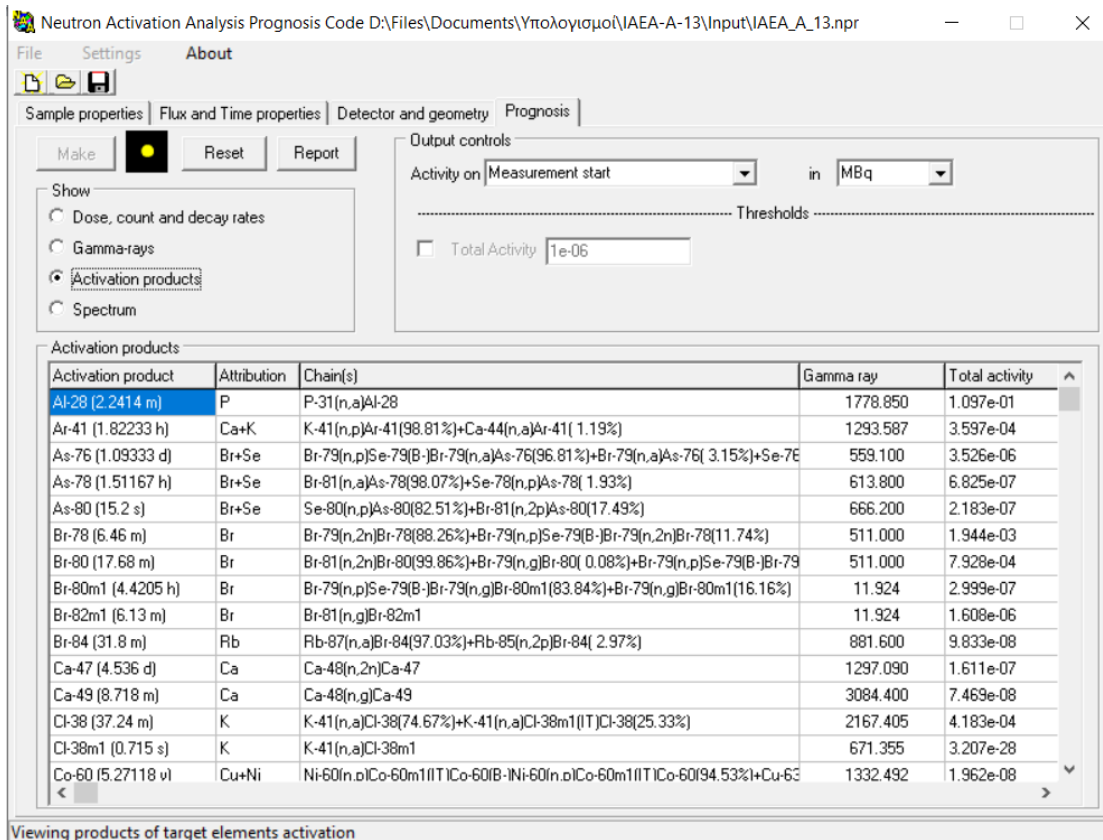
Τέλος, στην τέταρτη καρτέλα γίνεται εκτέλεση της προσομοίωσης για τα δεδομένα εισόδου που δόθηκαν στις τρεις προηγούμενες καρτέλες όπως αναφέρθηκαν και λαμβάνονται τα αποτελέσματα, δηλαδή οι δόσεις, οι ρυθμοί αποδιέγερσης, τα προϊόντα ενεργοποίησης και οι αντιδράσεις από τις οποίες παράχθηκαν, οι αριθμοί των γεγονότων για κάθε ισότοπο, τα όρια ανίχνευσής τους, τα όρια μέτρησής τους, τα όρια ποσοτικοποίησής τους καθώς και το φάσμα της ακτινοβολίας στον ανιχνευτή. Τα παραπάνω φαίνονται στις Εικόνες 3.4 (α), (β), (γ), (δ).



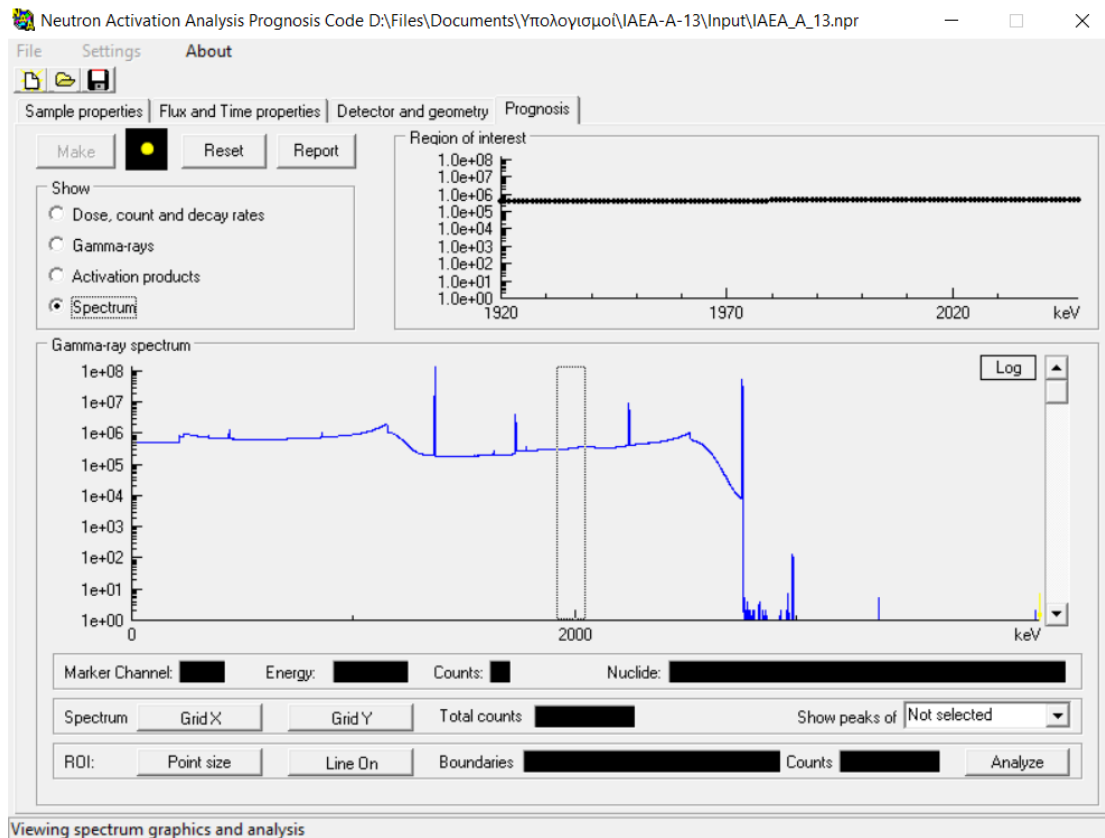
Εικόνα 3.4(α): Στην τέταρτη καρτέλα υπολογίζονται οι δόσεις και οι ρυθμοί διάσπασης όλων των ισωτόπων



Εικόνα 3.4(β): Παρουσιάζονται όλες οι ακτίνες γάμμα που παράγονται καθώς και τα όρια ανίχνευσης, μέτρησης και προσδιορισμού.



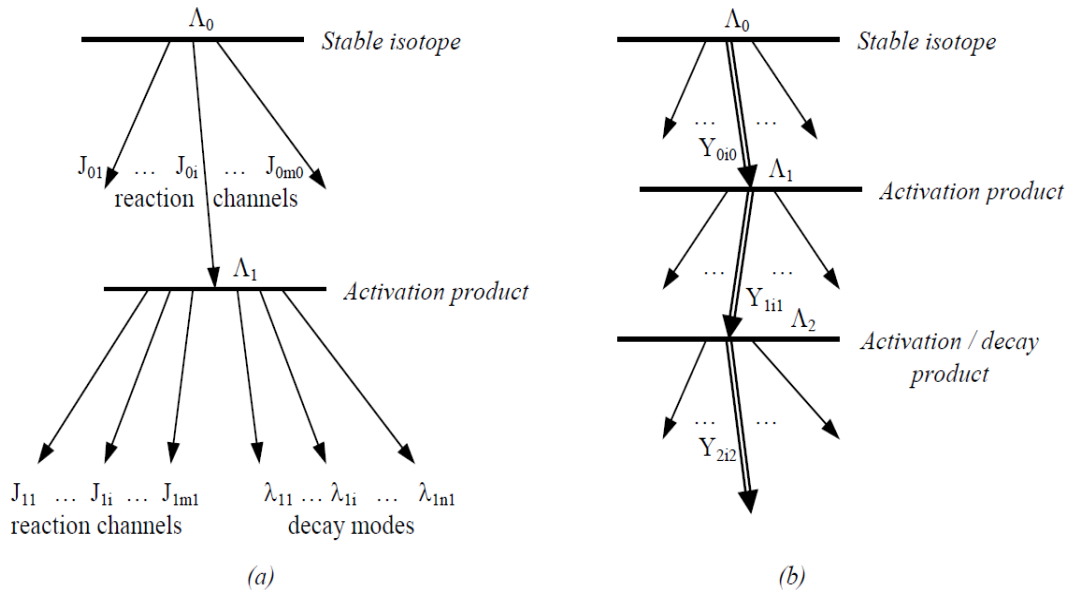
Εικόνα 3.4(γ): Παρουσιάζονται τα προϊόντα ενεργοποίησης



Εικόνα 3.4(δ): Το προσομοιωμένο φάσμα

3.2 Υπολογισμοί προϊόντων ενεργοποίησης

Ο υπολογισμός των προϊόντων ενεργοποίησης στηρίζεται στην κατασκευή ενός γενικευμένου σχεδιαγράμματος πυρηνικών μετασχηματισμών για κάθε σταθερό ισότοπο του δείγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Οι διακλαδώσεις του σχεδιαγράμματος αντιστοιχούν σε διαφορετικά σταθερά ή ραδιενεργά προϊόντα ενεργοποίησης τα οποία έχουν προκύψει από ένα συγκεκριμένο ισότοπο του δείγματος και κάθε διακλάδωση έχει το δικό της ρυθμό μετασχηματισμού που αντιστοιχεί στο ρυθμό της αντίδρασης.



Σχήμα 3.1: (a) Σχεδιάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται όλα τα νουκλίδια τα οποία είναι δυνατό να παραχθούν κατά την ακτινοβόληση με νετρόνια. Το μέγεθος J_{ij} που φαίνεται στο σχήμα είναι ο ρυθμός της αντίδρασης της ενεργοποίησης και λ_{ij} είναι ο ρυθμός διάσπασης. (b) Αλυσίδα μετασχηματισμού ενός συγκεκριμένου σταθερού ισότοπου υπό την ακτινοβόληση με νετρόνια. Το μέγεθος Y_{ij} είναι ένας γενικευμένος συντελεστής διακλάδωσης, ενώ ο δείκτης j αντιστοιχίζεται στην ακτίνα γάμμα υπ' αριθμόν j η οποία εκπέμπεται από ένα συγκεκριμένο νουκλίδιο i .

Οι μετασχηματισμοί των νουκλιδίων στο σχεδιάγραμμα περιγράφονται από ένα γραμμικό σύστημα ομογενών συνήθων διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης με αρχικές συνθήκες, του οποίου η επίλυση προσδίδει πληροφορίες για τον συνολικό αριθμό των πυρήνων ενός συγκεκριμένου ισότοπου το οποίο παράχθηκε κατά την ακτινοβόληση ενός δείγματος με νετρόνια μέσω όλων των πιθανών αντιδράσεων.

$$n_n = \sum_{i \neq n} n_i (J_{in} + \lambda_{in}) - n_n \left\{ \sum_i J_{ni} + \sum_j \lambda_{nj} \right\} \quad (3.1)$$

$$n_n(0) = \begin{cases} \rho_n N_o, & 1 \leq n \leq N_{st} \\ 0, & n > N_{st} \end{cases}$$

$$J_{nm}(t > t_1) = 0, \quad \forall n, m \quad (3.2)$$

όπου J είναι ο ρυθμός αντίδρασης της ενεργοποίησης, λ η σταθερά διάσπασης, N_o είναι ο αριθμός των πυρήνων του σταθερού ισότοπου στο δείγμα και ρ_n αποτελεί την ποσότητα του ισότοπου n . Ο δείκτης n αντιστοιχεί στο ισότοπο n που αποδίδεται

από τη νετρονική ενεργοποίηση, ενώ ο δείκτης m περιγράφει τον αριθμό των πιθανών αντιδράσεων που μπορούν να αποδώσουν το ισότοπο n .

Συνεπώς, μέσω της αλυσίδας μετασχηματισμών, λαμβάνεται μια έκφραση για τον αριθμό των πυρήνων του νουκλιδίου i το οποίο παράγεται στην συγκεκριμένη αλυσίδα, των διασπάσεων του και κατά συνέπεια υπολογίζεται η ενεργότητα ενός νουκλιδίου λαμβάνοντας υπόψη ότι αυτό μπορεί να προκύψει από περισσότερες από μια αντιδράσεις από διαφορετικά ισότοπα άρα και από διαφορετικές αλυσίδες. Αντίστοιχα, με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και η πιθανότητα δημιουργίας του νουκλιδίου i ανά πυρήνα ενός χημικού στοιχείου του στόχου που ακτινοβολείται με νετρόνια για κάθε αλυσίδα στην οποία εμφανίζεται το συγκεκριμένο νουκλίδιο και της διάσπασής του κατά την μέτρηση του φάσματος μετά την ακτινοβολήση. Η πιθανότητα αυτή δίνεται από τη σχέση

$$P_i = \sum_{n=1}^{N_{st}} \rho_n p_i^n = \sum_{n=1}^{N_{st}} \rho_n \sum_c p_{ic}^n \quad (3.3)$$

όπου p_i^n είναι οι επιμέρους πιθανότητες για ένα ισότοπο i το οποίο μπορεί να παραχθεί από διαφορετικά σταθερά ισότοπα, p_{ic}^n αναφέρεται στην πιθανότητα παραγωγής του ίδιου ισότοπου από μια συγκεκριμένη αλυσίδα (c) και N_{st} ο αριθμός των σταθερών πυρήνων.

Οι πληροφορίες για όλα τα σταθερά ισότοπα και τους μετασχηματισμούς τους, με τη διαδικασία της νετρονικής ενεργοποίησης, αποθηκεύονται στη μνήμη του υπολογιστή και αφού ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί συλλέγονται οι πληροφορίες για ένα συγκεκριμένο νουκλίδιο από όλες τις αλυσίδες διάσπασης στις οποίες είναι παρόν.

3.3 Υπολογισμοί ρυθμών αντιδράσεων

Ο ρυθμός των αντιδράσεων J υπολογίζεται μέσω του προσομοιωμένου φάσματος για ορισμένη ροή νετρονίων και λαμβάνονται υπόψη θερμικά, επιθερμικά, ταχεία ή μονοενεργειακά νετρόνια. Ο κώδικας αγνοεί την εξασθένηση της ροής των νετρονίων στο ίδιο το δείγμα(αυτό-εξασθένηση) και οι ρυθμοί των αντιδράσεων που προκύπτουν κατά την ενεργοποίηση με νετρόνια από ένα πυρηνικό αντιδραστήρα υπολογίζονται από τη σχέση (3.4):

$$J_{full} = \Phi_{th} \cdot g(T_{eff}) \sqrt{\frac{293.6}{T_{eff}}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_o + \Phi_{epi} I + \Phi_{fast} \langle \sigma_{act} \rangle \quad (3.4)$$

όπου Φ η ροή των νετρονίων σε μονάδες $cm^{-2}s^{-1}$ και ο δείκτης υποδεικνύει το είδος των νετρονίων στο οποίο αναφέρεται, δηλαδή θερμικά, επιθερμικά ή ταχεία, T_{eff} η θερμοκρασία που προβλέπεται από την κατανομή του Maxwell η οποία περιγράφει την θερμική εξάρτηση του φάσματος (σε °K), $g(T_{eff})$ ο παράγοντας Westcott ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία, σ_o η ενεργός διατομή της ενεργοποίησης για νετρόνια ταχύτητας $2200 m/s$ ($0.0253 eV$) σε barns, I η διατομή στην περιοχή των συντονισμών και $\langle \sigma_{act} \rangle$ μέση ενεργός διατομή της ενεργοποίησης σε barns. Επειδή ο κώδικας NAAPRO έχει σχεδιαστεί ώστε να δίνει προβλέψεις κυρίως για πυρηνικούς αντιδραστήρες η σχέση (3.4) λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμέτρους που απαιτούνται σε αυτή την περίπτωση αλλά δεν βρίσκουν εφαρμογή και στην περίπτωση των μονοενεργειακών ταχέων νετρονίων οπότε και θα μηδενιστούν. Άρα στην περίπτωση των μονοενεργειακών ταχέων νετρονίων η σχέση (3.4) θα λάβει τη μορφή

$$J_{full} = \Phi_{fast} \langle \sigma_{act} \rangle \quad (3.5)$$

3.4 Βιβλιοθήκες δεδομένων

Ο κώδικας NAAPRO προκειμένου να παράξει αξιόπιστα αποτελέσματα και προβλέψεις χρησιμοποιεί ένα πλήθος φυσικών και πυρηνικών δεδομένων σχετικά με τα χαρακτηριστικά των σταθερών και ραδιενεργών ισοτόπων καθώς και των ιδιοτήτων των αλληλεπιδράσεων των υλικών με νετρόνια ή με ακτίνες γάμμα. Η βιβλιοθήκη δεδομένων που παρέχει όλες αυτές τις πληροφορίες δομείται σύμφωνα με μία αντικειμενοστρεφή προσέγγιση. Η δομή της, λοιπόν, αποτελείται από την κλάση Element και από το αντικείμενο Isotope.

Η κλάση Element αποτελεί το κυριότερο στοιχείο της συγκεκριμένης βιβλιοθήκης δεδομένων, η οποία περιέχει πληροφορίες για τον αριθμό των σταθερών και ραδιενεργών ισοτόπων ενός στοιχείου, τη μάζα, το χημικό σύμβολο, την πυκνότητα κ.α. καθώς υπάρχουν και αναφορές στην βιβλιοθήκη mudata.bin που παρέχει πληροφορίες για την εξασθένιση των φωτονίων. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη δημιουργήθηκε με βάση την βιβλιοθήκη Evaluated Photon Data Library EPDL (LLNL, USA). Με τη χρήση δεικτών, δηλαδή μεταβλητών που περιέχουν διευθύνσεις μνήμης στις οποίες αποθηκεύονται άλλες μεταβλητές, προστίθενται πληροφορίες σχετικά με ένα ισότοπο από το αντικείμενο Isotope στην κλάση Element. Το αντικείμενο Isotope παρέχει δεδομένα για κάθε ραδιενεργό ισότοπο όπως είναι ο χρόνος ημιζωής, η μάζα και η πιθανότητα να παραχθεί αυτό.

Το αντικείμενο Isotope με τη χρήση δεικτών λαμβάνει πληροφορίες από άλλες βιβλιοθήκες δεδομένων. Αυτές οι βιβλιοθήκες είναι οι εξής:

- Branches.lbr η οποία είναι μια βιβλιοθήκη που περιέχει πληροφορίες σχετικά με το είδος των αντιδράσεων των ισοτόπων, των διασπάσεων τους, τις πιθανότητες να συμβούν οι αντιδράσεις και τον αριθμό των ακτίνων γ που εκπέμπονται. Πληροφορίες για τις ενέργειες των ακτίνων X και των ακτίνων γάμμα καθώς και για τις πιθανότητες εκπομπής τους λαμβάνονται από τη βιβλιοθήκη GammaIns.bin. Αυτές οι δύο βιβλιοθήκες δημιουργήθηκαν με δεδομένα από την ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File),
- FastCS.lib στην οποία περιλαμβάνονται όλα τα δεδομένα σχετικά με τις ενεργές διατομές των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα για ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση με ταχεία νετρόνια,
- ThermCS.lbr η οποία περιλαμβάνει τα δεδομένα των ενεργών διατομών για αντιδράσεις με νετρόνια,
- ResIntCS.lbr στην οποία βρίσκονται όλα τα δεδομένα για τους συντονισμούς,
- Gfactors.bin, βιβλιοθήκη δεδομένων στην οποία υπάρχουν πληροφορίες για τον παράγοντα g του Westcott, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ρυθμών αντιδράσεων,
- PtwiseCS.lbr περιέχει δεδομένα για τις ενεργές διατομές.

Οι βιβλιοθήκες δεδομένων που αναφέρονται παραπάνω έχουν παραχθεί για τις ανάγκες λειτουργίας του προγράμματος NAAPRO και δημιουργήθηκαν με δεδομένα που λήφθηκαν από τις βιβλιοθήκες EAF-4 (European Activation File, December 1995), RNAL (Reference Neutron Activation Library, December 2000) ENDF/B-VI, JENDL-3.2, JEF-2.2, BROND-2, CENDL-2 και ADL-3 (Activation Data Library).

3.5 Αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της ανάλυσης

Τα όρια ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης είναι από τα σημαντικότερα μεγέθη που υπολογίζονται για την αξιολόγηση μιας τεχνικής ανάλυσης.

Το ελάχιστο όριο ανίχνευσης μιας μεθόδου είναι η ελάχιστη συγκέντρωση μιας ουσίας σε ένα δείγμα που μπορεί να ανιχνευτεί ποιοτικά αλλά όχι να προσδιοριστεί και ποσοτικά με ακρίβεια υπό τις ορισμένες συνθήκες της τεχνικής. Ο προσδιορισμός του ελαχίστου ορίου ανίχνευσης υπολογίζεται μέσω της τυπικής απόκλισης του υποβάθρου. Η τυπική απόκλιση του υποβάθρου δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_B = \sqrt{B} \quad (3.6)$$

όπου B είναι ο αριθμός των γεγονότων του υποβάθρου που καταγράφεται. Συνεπώς, το ελάχιστο όριο ανίχνευσης ορίζεται ως το τριπλάσιο της τυπικής απόκλισης του εκτιμώμενου ελαχίστου ορίου ανίχνευσης [7].

$$D_L = 3.3\sigma_B \quad (3.7)$$

Εκτός από το ελάχιστο όριο ανίχνευσης εξίσου σημαντικός είναι ο υπολογισμός του ορίου ποσοτικοποίησης για την αξιολόγηση της τεχνικής. Το ελάχιστο όριο ποσοτικοποίησης είναι η ελάχιστη συγκέντρωση ή ποσότητα μιας ουσίας σε ένα δείγμα που μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά με αποδεκτή ακρίβεια και επαναληψιμότητα υπό τις ορισμένες συνθήκες της τεχνικής και ορίζεται ως το δεκαπλάσιο της τυπικής απόκλισης του εκτιμώμενου ορίου ανίχνευσης

$$D_q = 10\sigma_B \quad (3.8)$$

Στον κώδικα NAAPRO το ελάχιστο όριο ανίχνευσης υπολογίζεται μέσω της σχέσης [6], [7]

$$m_{LD} = k \cdot (K_{1-\alpha}^2 + 2K_{1-\alpha}\sqrt{2B_2}) \quad (3.9)$$

όπου m_{LD} είναι το ελάχιστο όριο ανίχνευσης ενός συγκεκριμένου στοιχείου σε μονάδες συγκέντρωσης, $K_{1-\alpha}$ [7] είναι ένας στατιστικός παράγοντας που αντιστοιχεί στο επίπεδο σημαντικότητας του ελέγχου $(1 - \alpha)$ όπου ουσιαστικά γίνεται έλεγχος στατιστικής υπόθεσης σχετικά με το αν έχει όντως ανιχνευτεί το σήμα ή όχι, B_2 είναι το υπόβαθρο κάτω από την κορυφή ενός ισότοπου του στοιχείου που μελετάται, k αντιπροσωπεύει ένα παράγοντα βαθμονόμησης που συσχετίζει την απόκριση του ανιχνευτή [7], δηλαδή τον αριθμό των γεγονότων μιας κορυφής (S), με την μάζα m του στοιχείου στο αναλυθέν δείγμα, μεγέθη τα οποία συνδέονται με τη σχέση $m = k \cdot S$ (3.10).

Μέσω του κώδικα NAAPRO, επίσης υπολογίζεται το όριο μέτρησης m_{ML} , το οποίο ορίζεται ως η ελάχιστη συγκέντρωση που επιτρέπει επαρκή ακρίβεια ανίχνευσης του ισότοπου ενός στοιχείου. Δηλαδή, όριο μέτρησης είναι ο ελάχιστος αριθμός κρούσεων όπου πάνω από αυτή την τιμή μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστος ώστε να ανιχνευτεί [16] και υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$m_{ML} = \frac{k}{2\delta_S^2} \left\{ 1 + \sqrt{1 + 8B_2\delta_S^2} \right\} \quad (3.11)$$

όπου δ_S είναι η τυπική απόκλιση της κορυφής που μελετάται.

Για τον υπολογισμό του ορίου ποσοτικοποίησης m_{DL} [6] χρησιμοποιείται η σχέση

$$m_{DL} = m_{ML} \sqrt{1 + \frac{\sigma_k^2}{\delta_m^2}} \quad (3.12)$$

όπου σ_k είναι η τυπική απόκλιση του παράγοντα βαθμονόμησης k , δ_m η τυπική απόκλιση της μάζας του στοιχείου.

3.6 Δείγματα

Στα πλαίσια της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δύο δείγματα αναφοράς του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας και για αυτά είναι γνωστή η στοιχειακή τους σύσταση, η οποία έχει μελετηθεί με διαφορετικές τεχνικές και σε μια πληθώρα εργαστηρίων ώστε να προσεγγιστούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι ακριβείς ποσότητες των χημικών στοιχείων του κάθε δείγματος. Γενικότερα, τα δείγματα αναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αξιολογηθεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων μιας αναλυτικής μεθόδου, καθώς και για την επικύρωση των αναλυτικών μεθόδων. Ειδικότερα, στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται για την διερεύνηση των δυνατοτήτων του προγράμματος NAAPRO καθώς και τη μελέτη της μεθόδου της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση.

Το πρώτο υλικό αναφοράς που μελετήθηκε αποτελεί αίμα βοοειδών που λήφθηκε από ένα σφαγείο σε περιοχή της κάτω Αυστρίας και ξηράνθηκε με λυοφυλισμό (freeze drying). Το υλικό είναι σε μορφή σκόνης και η κωδική ονομασία του είναι *IAEA A – 13*. Το συγκεκριμένο δείγμα προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως υλικό αναφοράς για την μέτρηση ιχνοστοιχείων σε δείγματα αίματος. Για την παρασκευή του υλικού μια παρτίδα **40 kg** ξηρού υλικού επεξεργάστηκε σε σφαιρόμυλο. Ένα μέρος αυτής της αρχικής ποσότητας διήλθε από κόσκινο πάχους **300μm**, ομογενοποιήθηκε σε περιστρεφόμενο πλαστικό τύμπανο για **70** ώρες και διανεμήθηκε ανά **25 g** σε φιαλίδια. Σε τελικό στάδιο, τα δείγματα ακτινοβολήθηκαν με τη χρήση μίας πηγής ^{60}Co σε δόση $2.5 \times 10^4 \text{ Gy}$ ώστε να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη σταθερότητα του υλικού αναστέλλοντας τη μικροβιακή δράση. Η στοιχειακή σύσταση του δείγματος IAEA A-13 παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1.

Προτεινόμενες τιμές		
Χημικό στοιχείο	Μάζα (mg/kg)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης (mg/kg)
Br	22	19-24
Ca	286	226-332
Cu	4.3	3.7-4.8
Fe	2400	2200-2500
K	2500	2100-2700
Na	12600	11600-13500
Rb	2.3	1.7-3.1
S	6500	6000-7000
Se	0.24	0.15-0.31
Zn	13	12-14

Πληροφοριακές τιμές		
Χημικό στοιχείο	Μάζα (mg/kg)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης (mg/kg)
Mg	99	81-139
Ni	1	0.6-1.4
P	940	690-1120
Pb	0.18	0.15-0.29

Πίνακας 3.1 (α), (β): Στοιχειακή σύσταση του δείγματος IAEA-A-13.

Το δεύτερο υλικό αναφοράς που μελετήθηκε αποτελεί χώμα το οποίο συλλέχθηκε κοντά στη περιοχή Ebensee, στην Άνω Αυστρία σε υψόμετρο **1100 m** πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το υλικό είναι σε μορφή σκόνης και η κωδική ονομασία του είναι *IAEA Soil 7*. Το συγκεκριμένο δείγμα προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως υλικό αναφοράς για την μέτρηση ιχνοστοιχείων σε γεωλογικά δείγματα. Για την παρασκευή των δειγμάτων, το υλικό κοσκινίστηκε με κόσκινο πάχους **1 cm** και θερμάνθηκε στους **450°C** για **24** ώρες ώστε να καταστραφεί η οργανική ύλη. Στη συνέχεια το δείγμα θρυμματίστηκε, πέρασε ξανά από κόσκινο **71 μm** και αναμείχθηκε καλά σε περιστρεφόμενο πλαστικό τύμπανο για **24** ώρες ώστε τελικά να τοποθετηθεί σε φιαλίδια που το καθένα περιέχει περίπου **25g**. Η στοιχειακή σύσταση του δείγματος IAEA Soil 7 παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2.

Προτεινόμενες τιμές		
Χημικό στοιχείο	Μάζα (mg/kg)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης (mg/kg)
As	13.4	12.5-14.2
Ce	61	50-63
Co	8.9	8.4-10.1
Cr	60	49-74
Cs	5.4	4.9-6.4
Cu	11	9.0-13.0
Dy	3.9	3.2-5.3
Eu	1	0.9-1.3
Hf	5.1	4.8-5.5
La	28	27-29
Mn	631	604-650
Nd	30	22-34
Pb	60	55-71
Rb	51	47-56
Sb	1.7	1.4-1.8
Sc	8.3	6.9-9.0
Sm	5.1	4.8-5.5
Sr	108	103-114
Ta	0.8	0.6-1.0
Tb	0.6	0.5-0.9
Th	8.2	6.5-8.7
U	2.6	2.2-3.3
V	66	59-73
Y	21	15-27
Yb	2.4	1.9-2.6
Zn	104	101-113
Zr	185	180-201

Πληροφοριακές τιμές		
Χημικό στοιχείο	Μάζα (mg/kg)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης (mg/kg)
Al	47000	44000-51000
Ba	159	131-196
Br	7	3.0-10.0
Ca	163000	157000-174000
Cd	1.3	1.1-2.7
Fe	25700	25200-26300
Ga	10	9.0-13.0
Hg	0.04	0.003-0.07
K	12100	11300-12700
Li	31	15-42
Lu	0.3	0.1-0.4
Mg	11300	11000-11800
Mo	2.5	0.9-5.1
Na	2400	2300-2500
Nb	12	7.0-17.0
Ni	26	21-37
P	460	460-462
Se	0.4	0.2-0.8
Si	180000	169000-201000
Ti	3000	2600-3700

Πίνακας 3.2 (α), (β): Στοιχειακή σύσταση του δείγματος IAEA-Soil-7.

3.7 Κύκλοι ακτινοβόλησης και μέτρησης

Τα δείγματα που αναφέρθηκαν παραπάνω αναλύθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος NAAPRO, όπου για πηγή των νετρονίων επιλέχθηκε επιταχυντής με ενέργεια νετρονίων 14 MeV και ροή $10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. Για κάθε δείγμα προσδιορίστηκε η στοιχειακή σύσταση με βάση τους Πίνακες 3.1 και 3.2, ενώ η μάζα που εισήχθη στον κώδικα και για τα δύο υλικά ήταν 25 g . Για τα δεδομένα του ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκαν τα ακριβή στοιχεία του ανιχνευτή *HPGe (GEM80)* του εργαστηρίου, σχετικής απόδοσης 80% του οποίου τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.3 που ακολουθεί.

Σχετική απόδοση	80%
Διάμετρος κρυστάλλου (cm)	8.15
Ύψος κρυστάλλου (cm)	5.77
Απόσταση από τον κρύσταλλο έως το "καπάκι" του ανιχνευτή (cm)	0.4
Πάχος ανενεργού όγκου (mm)	1
Παράθυρο αλουμινίου Al (mm)	1

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά ανιχνευτή HPGe (GEM80)

Για κάθε ένα από τα δύο υλικά υλοποιήθηκαν πέντε διαφορετικοί κύκλοι στους οποίους διέφεραν οι παράμετροι του χρόνου ακτινοβόλησης, του χρόνου αναμονής από το τέλος της ακτινοβόλησης έως την αρχή της μέτρησης και του χρόνου μέτρησης. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται ώστε να εξακριβωθούν τα βραχύβια αλλά και τα μακρόβια ισότοπα που είναι δυνατό να παραχθούν κατά την ακτινοβόληση των δύο δειγμάτων με νετρόνια χωρίς να πραγματοποιηθούν οι ακτινοβολήσεις και οι μετρήσεις στην πράξη η οποία θα ήταν μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία. Με αυτό τον τρόπο, λοιπόν, μέσω του κώδικα NAAPRO δίνεται η δυνατότητα να γίνουν έλεγχοι ώστε να προσδιοριστούν οι παράμετροι της ακτινοβόλησης και της μέτρησης των δειγμάτων για να παραχθεί κάποιο ισότοπο ενδιαφέροντος και στη συνέχεια οι παράμετροι να χρησιμοποιηθούν στο πείραμα.

Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι πέντε διαφορετικοί κύκλοι που υλοποιήθηκαν για το βιολογικό και γεωλογικό δείγμα.

	1ος κύκλος	2ος κύκλος	3ος κύκλος	4ος κύκλος	5ος κύκλος
Χρόνος ακτινοβόλησης	60 sec	300 sec	0.5 h	3 h	24 h
Χρόνος αναμονής	60 sec	300 sec	0.5 h	3 h	24 h
Χρόνος μέτρησης	60 sec	300 sec	0.5 h	3 h	24 h

Πίνακας 3.4: Κύκλοι ακτινοβόλησης και μέτρησης που υλοποιήθηκαν με τον κώδικα NAAPRO

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε μια προσπάθεια της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων μέσω ενός προκαταρκτικού πειράματος όπου όμως αυτός ο

σκοπός δεν επετεύχθη τελικά λόγω κάποιων τεχνικών δυσκολιών και κυρίως λόγω της διαφοράς στην ενέργεια των νετρονίων και της διαφοράς στη ροή των νετρονίων που υπήρχε μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος. Στο Παράρτημα *I* παρουσιάζεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία η οποία υλοποιήθηκε.

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

Με την εκτέλεση της προσομοίωσης του κώδικα NAAPRO προβλέπονται τα ισότοπα που παράγονται μέσω διαφόρων αντιδράσεων μετά την ακτινοβόληση με νετρόνια και υπολογίζονται οι αριθμοί των γεγονότων, η ενεργότητα των ισotόπων που παράγονται στο τέλος της ακτινοβόλησης καθώς και τα όρια ανίχνευσής τους μέσω του φάσματος που προσομοιώνεται. Τα αποτελέσματα ανάγονται στο τέλος της ακτινοβόλησης, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

4.1 Υπολογιστικά αποτελέσματα

4.1.1 Κύκλοι ανάλυσης

Ο κώδικας NAAPRO χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των προϊόντων ενεργοποίησης σε πέντε διαφορετικούς κύκλους ακτινοβόλησης και μέτρησης.

Για κάθε υλικό και για κάθε διαφορετικό κύκλο ακτινοβόλησης και μέτρησης προσδιορίστηκαν τα προϊόντα ενεργοποίησης καθώς και οι αντιδράσεις μέσω των οποίων προέκυψαν. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν ο αριθμός των γεγονότων για κάθε προϊόν ενεργοποίησης, το όριο ανίχνευσης, μέτρησης και προσδιορισμού. Εκτός αυτών υπολογίστηκε και ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης στο τέλος της ακτινοβόλησης, στην αρχή και στο τέλος της μέτρησης για κάθε διαφορετική ακτινοβόληση κάθε δείγματος. Τέλος, από τον κώδικα NAAPRO λήφθηκε και το προσομοιωμένο φάσμα των ακτίνων γάμμα που καταγράφηκε στον ανιχνευτή.

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν διερευνήθηκαν περαιτέρω ώστε να διακριθούν τα ισότοπα που μπορούν να ανιχνευτούν στην πράξη. Τα προϊόντα της ενεργοποίησης διακρίθηκαν βάσει των εξής τριών κριτηρίων: ύπαρξη παρεμβολών, φυσικό υπόβαθρο και ένταση των ακτίνων γάμμα. Αρχικά, απορρίφθηκαν όλα τα ισότοπα τα οποία ενεργοποιήθηκαν από περισσότερα από δύο στοιχεία του δείγματος επειδή δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί σε τι ποσοστό είχε συνεισφέρει κάθε αντίδραση από αυτές που έλαβαν χώρα για την παραγωγή ενός συγκεκριμένου προϊόντος. Συνεπώς δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί σε τι ποσοστό συνεισφέρει κάθε ισότοπο στον τελικό αριθμό των γεγονότων που λαμβάνεται από τον κώδικα. Σε δεύτερη φάση υπολογίστηκε το υπόβαθρο για κάθε κύκλο. Ο κώδικας NAAPRO δίνει τη δυνατότητα να προσδιοριστούν ο ρυθμός των γεγονότων των κορυφών των φυσικών ραδιενεργών ισotόπων (σε *cps*) καθώς και το συνεχές του φάσματος του υποβάθρου. Ο κώδικας δίνει σαν προεπιλογή ότι ο ρυθμός των γεγονότων του συνεχούς μέρους του φάσματος είναι **10 cps** το οποίο χρησιμοποιήθηκε για ένα προκαταρκτικό υπολογισμό του υποβάθρου πολλαπλασιάζοντας για κάθε κύκλο με

τον αντίστοιχο χρόνο και να ληφθεί ένας αριθμός γεγονότων. Όποιο ραδιενεργό ισότοπο είχε μικρότερο αριθμό γεγονότων από αυτόν που προέκυψε για το υπόβαθρο απορρίφθηκε. Τέλος, επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν μόνο αυτές οι ακτίνες γάμμα των ισοτόπων όπου η έντασή τους ήταν μεγαλύτερη από 1%

Παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα δύο υλικά αναφοράς και για τους πέντε διαφορετικούς κύκλους ακτινοβολήσης και τα διαφορετικά χημικά στοιχεία από τα οποία προκύπτουν. Στους Πίνακες 4.1 (α), (β), (γ), (δ), (ε) που ακολουθούν παρουσιάζονται τα προϊόντα της ενεργοποίησης του γεωλογικού δείγματος για τα οποία υπολογίστηκε ο αριθμός κρούσεων πάνω από το ελάχιστο όριο ανίχνευσης του ισότοπου και η πυρηνική αντίδραση (ή αλυσίδα αντιδράσεων) παραγωγής του ραδιονουκλιδίου που χρησιμοποιείται στην ανίχνευση. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το βιολογικό δείγμα παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.2 (α – ε). Τα πλήρη αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα II.

Χημικό στοιχείο	Συγκέντρωση (ppm)	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αντίδραση ενεργοποίησης	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)
Fe	2.57E+04	⁵⁷ Mn	122.063	⁵⁷ Fe(n,p) ⁵⁷ Mn(99.90%)+ ⁵⁸ Fe(n,np) ⁵⁷ Mn(0.05%)+ ⁵⁸ Fe(n,d) ⁵⁷ Mn(0.05%)	2.03E+04

Πίνακας 4.1(α): Υπολογιστικά αποτελέσματα 1^{ου} κύκλου του γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7 στα οποία το ελάχιστο οριο ανίχνευσης είναι χαμηλότερο της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα

Χημικό στοιχείο	Συγκέντρωση (ppm)	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αντίδραση ενεργοποίησης	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)
Cd	1.3E+00	¹¹³ Ag	298.6	¹¹⁶ Cd(n,p) ¹¹⁶ Ag(B-) ¹¹⁶ Cd(n,a) ¹¹³ Pd(B-) ^{113m} Ag(IT) ¹¹³ Ag	7.43E-01
Fe	2.57E+04	⁵³ Fe	377.9	⁵⁴ Fe(n,2n) ⁵³ Fe	1.22E+05
Ca	1.63E+05	⁴⁹ Ca	3084.4	⁴⁸ Ca(n,γ) ⁴⁹ Ca	2.44E+03
		⁴⁴ K	1157.002	⁴⁴ Ca(n,p) ⁴⁴ K	2.76E+04

Πίνακας 4.1(β): Υπολογιστικά αποτελέσματα 2^{ου} κύκλου του γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7 στα οποία το ελάχιστο οριο ανίχνευσης είναι χαμηλότερο της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα

Χημικό στοιχείο	Συγκέντρωση (ppm)	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αντίδραση ενεργοποίησης	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)
Cd	1.3E+00	¹¹³ Ag	298.6	¹¹⁶ Cd(n,p) ¹¹⁶ Ag(B-) ¹¹⁶ Cd(n,a) ¹¹³ Pd(B-) ^{113m} Ag(IT) ¹¹³ Ag	3.24E-01

Πίνακας 4.1(γ): Υπολογιστικά αποτελέσματα 3^{ου} κύκλου του γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7 στα οποία το ελάχιστο όριο ανίχνευσης είναι χαμηλότερο της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα

Χημικό στοιχείο	Συγκέντρωση (ppm)	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αντίδραση ενεργοποίησης	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)
Cd	1.3E+00	¹¹³ Ag	298.6	¹¹⁶ Cd(n,p) ¹¹⁶ Ag(B-) ¹¹⁶ Cd(n,a) ¹¹³ Pd(B-) ^{113m} Ag(IT) ¹¹³ Ag	1.96E-01
Ca	1.63E+05	⁴³ K	396.861	⁴³ Ca(n,p) ⁴³ K(80.99%)+ ⁴⁴ Ca(n,np) ⁴³ K(15.28%)+ ⁴⁴ Ca(n,d) ⁴³ K(3.68%)+ ⁴⁶ Ca(n,a) ⁴³ Ar(B-) ⁴³ K (0.05%)	4.13E+04

Πίνακας 4.1(δ): Υπολογιστικά αποτελέσματα 4^{ου} κύκλου του γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7 στα οποία το ελάχιστο όριο ανίχνευσης είναι χαμηλότερο της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα

Χημικό στοιχείο	Συγκέντρωση (ppm)	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αντίδραση ενεργοποίησης	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)
As	1.34E+01	⁷⁴ As	634.78	⁷⁵ As(n,2n) ⁷⁴ As	5.40E+00
		⁷⁶ As	559.1	⁷⁹ Br(n,p) ⁷⁹ Se(B-) ⁷⁹ Br(n,a) ⁷⁶ As(79.49%)+ ⁷⁹ Br(n,a) ⁷⁶ As(12.91%)+ ⁷⁵ As(n,γ) ⁷⁶ As(6.75%)+ ⁷⁶ Se(n,p) ⁷⁶ As(0.82%)+ ⁷⁷ Se(n,np) ⁷⁶ As(0.01%)+ ⁷⁷ Se(n,d) ⁷⁶ As(0.01%)	2.04E+02
Ni	2.6E+01	⁵⁷ Co	122.061	⁵⁸ Ni(n,np) ⁵⁷ Co(96.96%)+ ⁵⁸ Ni(n,d) ⁵⁷ Co(3.04%)	1.04E+01
		⁵⁷ Ni	1377.63	⁵⁸ Ni(n,2n) ⁵⁷ Ni	9.59E+00
Na	2.4E+03	²² Na	1274.53	²³ Na(n,2n) ²² Na	6.93E+02

Pb	6E+01	²⁰³ Pb	279.197	²⁰⁴ Pb(n,2n) ²⁰³ Pb(59.11%)+ ²⁰⁴ Pb(n,2n) ^{203m} Pb(IT) ²⁰³ Pb (40.89%)	1.21E+01
Sb	1.7E+00	¹²² Sb	564.24	¹²³ Sb(n,2n) ¹²² Sb(99.82%)+ ¹²¹ Sb(n,γ) ¹²² Sb(0.17%)+ ¹²¹ Sb(n,γ) ^{122m} Sb(IT) ¹²² Sb (0.01%)	6.51E-01
Y	2.1E+01	⁸⁸ Y	1836.063	⁸⁹ Y(n,2n) ⁸⁸ Y(99.98%)+ ⁸⁹ Y(n,p) ⁸⁹ Sr(B-) ⁸⁹ Y(n,2n) ⁸⁸ Y (0.02%)	1.09E+01

Πίνακας 4.1(ε): Υπολογιστικά αποτελέσματα 5^{ου} κύκλου του γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7 στα οποία το ελάχιστο οριο ανίχνευσης είναι χαμηλότερο της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα

Χημικό στοιχείο	Συγκέντρωση (ppm)	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αλυσίδα ενεργοποίησης	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)
P	9.4E+02	²⁸ Al	1778.85	³¹ P(n,a) ²⁸ Al	3.09E+01
Fe	2.4E+03	⁵⁶ Mn	846.754	⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn(99.78%)+ ⁵⁷ Fe(n,np) ⁵⁶ Mn(0.19%)+ ⁵⁷ Fe(n,d) ⁵⁶ Mn(0.02%)	2.19E+03
Mg	9.9E+01	²⁴ Na	2754.028	²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na (B-) ²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na	1.95E-05

Πίνακας 4.2(α): Υπολογιστικά αποτελέσματα 1^{ου} κύκλου του βιολογικού δείγματος IAEA A-13 στα οποία το ελάχιστο οριο ανίχνευσης είναι χαμηλότερο της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα

Χημικό στοιχείο	Συγκέντρωση (ppm)	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αλυσίδα ενεργοποίησης	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)
K	2.5E+03	³⁸ Cl	2167.405	⁴¹ K(n,a) ³⁸ Cl(74.67%)+ ⁴¹ K(n,a) ^{38m} Cl(IT) ³⁸ Cl (25.33%)	1.39E+03
Fe	2.4E+03	⁵⁶ Mn	846.754	⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn(99.78%)+ ⁵⁷ Fe(n,np) ⁵⁶ Mn(0.19%)+ ⁵⁷ Fe(n,d) ⁵⁶ Mn(0.02%)	2.02E+02
Mg	9.9E+01	²⁴ Na	2754.028	²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na (B-) ²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na (IT) ²⁴ Na	1.37E-05

Πίνακας 4.2(β): Υπολογιστικά αποτελέσματα 2^{ου} κύκλου του βιολογικού δείγματος ΙΑΕΑ Α-13 στα οποία το ελάχιστο όριο ανίχνευσης είναι χαμηλότερο της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα

Χημικό στοιχείο	Συγκέντρωση (ppm)	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αλυσίδα ενεργοποίησης	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)
K	2.5E+03	³⁸ Cl	2167.405	⁵¹ K(n,a) ³⁸ Cl(74.67%)+ ⁴¹ K(n,a) ^{38m} Cl(IT) ³⁸ Cl (25.33%)	9.16E+02
Fe	2.4E+03	⁵⁶ Mn	846.754	⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn(99.78%)+ ⁵⁷ Fe(n,np) ⁵⁶ Mn(0.19%)+ ⁵⁷ Fe(n,d) ⁵⁶ Mn(0.02%)	1.69E+01
			1810.72		7.12E+01
			2113.05		1.65E+02
			2522.88		4.23E+03
Mg	9.9E+01	²⁴ Na	2754.028	²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na(B-) ²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na	1.33E-05

Πίνακας 4.2(γ): Υπολογιστικά αποτελέσματα 3^{ου} κύκλου του βιολογικού δείγματος ΙΑΕΑ Α-13 στα οποία το ελάχιστο όριο ανίχνευσης είναι χαμηλότερο της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα

Χημικό στοιχείο	Συγκέντρωση (ppm)	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αλυσίδα ενεργοποίησης	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)
Na	1.26E+04	²² Na	1274.53	²³ Na(n,2n) ²² Na	1.24E+04
Mg	9.9E+01	²⁴ Na	2754.028	²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na(B-) ²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na (99.98%)+ ²⁴ Mg(n,p) ²⁴ Na(0.01%)	1.39E-05

Πίνακας 4.2(δ): Υπολογιστικά αποτελέσματα 4^{ου} κύκλου του βιολογικού δείγματος ΙΑΕΑ Α-13 στα οποία το ελάχιστο όριο ανίχνευσης είναι χαμηλότερο της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα

Χημικό στοιχείο	Συγκέντρωση (ppm)	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αλυσίδα ενεργοποίησης	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)
Ca	2.86E+02	⁴⁷ Ca	1297.09	⁴⁸ Ca(n,2n) ⁴⁷ Ca	6.25E+01
		⁴⁷ Sc	159.381	⁴⁸ Ca(n,2n) ⁴⁷ Ca(B-) ⁴⁷ Sc	4.08E+00
Fe	2.4E+03	⁵¹ Cr	320.082	⁵⁴ Fe(n,a) ⁵¹ Cr	2.54E+02
		⁵⁴ Mn	834.848	⁵⁴ Fe(n,p) ⁵⁴ Mn(99.99%)+ ⁵⁶ Fe(n,t) ⁵⁴ Mn(0.01%)	2.72E+02
Zn	1.3E+01	⁶⁷ Cu	184.577	⁶⁷ Zn(n,p) ⁶⁷ Cu(90.16%)+ ⁶⁸ Zn(n,np) ⁶⁷ Cu(4.63%)+ ⁶⁸ Zn(n,d) ⁶⁷ Cu(4.35%)+ ⁷⁰ Zn(n,a) ⁶⁷ Ni(B-) ⁶⁷ Cu	3.77E+00
		⁶⁵ Zn	1115.539	⁶⁶ Zn(n,2n) ⁶⁵ Zn(99.76%)+ ⁶⁴ Zn(n,γ) ⁶⁵ Zn(0.24%)	1.69E+00
Na	1.26E+04	²² Na	1274.53	²³ Na(n,2n) ²² Na	2.92E+01

Πίνακας 4.2(ε): Υπολογιστικά αποτελέσματα 5^{ου} κύκλου του βιολογικού δείγματος IAEA A-13 στα οποία το ελάχιστο όριο ανίχνευσης είναι χαμηλότερο της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα

4.1.2 Προσομοίωση πειράματος

Επιπλέον, στα πλαίσια της εργασίας έγινε μια προσπάθεια για την πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των προγνώσεων η οποία όμως δεν επιτεύχθη λόγω τεχνικών προβλημάτων με τον έναν ανιχνευτή αλλά κατά κύριο λόγο επειδή η ενέργεια των νετρονίων καθώς και η ροή των νετρονίων του πειράματος και των προσομοιώσεων διέφεραν. Παρόλα αυτά εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις των ακτινοβολήσεων των δύο υλικών, IAEA Soil 7 (δείγμα υπ' αριθμό 3) και IAEA A – 13 (δείγμα υπ' αριθμό 6) , καθώς και για τον στόχο Al και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Οι προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν σύμφωνα με τις παραμέτρους του πειράματος για τα δύο υλικά που περιγράφηκαν παραπάνω. Οι χρονικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.3 και 4.4.

Χρόνος ακτινοβόλησης (sec)	23520
Χρόνος αναμονής (sec)	1870
Χρόνος μέτρησης (sec)	86400

Χρόνος ακτινοβόλησης (sec)	23520
Χρόνος αναμονής (sec)	75780
Χρόνος μέτρησης (sec)	82774

Πίνακας 4.3: Χρονικές παράμετροι για την ακτινοβόληση και τη μέτρηση του γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7 (αριστερά) και του βιολογικού δείγματος IAEA A-13 (δεξιά)

Χρόνος ακτινοβόλησης (sec)	23520
Χρόνος αναμονής (sec)	1009
Χρόνος μέτρησης (sec)	4057

Πίνακας 4.4: Χρονικές παράμετροι για την ακτινοβόληση και τη μέτρηση του στόχου Al

Η ροή των νετρονίων που εισήχθηκε στον κώδικα υπολογίστηκε μέσω του κώδικα MCNP για το κάθε δείγμα όπως φαίνεται παρακάτω στον Πίνακα 4.4. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ενέργεια νετρονίων 14 MeV που υπάρχει σαν προεπιλογή στον κώδικα.

Ροή/ Υλικό	Βιολογικό δείγμα IAEA A-13	Γεωλογικό δείγμα IAEA Soil 7	Στόχος αναφοράς Al
$\Phi(\text{n/cm}^2\text{sec})$	2.24E+04	2.26E+04	1.92E+04
$\delta\Phi(\text{n/cm}^2\text{sec})$	0.15E+04	0.15E+04	0.13E+04

Πίνακας 4.4: Η ροή των νετρονίων για κάθε δείγμα και τα αντίστοιχα σφάλματα

Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων, επιπλέον, εισήχθησαν οι ακριβείς ποσότητες των στοιχείων που υπάρχουν στο κάθε δείγμα όπως έχουν δοθεί παραπάνω στους Πίνακες 3.1 και 3.2, οι ακριβείς μάζες των δειγμάτων όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.5 καθώς και τα χαρακτηριστικά των κρυστάλλων των δύο ανιχνευτών (υλικό, ύψος, διάμετρος κρυστάλλου κλπ) τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 4.5. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία και των δύο ανιχνευτών, όπου ο ένας είναι σχετικής ανιχνευτικής απόδοσης 80% και ο άλλος σχετικής απόδοσης 40%. Με τον πρώτο έγιναν προσομοιώσεις για το βιολογικό δείγμα, IAEA A – 13, και για τον στόχο Al, ενώ με τον δεύτερο για το γεωλογικό δείγμα IAEA Soil 7. Σύμφωνα με τα δύο πειραματικά φάσματα που λήφθηκαν υπολογίστηκε μέσω του προγράμματος ανάλυσης φασμάτων, Tv, το FWHM (Full Width Half Maximum) ορισμένων φωτοκορυφών και αυτές οι πληροφορίες εισήχθησαν με τη σειρά τους στον κώδικα. Επιπλέον, στον κώδικα προστέθηκαν οι ρυθμοί των γεγονότων για ορισμένες κορυφές που αντιστοιχούν σε φυσικά ραδιενεργά ισότοπα οι οποίοι λήφθηκαν από τα πειραματικά φάσματα του υποβάθρου. Αυτές οι πληροφορίες είναι απαραίτητες ώστε να προσεγγιστούν από τον κώδικα όσο το δυνατόν περισσότερο τα πειραματικά φάσματα.

Ένα βασικό μειονέκτημα αυτών των προσομοιώσεων είναι ότι η ενέργεια της δέσμης των νετρονίων του πειράματος διαφέρει από την ενέργεια των

προσομοιώσεων αφού ο κώδικας NAAPRO δέχεται σαν προεπιλογή μόνο ενέργεια των 14 MeV η οποία απαιτεί ενέργεια δέσμης δευτερίων πολύ χαμηλή για το συγκεκριμένο επιταχυντή του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”, ο οποίος απαιτεί αρκετά μεγαλύτερες ενέργειες δευτερίων για να σταθεροποιηθεί η λειτουργία του.

Σχετική απόδοση	80%	Σχετική απόδοση	40%
Διάμετρος κρυστάλλου (cm)	8.15	Διάμετρος κρυστάλλου (cm)	6.07
Ύψος κρυστάλλου (cm)	5.77	Ύψος κρυστάλλου (cm)	6.13
Απόσταση από τον κρύσταλλο έως το "καπάκι" του ανιχνευτή (cm)	0.4	Απόσταση από τον κρύσταλλο έως το "καπάκι" του ανιχνευτή (cm)	0.5
Πάχος ανενεργού όγκου (mm)	1	Πάχος ανενεργού όγκου (mm)	0.5
Παράθυρο αλουμινίου Al (mm)	1	Παράθυρο αλουμινίου Al (mm)	80

Πίνακας 4.5: Στοιχεία των κρυστάλλων των δύο ανιχνευτών, (α) ανιχνευτής απόδοσης 80% (αριστερά), (β) ανιχνευτής απόδοσης 40% (δεξιά)

Γεωλογικό δείγμα IAEA Soil 7

Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα ισότοπα τα οποία λαμβάνονται από τον κώδικα κατά την προσομοίωση της ακτινοβόλησης του γεωλογικού δείγματος *IAEA Soil 7* για δεδομένο χρόνο και οι αντιδράσεις μέσω των οποίων παράγονται. Να σημειωθεί ότι τα ακόλουθα αποτελέσματα έχουν ληφθεί για χρονικές παραμέτρους που συμπίπτουν με τις πειραματικές όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 4.3. Επιπλέον, ο κώδικας υπολογίζει τον αριθμό των γεγονότων που αντιστοιχούν στις φωτοκορυφές ενός ισότοπου καθώς και το ελάχιστο όριο ανίχνευσης, το όριο μέτρησης και το όριο ποσοτικοποίησης.

Ακολουθούν τα προϊόντα της ενεργοποίησης, οι ενεργότητες τους καθώς και οι αντιδράσεις μέσω των οποίων παράγονται στον Πίνακα 4.6 και στον 4.7 ακολουθούν οι αριθμοί των γεγονότων που καταγράφονται για κάθε ισότοπο και τα ελάχιστα όρια ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (sec)	Ενεργότητα στο τέλος της ακτινοβόλησης (Bq)	Αλυσίδα ενεργοποίησης
^{113}Ag	19332	7.72E+02	$^{116}\text{Cd}(n,p)^{116}\text{Ag}(B-)^{116}\text{Cd}(n,a)^{113}\text{Pd}(B-)^{113m}\text{Ag}(IT)^{113}\text{Ag}$

⁵⁶ Mn	9284.04	4.73E-01	⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn
²⁴ Na	53852.4	9.41E-01	²⁷ Al(n,a) ²⁴ Na(48.06%)+ ²⁴ Mg(n,p) ²⁴ Na(22.98%)+ ²⁷ Al(n,a) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na(21.58%)+ ²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na(7.06%)+ ²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na(B-) ²⁴ Mg(n,p) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na(0.22%)+ ²⁵ Mg(n,d) ²⁴ Na(0.11%)

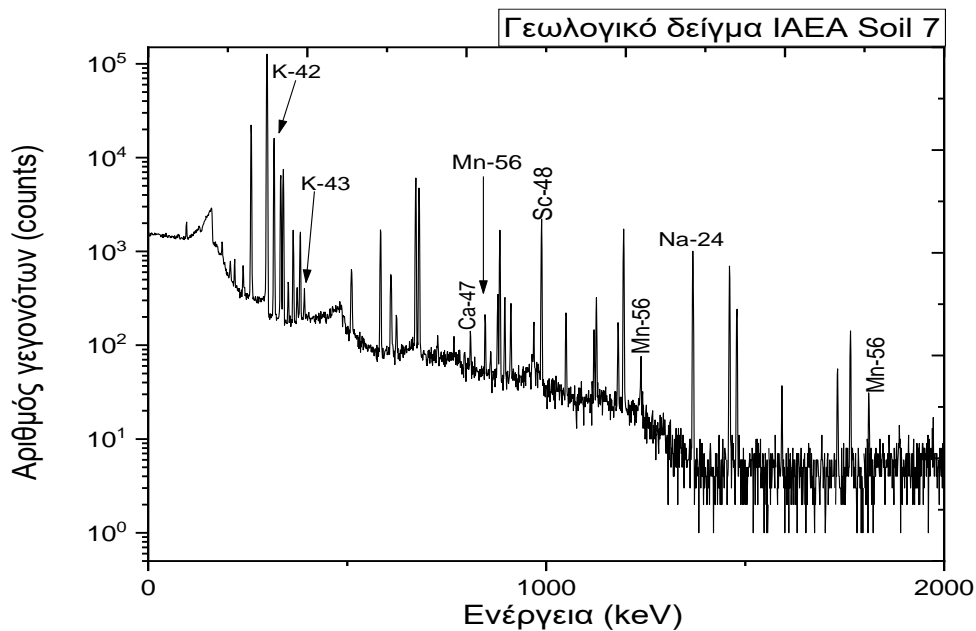
Πίνακας 4.6: Προϊόντα ενεργοποίησης του γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7 και η ενεργότητά τους στο τέλος της ακτινοβολήσης

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αριθμός γεγονότων (counts)	Όριο ανίχνευσης (ppm)
¹¹³ Ag	298.6	1.92E+06	4.66E-04
	258.8	3.14E+05	2.93E-03
	316.3	2.58E+05	4.24E-03
	217.2	5.38E+03	1.78E-01
	672.3	1.73E+05	9.16E-03
	680.6	1.34E+05	1.21E-02
	339.4	1.23E+05	8.66E-03
	333.1	1.14E+05	1.04E-02
	988.4	8.13E+04	2.35E-02
	1194.6	7.27E+04	3.31E-02
⁵⁶ Mn	883.6	5.42E+04	3.26E-02
	846.754	5.46E+03	9.22E+03
	1810.72	1.50E+03	2.46E+04
	2113.05	7.91E+02	5.60E+04
²⁴ Na	2522.88	5.44E+01	9.74E+05
	1368.633	4.79E+04	6.19E+03
	2754.028	3.33E+04	8.18E+03

Πίνακας 4.7: Αριθμός γεγονότων και ελάχιστα όρια ανίχνευσης των προϊόντων ενεργοποίησης του γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7

Επίσης, δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστεί ο ρυθμός δόσης σε απόσταση 1 cm από το δείγμα. Στο τέλος της ακτινοβολήσης η δόση υπολογίστηκε από τον κώδικα είναι $3.67 \cdot 10^{-11} \text{ Gy/s}$.

Τέλος, ο κώδικας προσομοιώνει το αντίστοιχο φάσμα για τις παραμέτρους που εισήχθησαν σε αυτόν. Στο φάσμα (Σχήμα 4.1) οι κορυφές που είναι πιο ευδιάκριτες και παρουσιάζουν σημαντικό αριθμό γεγονότων είναι κυρίως για τα ισότοπα ²⁴Na, ⁵⁶Mn τα οποία είναι τα κυριότερα ισότοπα όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.8 καθώς και τα ⁴²K, ⁴³K, ⁴⁸Sc.



Σχήμα 4.1: Προσομοιωμένο φάσμα του γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7

Βιολογικό δείγμα IAEA A-13

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα προϊόντα ενεργοποίησης που υπολογίστηκαν για το βιολογικό δείγμα IAEA A-13 για τις πειραματικές χρονικές παραμέτρους που φαίνονται στον Πίνακα 4.3.

Για το συγκεκριμένο δείγμα υπήρξε ένα τεχνικό πρόβλημα κατά τη μέτρηση του και για αυτό ο χρόνος αναμονής από το τέλος της ακτινοβόλησης έως την αρχή της μέτρησης ήταν πολύ μεγάλος. Για τους παραπάνω χρόνους όμως ο κώδικας NAAPRO δεν προέβλεπε κάποιο ισότοπο που θα μπορούσε να παραχθεί. Για αυτό το λόγο, εκτελέστηκε η προσομοίωση για τις χρονικές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν και στο γεωλογικό δείγμα *IAEA Soil 7*, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 3.6 και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία θα ήταν δυνατό να ληφθούν αν η μέτρηση είχε πραγματοποιηθεί επιτυχώς.

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (sec)	Ενεργότητα στο τέλος της ακτινοβόλησης (Bq)	Αντίδραση παραγωγής ισότοπου
⁵⁶ Mn	9284.04	2.57E-02	⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn
²⁴ Na	53852.4	1.10E-03	²⁴ Mg(n,p) ²⁴ Na

Πίνακας 4.8: Προϊόντα ενεργοποίησης του δείγματος IAEA A-13, οι αντίστοιχες αντιδράσεις παραγωγής τους και η ενεργότητά τους στο τέλος της ακτινοβόλησης

Ακολουθούν οι αριθμοί των γεγονότων για κάθε ισότοπο, τα ελάχιστα όρια ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης στον Πίνακα 4.9

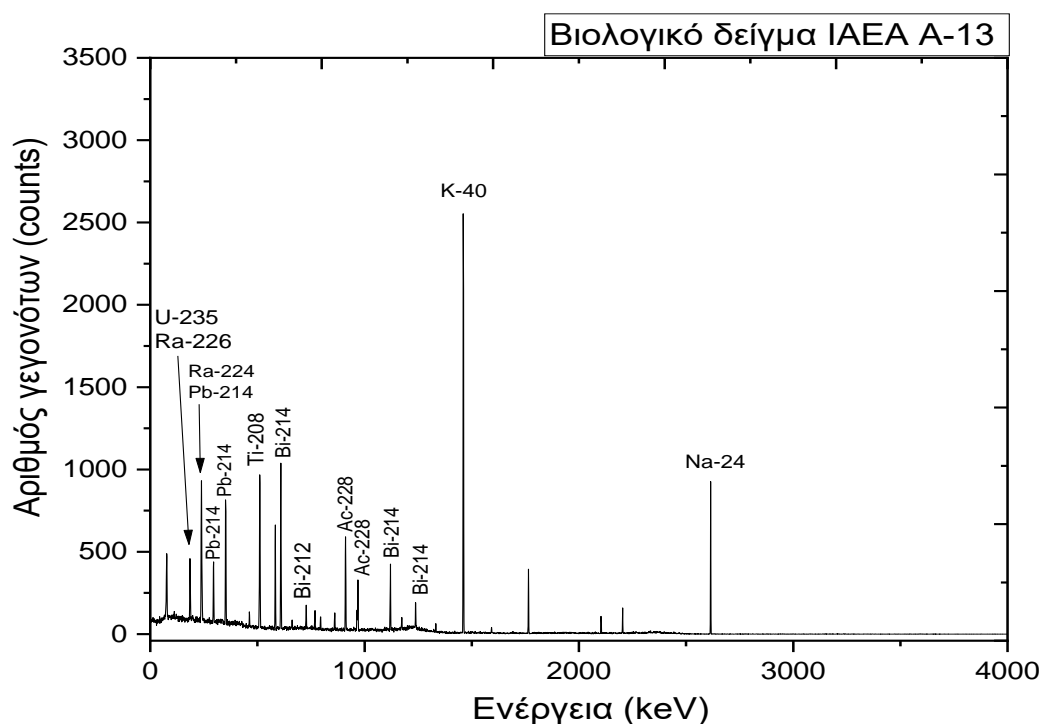
Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αριθμός γεγονότων (counts)	Όριο ανίχνευσης (ppm)
⁵⁶ Mn	846.754	1.19E+00	2.58E+06
²⁴ Na	1368.633	2.77E+01	3.83E+03
	2754.028	2.76E+01	1.80E+03

Πίνακας 4.9: Αριθμοί γεγονότων και ελάχιστα όρια ανίχνευσης των προϊόντων ενεργοποίησης του βιολογικού δείγματος IAEA A-13

Παρατηρείται ότι για όλα τα ισότοπα που υπολογίζονται από τον κώδικα NAAPRO η στατιστική είναι πολύ μικρή για τον αριθμό των γεγονότων όλων των ισωτόπων, συνεπώς στην ενέργεια των 14 MeV , για τη δεδομένη μάζα του δείγματος και για τις χρονικές παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν θα αναμενόταν να ανιχνευτεί κάποιο ισότοπο στην πράξη.

Ο ρυθμός δόσης που υπολογίστηκε σε απόσταση 1 cm από το δείγμα μέσω του κώδικα στο τέλος της ακτινοβολήσης είναι $1.11 \cdot 10^{-14} \text{ Gy/s}$.

Στο σχήμα 4.2 αναπαριστάται το προσομοιωμένο φάσμα του βιολογικού δείγματος IAEA A-13. Στο φάσμα παρατηρείται ότι πέρα από τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα υπάρχει μια κορυφή που αντιστοιχεί στο ²⁴Na. Γενικότερα, έχει παρατηρηθεί ότι ο βομβαρδισμός με νετρόνια ενός δείγματος αίματος οδηγεί στην αντίδραση του σταθερού ισωτόπου ²³Na και παράγεται το ισότοπο ²⁴Na. [17]



Σχήμα 4.2: Προσομοιωμένο φάσμα του βιολογικού δείγματος IAEA A-13

Στόχος Al

Στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται τα προϊόντα ενεργοποίησης που υπολογίστηκαν για το στόχο αναφοράς του Al για τις πειραματικές χρονικές παραμέτρους που φαίνονται στον Πίνακα 4.4

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (sec)	Ενεργότητα στο τέλος της ακτινοβόλησης (Bq)	Αντίδραση παραγωγής ισοτόπου
²⁷ Mg	567.48	8.30E+00	²⁷ Al(n,p) ²⁷ Mg
²⁴ Na	53852.4	3.51E+00	²⁷ Al(n,a) ²⁴ Na(69.01%)+ ²⁷ Al(n,a) ^{24m} Na(IT) ²⁴ Na(30.99%)

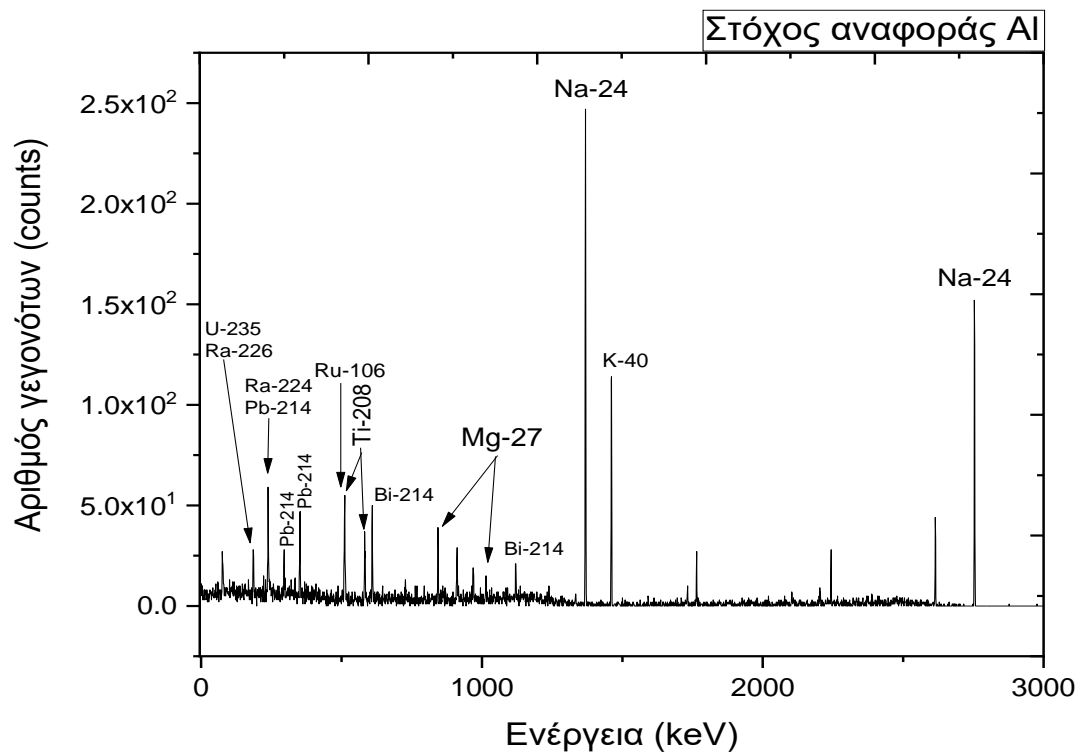
Πίνακας 4.10: Προϊόντα ενεργοποίησης του στόχου του Al , οι αντίστοιχες αντιδράσεις παραγωγής τους και η ενεργότητά τους στο τέλος της ακτινοβόλησης

Ακολουθούν οι αριθμοί των γεγονότων, τα ελάχιστα όρια ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης για κάθε ένα από τα προϊόντα ενεργοποίησης.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Αριθμός γεγονότων (counts)	Όριο ανίχνευσης (ppm)
²⁷ Mg	170.686	1.58E+01	2.60E+07
	843.76	1.41E+03	2.44E+05
	1014.44	5.51E+02	7.74E+05
²⁴ Na	1368.633	1.37E+04	2.21E+04
	2754.028	1.37E+04	1.63E+04

Πίνακας 4.11: Αριθμοί γεγονότων και ελάχιστα όρια ανίχνευσης των προϊόντων ενεργοποίησης του στόχου του Al

Επιπλέον, ο ρυθμός δόσης στο τέλος της ακτινοβόλησης που υπολογίστηκε είναι $7.86 \cdot 10^{-12}$ Gy/s. Ακολουθεί το προσομοιωμένο φάσμα για τον στόχο αναφοράς του Al.



Σχήμα 4.3: Προσομοιωμένο φάσμα του στόχου του Al

Στο Παράρτημα I παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα όπως προέκυψαν από τα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα που λήφθηκαν από τον κώδικα NAAPRO.

5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στα πλαίσια της εργασίας ένα βιολογικό και ένα γεωλογικό δείγμα μελετήθηκαν πειραματικά με τη μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης καθώς και με προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν μέσω του κώδικα NAAPRO.

Σχετικά με τα αποτελέσματα του κώδικα για τους πέντε προκαταρκτικούς κύκλους ακτινοβολήσης μελετήθηκαν τα βραχύβια και μακρόβια ισότοπα όπου μέσω αυτών των υπολογισμών δίνεται η δυνατότητα να απομονωθούν τα ισότοπα ενδιαφέροντος και να επιλεχθούν οι κατάλληλες παράμετροι ακτινοβολήσης και μέτρησης ώστε να ληφθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα στο πείραμα. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι αριθμοί των γεγονότων των ισωτόπων, τα ελάχιστα όρια ανίχνευσης, όρια μέτρησης και ποσοτικοποίησης. Οι προσομοιώσεις με τον κώδικα NAAPRO έδειξαν ότι είναι εφικτή η ανίχνευση των ισωτόπων που παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 5.1.

Στις προσομοιώσεις με τις πειραματικές παραμέτρους η μόνη παράμετρος η οποία δεν είναι η ίδια σε πείραμα και προσομοίωση είναι αυτή της ενέργειας της δέσμης των νετρονίων, όπου η πειραματική ενέργεια είναι 18.9 MeV ενώ η ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα NAAPRO για την προσομοίωση είναι στα 14 MeV , η οποία είναι η μόνη που δέχεται ο κώδικας για την επιλογή του επιταχυντή σαν πηγή νετρονίων. Ο λόγος αυτής της διαφοράς είναι διότι ο κώδικας NAAPRO είναι σχεδιασμένος κυρίως για να προσομοιώνει ακτινοβολήσεις με νετρόνια με τη χρήση πυρηνικών αντιδραστήρων ή γεννητριών νετρονίων. Αναμένεται, λοιπόν, τα προϊόντα της ενεργοποίησης στην προσομοίωση να διαφέρουν από αυτά του πειράματος, λόγω των διαφορετικών ενεργών διατομών των αντιδράσεων στις δύο διαφορετικές ενέργειες. Πράγματι παρατηρούνται διαφορές στα ισότοπα που προβλέπεται να παραχθούν από τον κώδικα και στα ισότοπα που παράγονται στο δείγμα. Επίσης, οι αριθμοί των γεγονότων των ισωτόπων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους καθώς και τα ελάχιστα όρια ανίχνευσης και όρια ποσοτικοποίησης. Διαφορές όμως παρατηρούνται και στα πειραματικά φάσματα σε σχέση με τα αντίστοιχα υπολογιστικά.

Κύκλος	Χημικό στοιχείο	Προϊόν ενεργοποίησης
1 ^{ος}	Fe	⁵⁷ Mn
2 ^{ος}	Cd	¹¹³ Ag
	Fe	⁵³ Fe
	Ca	⁴⁹ Ca ⁴⁴ K
3 ^{ος}	Cd	¹¹³ Ag
4 ^{ος}	Cd	¹¹³ Ag
	Ca	⁴³ K
5 ^{ος}	As	⁷⁴ As
		⁷⁶ As
	Ni	⁵⁷ Co
		⁵⁷ Ni
	Na	²² Na
	Pb	²⁰³ Pb
	Sb	¹²² Sb
Y	⁸⁸ Y	

Κύκλος	Χημικό στοιχείο	Προϊόν ενεργοποίησης
1 ^{ος}	P	²⁸ Al
	Fe	⁵⁶ Mn
	Mg	²⁴ Na
2 ^{ος}	K	³⁸ Cl
	Fe	⁵⁶ Mn
	Mg	²⁴ Na
3 ^{ος}	K	³⁸ Cl
	Fe	⁵⁶ Mn
	Mg	²⁴ Na
4 ^{ος}	Na	²² Na
	Mg	²⁴ Na
5 ^{ος}	Ca	⁴⁷ Ca
		⁴⁷ Sc
	Fe	⁵¹ Cr
		⁵⁴ Mn
	Zn	⁶⁷ Cu
		⁶⁵ Zn
Na	²² Na	

Πίνακας 5.1: Προϊόντα ενεργοποίησης που είναι δυνατό να ανιχνευτούν σε κάθε κύκλο ακτινοβολήσης για το (α) γεωλογικό δείγμα (αριστερά) και το (β) βιολογικό δείγμα (δεξιά)

Πιο συγκεκριμένα, για το γεωλογικό δείγμα όπως και για τον στόχο αναφοράς του *Al* το μόνο ισότοπο το οποίο παρατηρείται και σε πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα είναι το ²⁴Na, για το οποίο όμως ο υπολογιστικός αριθμός γεγονότων είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σχέση με τον πειραματικό. Η προσπάθεια επιβεβαίωσης των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων, λοιπόν, έδωσε περιορισμένα αποτελέσματα γιατί:

1. Η ροή των νετρονίων στο πείραμα ήταν πολύ μικρή.
2. Η ενέργεια του πειράματος διέφερε από την ενέργεια της προσομοίωσης.
3. Ο κώδικας θεωρεί μόνο σημειακές πηγές και όχι εκτεταμένες όπως στο πείραμα.
4. Από τον κώδικα δε λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης ή της αυτό-εξασθένισης των νετρονίων.
5. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε φιαλίδια πολυαιθυλενίου για να ακτινοβοληθούν τα οποία δεν λήφθηκαν υπόψη στις προσομοιώσεις αν και δεν αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

6. Ο κώδικας αγνοεί την πιθανότητα να πέσουν ταυτόχρονα δύο φωτόνια στο παράθυρο του ανιχνευτή τα οποία δεν διακρίνονται ως δύο διαφορετικά αλλά ως το άθροισμα των δύο (κορυφές αθροίσματος) [6].
7. Ο κώδικας θεωρεί το νεκρό χρόνο της απόκρισης του ανιχνευτή μηδενικό [6].

Συμπερασματικά, τα κυριότερα προβλήματα στα οποία οφείλονται οι αποκλίσεις των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων είναι η πολύ χαμηλή ροή των νετρονίων, η αβεβαιότητα στην τιμή της ροής και το σημαντικότερο όλων η διαφορά στην ενέργεια των νετρονίων που υπάρχει μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Επισημαίνεται ότι επειδή κατά τη διάρκεια της μέτρησης του δείγματος του αίματος *IAEA A – 13* η μέτρηση διακόπηκε και συνεχίστηκε ορισμένες ώρες αργότερα έτσι ώστε να μην ανιχνευτεί κάποιο άλλο ισότοπο πέραν των φυσικών ραδιενεργών ισωτόπων, επομένως δεν υπάρχει λόγος να γίνει προσπάθεια επιβεβαίωσης των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων αφού η μέτρηση του δείγματος ήταν ανεπιτυχής.

5.2 Προοπτικές

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας πραγματοποιήθηκε η συστηματική μελέτη της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση με δέσμες ταχέων νετρονίων ενέργειας 14 MeV . Θα μπορούσε να επεκταθεί η μελέτη σε άλλες ενέργειες νετρονίων ώστε να αξιοποιηθούν πυρηνικές αντιδράσεις με διαφορετικά κατώφλια. Με αυτό τον τρόπο θα δινόταν και η δυνατότητα να μελετηθούν τα αποτελέσματα του πειράματος ακριβώς στις ίδιες συνθήκες με αυτές του κώδικα NAAPRO και σε αυτή την περίπτωση θα εξακριβωθεί αν οι προσομοιώσεις θα προβλέψουν ακριβώς τα πειραματικά αποτελέσματα.

Από τη στιγμή που δεν επιτεύχθηκε η πειραματική επιβεβαίωση θα πρέπει να επαναληφθεί το πείραμα σε αυτές και σε άλλες ενέργειες ώστε να επιβεβαιωθεί πειραματικά η αξιοπιστία των υπολογισμών.

Θα μπορούσε να υλοποιηθεί η σύγκριση του κώδικα με άλλους αντίστοιχους υπολογιστικούς κώδικες που δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμών της παραγωγής ραδιονουκλιδίων μετά από ακτινοβόληση σε πεδία νετρονίων όπως π.χ. Neutron Activation Analysis DataBase (NAADB) με το οποίο μπορούν να προβλεθούν τα προϊόντα ενεργοποίησης για ένα συγκεκριμένο δείγμα όπου εισάγονται πληροφορίες σχετικές με τη στοιχειακή του σύσταση και πληροφορίες αναφερόμενες στην ακτινοβόλησή του όπως η ροή των νετρονίων ή οι χρονικές παράμετροι, με το

FISPACT-II αλλά και με Monte Carlo κώδικες μεταφοράς ακτινοβολίας στην ύλη όπως π.χ. ο κώδικας MCNP.

Τέλος, τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αποτελούν δείγματα αναφοράς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των στοιχείων ενός άγνωστου δείγματος με παρόμοια μήτρα μέσω σύγκρισης.

Βιβλιογραφία

- [1] Glascock, M. and Neff, H., 2021. *Neutron activation analysis and provenance research in archaeology*.
- [2] Witkowska, E., Szczepaniak, K. and Biziuk, M., 2005. Some applications of neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 265(1), pp.141-150.
- [3] Greenberg, R., Bode, P. and De Nadai Fernandes, E., 2011. Neutron activation analysis: A primary method of measurement. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 66(3-4), pp.193-241.
- [4] Van De Graaff, R., 1960. Tandem Electrostatic Accelerators. *Nuclear Instruments and Methods*, 8(2), pp.195-202.
- [5] Witkowska, E., Szczepaniak, K. and Biziuk, M., 2005. Some applications of neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 265(1), pp.141-150.
- [6] V.K.Basenko, A.N.Berlizov, R.H.Filby, I.A.Malyuk, V.V.Tryshyn NAAPRO (Neutron Activation Analysis PRognosis and Optimization) Model Description
- [7] Currie, L., 1968. Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry. *Analytical Chemistry*, 40(3), pp.586-593.
- [8] Laul, J. and Wogman, N., 1981. 14 MeV Neutron Activation Analysis of Geological and Lunar Samples. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 28(2), pp.1703-1705.
- [9] Verma, H., 2011. *Atomic and nuclear analytical methods*. Berlin: Springer.
- [10] Harvey, D. and Harvey, D., 2000. *Solutions manual to accompany modern analytical chemistry*. Boston: McGraw-Hill.
- [11] Tsoulfanidis, N. and Landsberger, S., n.d. *Measurement and detection of radiation*.
- [12] KNOLL, G., 2020. RADIATION DETECTION AND MEASUREMENT. [S.I.]: JOHN WILEY.
- [13] Αθηνά Πάκου, «Πειραματικές μέθοδοι στην Πυρηνική Φυσική», Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (1999)
- [14] «Εργαστηριακές Ασκήσεις Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων», Ε.Μ.Π.
- [15] Διπλωματική εργασία, «Μέτρηση της ενεργού διατομής της αντίδρασης

^{241}Am (n, 2n) ^{240}Am », Ε.Μ.Π., Καλαμαρα Αντιγόνη (2011)

[16] Cooper, J., 1970. Factors determining the ultimate detection sensitivity of Ge(Li) gamma-ray spectrometers. *Nuclear Instruments and Methods*, 82, pp.273-277.

[17] En.wikipedia.org. 2021. *Isotopes of sodium - Wikipedia*. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_sodium> [Accessed 17 September 2021].

[18] Integrated Publishing, I., 2021. *Cross*. [online] Tpub.com. Available at: <<http://www.tpub.com/doenuclearphys/nuclearphysics39.htm>> [Accessed 27 October 2021].

[19] Eclass.hmu.gr. 2021. [online] Available at: <<https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/TH134/%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1-%CE%95%CE%B1%CF%81%CE%B9%CE%BD%CF%8C%202019-20/3.%CE%97%CE%BC%CE%B9%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%BF%CE%B9.pdf>> [Accessed 27 October 2021].

[20] shankarpro1. 2021. *Panels and Powerwalls*. [online] Available at: <<https://shankarpro1.wordpress.com/2015/06/05/panels-and-powerwalls/>> [Accessed 27 October 2021].

[21] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122274105002738>

Παράρτημα Ι
Πειραματικό μέρος

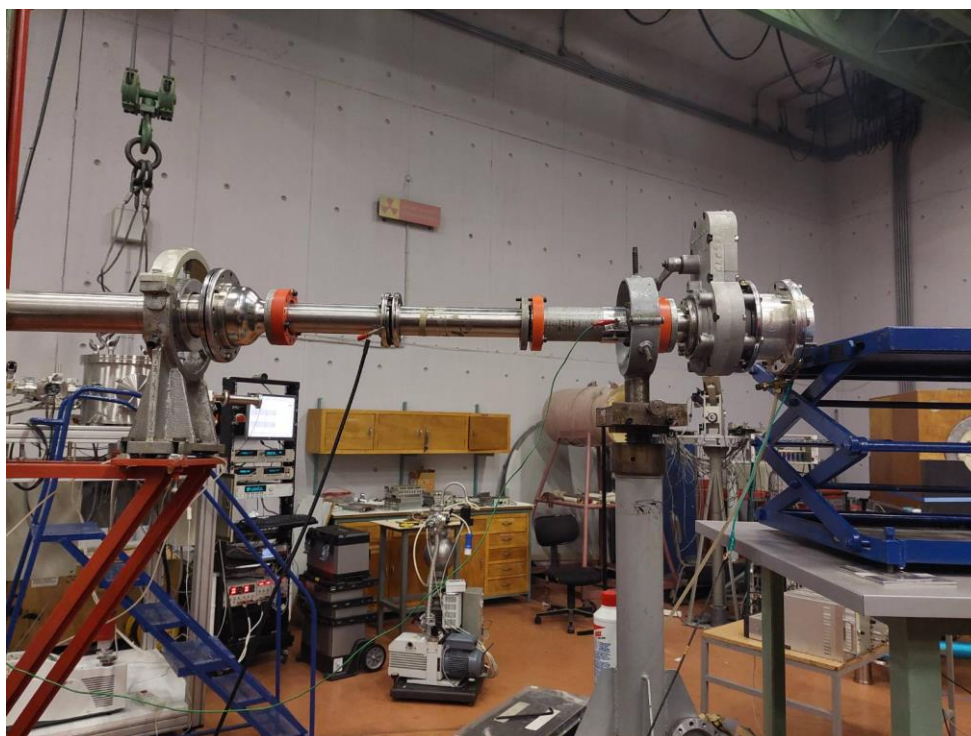
Σε αυτό το σημείο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Συγκεκριμένα περιγράφεται η διάταξη της ακτινοβόλησης των δειγμάτων, τα δείγματα, οι ανιχνευτικές διατάξεις *HPGe* που κατέγραψαν τα προϊόντα ενεργοποίησης των ακτινοβοληθέντων στόχων και η διαδικασία ακτινοβόλησης- μέτρησης και ανάλυσης των δειγμάτων.

1. Επιταχυντής

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο επιταχυντής tandem, του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Η παραγωγή δέσμης νετρονίων στηρίζεται στη χρήση πυρηνικής αντίδρασης και συγκεκριμένα μέσω της αντίδρασης ${}^3\text{H}({}^2\text{H}, n){}^4\text{He}$. Από το επιταχυντικό σύστημα εξέρχεται μία δέσμη δευτερίων ενέργειας 3.45 MeV και η δέσμη αυτή μεταφέρεται μέσα σε μια γραμμή, η οποία διατηρείται σε κενό ώσπου να φτάσει στο στόχο, στον οποίο βρίσκεται το τρίτιο (${}^3\text{H}$) και εκεί πραγματοποιείται η αντίδραση που περιγράφηκε παραπάνω. Με αυτό τον τρόπο παράγεται η δέσμη των νετρονίων ενέργειας 18.9 MeV .



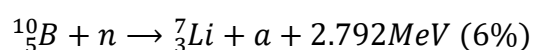
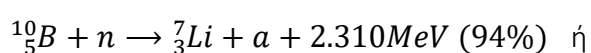
Εικόνα 1: Γραμμή μεταφοράς δέσμης δευτερίων



Εικόνα 2: Μέρος της γραμμής μεταφοράς της δέσμης των δευτερίων που καταλήγει στον στόχο τριτίου το οποίο βρίσκεται στη φλάντζα και οδηγεί στην παραγωγή των νετρονίων

2. Ανίχνευση νετρονίων

Κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης των δειγμάτων είναι αναγκαίο να παρακολουθείται και να καταγράφεται η διακύμανση της δέσμης των νετρονίων. Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται ανιχνευτές με αέριο όπως οι ανιχνευτές τριφθοριούχου βορίου (BF_3) ή ανιχνευτές ηλίου (3He). Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένας ανιχνευτής τριφθοριούχου βορίου (BF_3).[15] Την ανίχνευση των νετρονίων δυσκολεύει το πρόβλημα της απουσίας φορτίου σε αυτά, οπότε η ανίχνευσή τους γίνεται με έμμεσο τρόπο. Δηλαδή, δεν ανιχνεύονται τα νετρόνια αλλά τα προϊόντα των αντιδράσεων στις οποίες λαμβάνουν μέρος. Συγκεκριμένα ένας ανιχνευτής τριφθοριούχου βορίου αποτελείται από αέριο BF_3 . Τα νετρόνια, αφού θερμοποιηθούν σε ένα παχύ περίβλημα παραφίνης, αλληλεπιδρούν με το ^{10}B και παράγονται πυρήνες 7Li και 4He που ανιχνεύονται καθώς χάνουν ενέργεια στο αέριο.

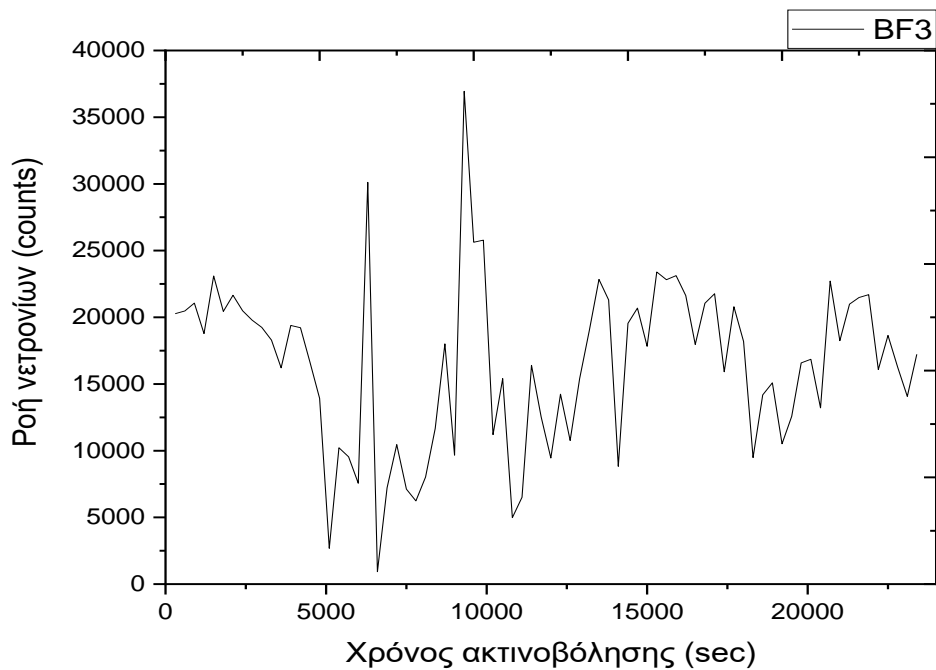


Το πρόβλημα που υπάρχει με τους ανιχνευτές BF_3 είναι ότι η ενεργός διατομή της αντίδρασης για ταχεία νετρόνια είναι πολύ μικρή, ενώ για θερμικά νετρόνια είναι υψηλή. Για τον λόγο αυτό, ο ανιχνευτής τριφθοριούχου βορίου περιβάλλεται από παραφίνη. Τα ταχεία νετρόνια τα οποία παράγονται στον επιταχυντή σκεδάζονται ελαστικά στους πυρήνες της παραφίνης, χάνουν μεγάλο μέρος της ενέργειάς τους και έτσι όταν φτάνουν στον ενεργό όγκο του ανιχνευτή έχουν χάσει ενέργεια και από ταχεία νετρόνια έχουν μετατραπεί σε θερμικά τα οποία είναι και τα επιθυμητά.



Εικόνα 3: Ανιχνευτής BF_3

Μέσω του ανιχνευτή BF_3 μελετώνται οι διακυμάνσεις της δέσμης των νετρονίων κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, στο οποίο παρατηρείται ότι υπήρχαν έντονες διακυμάνσεις. Να σημειωθεί ότι λόγω του μηχανισμού ανίχνευσης των νετρονίων δεν παρέχεται καμία πληροφορία για την ενέργειά τους.



Σχήμα 1: Διάγραμμα διακυμάνσεων της δέσμης νετρονίων όπου έχει ληφθεί από τον ανιχνευτή BF_3



Εικόνα 4: Ολική διάταξη που αποτελείται από την γραμμή μεταφοράς της δέσμης και από τον ανιχνευτή BF_3

3. Τοποθέτηση των δειγμάτων

Για την εφαρμογή της μεθόδου της νετρονικής ενεργοποίησης ακτινοβολήθηκαν τα δύο δείγματα *IAEA A – 13* και *IAEA Soil 7*, όπου δείγματα από αυτά τα υλικά τοποθετήθηκαν σε φυαλίδια. Εκτός από αυτά τα δύο υλικά κατά την ακτινοβόληση τοποθετήθηκε ένας στόχος αναφοράς *Al* (αλουμινίου) και ένα κενό

φιαλίδιο ίδιο με αυτά στα οποία τοποθετήθηκαν τα υλικά. Ο στόχος αναφοράς χρησιμοποιείται ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η ροή των νετρονίων στη θέση τοποθέτησης των δειγμάτων μέσω της αντίδρασης ${}_{27}\text{Al}(n, a){}_{24}\text{Na}$, γνωστής ενεργού διατομής. Χρησιμοποιήθηκαν τρία φιαλίδια στα οποία τοποθετήθηκε το δείγμα του αίματος, άλλα τρία φιαλίδια στα οποία τοποθετήθηκε το χρώμα και δύο επιπλέον φιαλίδια τα οποία έμειναν κενά. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι μάζες των δύο υλικών αναφοράς που ακτινοβολήθηκαν, αυτών που προετοιμάστηκαν αλλά δεν ακτινοβολήθηκαν και των κενών φιαλιδίων.

Υλικό αναφοράς	Κωδικός φιαλιδίου	Μάζα φιαλιδίου (g)	Μάζα φιαλιδίου και σκόνης (g)	Μάζα σκόνης (g)
IAEA-Soil-7	1	1.7548	2.9023	1.1475
	2	1.7500	2.8737	1.1237
	3	1.7506	2.6136	0.8630
IAEA-A-13	4	1.7352	2.2863	0.5511
	5	1.7440	2.2984	0.5544
	6	1.7508	2.2574	0.5066
Blank	B1	1.7540	-	-
	B2	1.7720	-	-

Πίνακας 1: Μάζες δειγμάτων και φιαλιδίων

Από τα δείγματα του Πίνακα 1 αυτά που ακτινοβολήθηκαν ήταν τα φιαλίδια με αριθμούς 3, 6 και B2 και επιπλέον ο στόχος αναφοράς *Al* με μάζα 0.256 g , διάμετρο $D = 15\text{ mm}$ και πάχος $t = 0.5\text{ mm}$. Τα δύο δείγματα των υλικών τοποθετήθηκαν μπροστά το ένα δίπλα στο άλλο, από πίσω ο στόχος αναφοράς *Al* και στο τέλος το κενό φιαλίδιο. Οι στόχοι τοποθετήθηκαν έτσι ώστε το πρώτο φιαλίδιο από το κέντρο του να απέχει απόσταση 4.2 cm από τη φλάντζα *Al (TiT)*, ενώ το κενό φιαλίδιο B2 από το κέντρο του να απέχει απόσταση 4.56 cm . Οι χρονικές παράμετροι για κάθε δείγμα και για τον στόχο αναφοράς *Al* παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Χρόνος ακτινοβόλησης (sec)	23520
Χρόνος αναμονής (sec)	1870
Χρόνος μέτρησης (sec)	86400

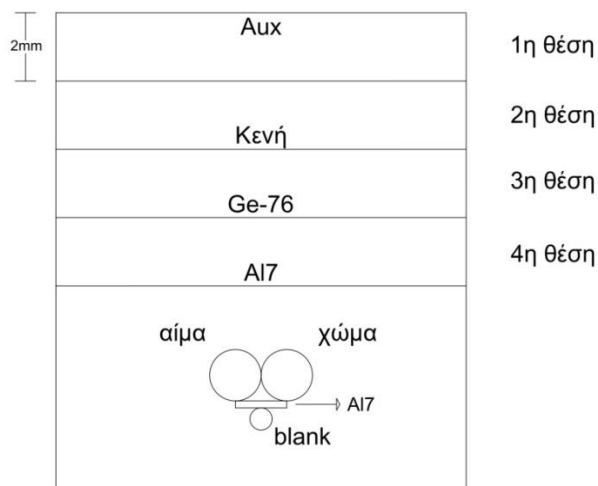
Χρόνος ακτινοβόλησης (sec)	23520
Χρόνος αναμονής (sec)	75780
Χρόνος μέτρησης (sec)	82774

Πίνακας 2: Χρονικές παράμετροι για την ακτινοβόληση και τη μέτρηση του γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7 (αριστερά) και του βιολογικού δείγματος IAEA A-13 (δεξιά)

Χρόνος ακτινοβόλησης (sec)	23520
Χρόνος αναμονής (sec)	1009
Χρόνος μέτρησης (sec)	4057

Πίνακας 3: Χρονικές παράμετροι για την ακτινοβόληση και τη μέτρηση του στόχου Al

Τα δείγματα τοποθετήθηκαν πίσω από ορισμένα άλλα δείγματα που αποτελούν μέρος διαφορετικής εργασίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 και στις Εικόνες 5.



Σχήμα 2: Τοποθέτηση όλων των δειγμάτων στην πειραματική διάταξη. Το αίμα αντιστοιχεί στο φυαλίδιο με αριθμό 6, στο χώμα το φυαλίδιο με αριθμό 3 και το blank αντιστοιχεί στο κενό μπουκάλι με αριθμό B2.



Εικόνα 5: Τοποθέτηση των δειγμάτων

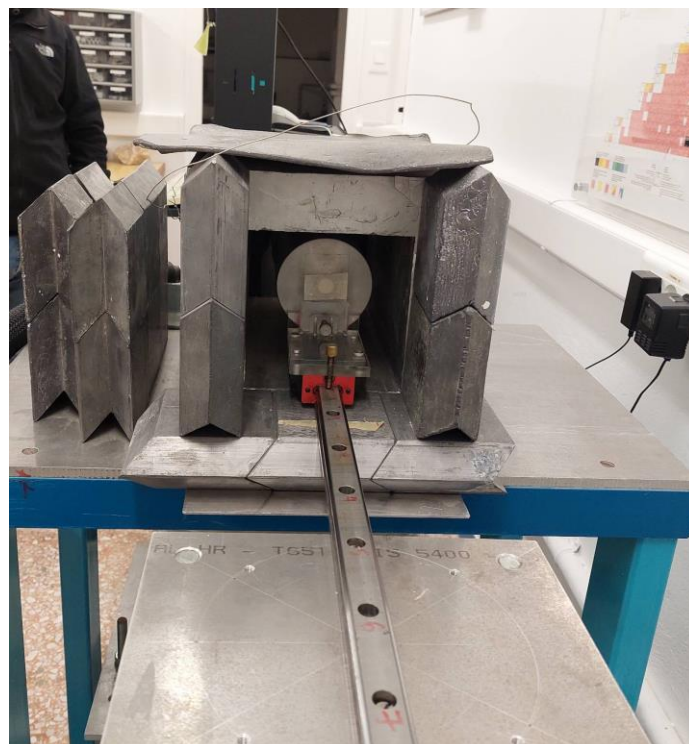
4. Ανιχνευτικά συστήματα για τη μέτρηση των ακτίνων γάμμα

Οι ανιχνευτές που προτιμούνται για την ανίχνευση των ακτίνων γάμμα είναι οι ανιχνευτές ημιαγωγών και κυριότερα οι ανιχνευτές γερμανίου υψηλής καθαρότητας (*HPGe*). Το σήμα που λαμβάνεται από τον ανιχνευτή είναι ασθενές και εισερχόμενο στον προενισχυτή, ενισχύεται και εξέρχεται ως ηλεκτρικό σήμα της τάξης των *mV*. Το σήμα μετά τον προενισχυτή διοχετεύεται στον ενισχυτή, όπου ενισχύεται περαιτέρω και μορφοποιείται σε γκαουσιανή καμπύλη. Μετά την ηλεκτρονική επεξεργασία το σήμα οδηγείται σε μια μονάδα μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό σήμα ή μονάδα *ADC (Analog to Digital Converter)* και τελικά το ψηφιακό σήμα οδηγείται σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η διεργασία αυτή οδηγεί σε ένα φάσμα με μορφή ιστογράμματος. [13]

Τα φάσματα που λήφθηκαν από τα ακτινοβολημένα δείγματα μετρήθηκαν στους δύο ανιχνευτές *Ge* του εργαστηρίου ανιχνευτικής απόδοσης 80% και 40%. Και οι δύο ανιχνευτές ήταν ήδη βαθμονομημένοι. Για την λήψη των φασμάτων τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1 *cm*. Και οι δύο ανιχνευτές είναι θωρακισμένοι με μόλυβδο πάχους 5 *cm* όπως φαίνεται στις Εικόνες 6 και 7. Τα τέσσερα δείγματα που ακτινοβολήθηκαν ομαδοποιήθηκαν ώστε να μετρηθούν στους δύο ανιχνευτές. Αρχικά τοποθετήθηκαν ο στόχος αναφοράς του *Al* στον ανιχνευτή απόδοσης 80% και το άδειο φιαλίδιο στον ανιχνευτή απόδοσης 40%. Το *Al* μετρήθηκε περίπου για μία ώρα ενώ το κενό φιαλίδιο δεν έδινε σημαντικό αριθμό γεγονότων σε κάποιο άλλο ισότοπο πέραν των φυσικών ραδιενεργών ώστε να μπορούν να ληφθούν υπόψη οι μετρήσεις αυτές. Ακολούθησε η μέτρηση των άλλων δύο δειγμάτων, του αίματος, *IAEA A – 13*, και του χώματος, *IAEA Soil 7*. Στον ανιχνευτή σχετικής απόδοσης 80% τοποθετήθηκε το δείγμα του αίματος και στον ανιχνευτή σχετικής απόδοσης 40% τοποθετήθηκε το δείγμα του χώματος. Το δείγμα του αίματος και ο στόχος αναφοράς του *Al* τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1 *cm* από το παράθυρο του ανιχνευτή σχετικής απόδοσης 80%, ενώ το γεωλογικό δείγμα τοποθετήθηκε σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή σχετικής απόδοσης 40%.



Εικόνα 6: Ο ανιχνευτής Ge απόδοσης 40%



Εικόνα 7: Ο ανιχνευτής Ge απόδοσης 80%

Να επισημανθεί ότι λόγω ενός τεχνικού προβλήματος η μέτρηση του βιολογικού δείγματος, *IAEA A – 13*, σταμάτησε και υπήρχε μια μεγάλη καθυστέρηση ώσπου ξεκίνησε η μέτρησή του ξανά, ουσιαστικά την επόμενη μέρα από την μέρα της ακτινοβόλησής του. Από τον κώδικα NAAPRO προβλέθηκε ότι τα μόνα ισότοπα που θα παράγονταν θα ήταν το ^{56}Mn και το ^{24}Na με χρόνους ημιζωής $t_{1/2} = 2.5789\text{ h}$ και $t_{1/2} = 14.959\text{ h}$ αντίστοιχα. Και οι δύο χρόνοι ημιζωής των ισωτόπων,

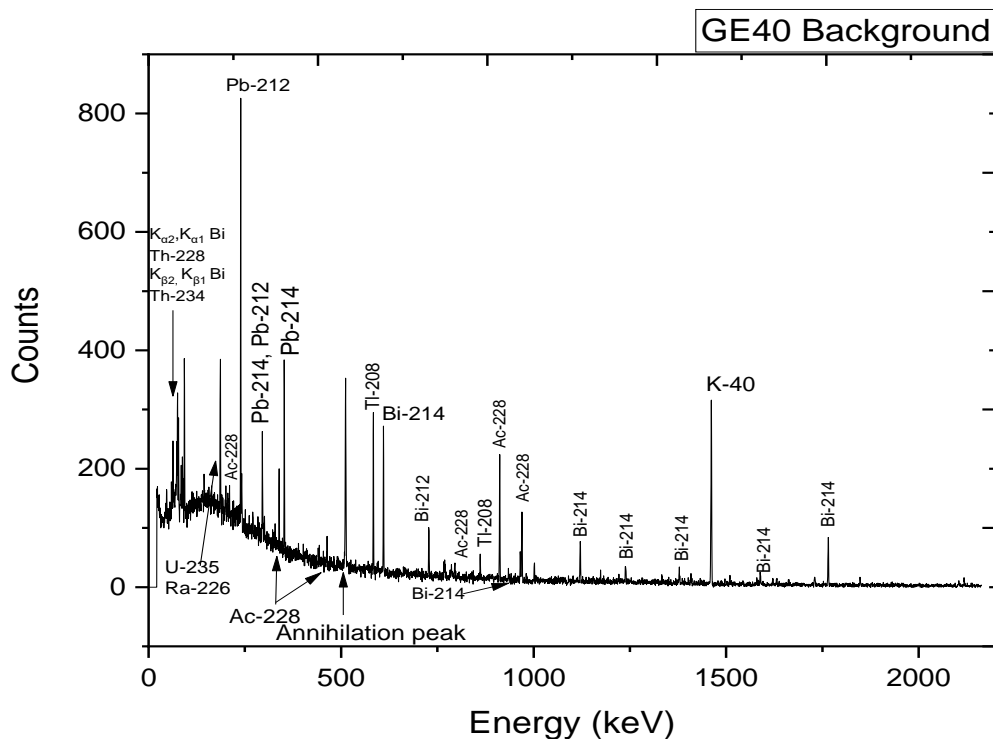
όμως, είναι μικρότεροι από τον χρόνο αναμονής από το τέλος της ακτινοβόλησης μέχρι την αρχή της μέτρησης, οπότε δεν αναμένεται να ανιχνευτεί σημαντικός αριθμός κρούσεων ώστε να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση.

Κάθε φάσμα από αυτά που λήφθηκαν από τους ανιχνευτές χαρακτηρίζεται από δύο χρόνους, τον πραγματικό χρόνο λήψης του φάσματος (live time) και τον χρόνο λήψης του φάσματος (real time), ο οποίος ουσιαστικά είναι το άθροισμα του πραγματικού χρόνου λήψης του φάσματος και του νεκρού χρόνου. Νεκρός χρόνος είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε να μπορέσει ο ανιχνευτής να καταμετρήσει δυο διαδοχικές ακτίνες γάμμα.

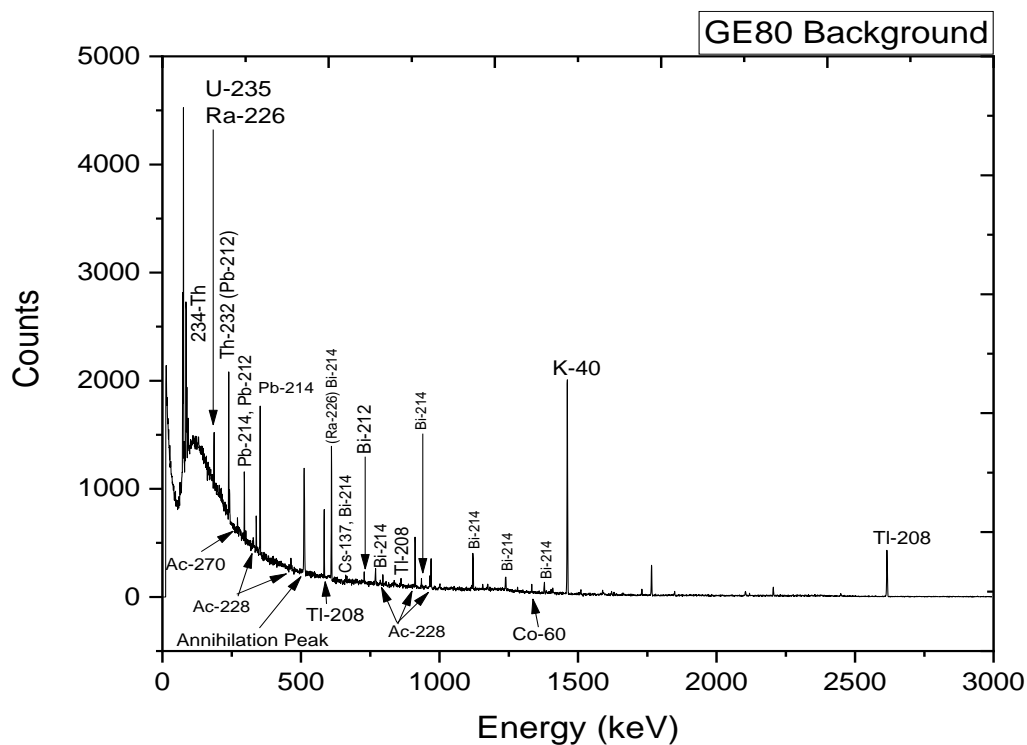
Πειραματικά αποτελέσματα

1. Φάσματα υποβάθρου

Πριν την ακτινοβόληση των δειγμάτων έγιναν μετρήσεις του φάσματος του υποβάθρου για τους δύο ανιχνευτές. Παρακάτω στα σχήματα 3 και 4 παρουσιάζονται τα δύο φάσματα που λήφθηκαν από τους δύο ανιχνευτές.



Σχήμα 3: Φάσμα υποβάθρου όπως αυτό καταγράφηκε από τον ανιχνευτή Ge ανιχνευτικής απόδοσης 40%.



Σχήμα 4: Φάσμα υποβάθρου όπως αυτό μετρήθηκε από τον ανιχνευτή Ge ανιχνευτικής απόδοσης 80%.

Ο πραγματικός χρόνος καταγραφής του φάσματος του υποβάθρου από τον ανιχνευτή σχετικής απόδοσης 40 % είναι 70547 sec, ενώ για τον ανιχνευτή σχετικής απόδοσης 80 % είναι 86400 sec.

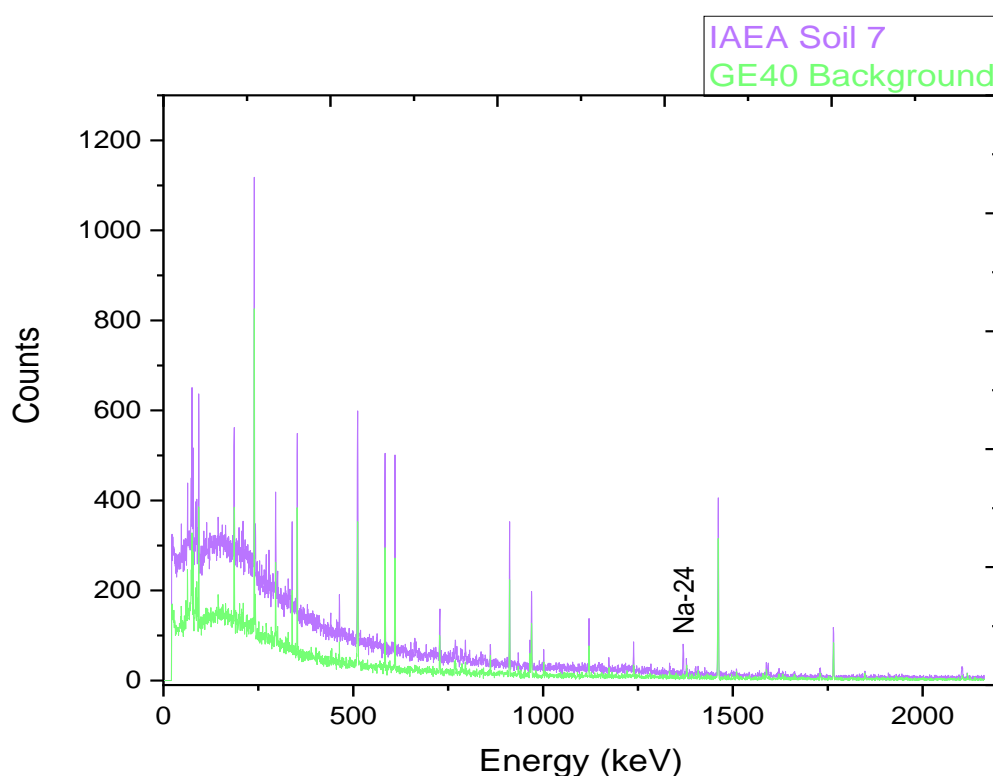
Μέσω αυτών των φασμάτων είναι δυνατό να μελετηθούν τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που υπάρχουν στη φύση και συγκεκριμένα στο έδαφος, στα πετρώματα ή στα οικοδομικά υλικά. Τα πιο συνήθη ισότοπα που ανιχνεύονται είναι τα ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{226}Ra και ^{222}Rn . Τα φάσματα του υποβάθρου είναι ιδιαίτερα χρήσιμα ώστε όταν μελετηθούν μαζί με τα φάσματα ραδιενεργών πηγών ή ακτινοβολημένων δειγμάτων με νετρόνια, που έχουν ενεργοποιηθεί και εκπέμπουν ακτίνες γάμμα, να μπορούν να διακριθούν οι ακτίνες γάμμα της φυσικής ραδιενέργειας από τις ακτίνες γάμμα των προϊόντων ενεργοποίησης, ειδικότερα σε ενεργειακές περιοχές που οι ακτίνες γάμμα ενδιαφέροντος και του υποβάθρου είναι πολύ κοντά μεταξύ τους.

2. Ανάλυση των φασμάτων και υπολογισμός ορίων ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης

Στα φάσματα που λήφθηκαν αρχικά αναγνωρίστηκαν οι κορυφές ενδιαφέροντος, δηλαδή οι κορυφές που αντιστοιχούν στις ακτίνες γάμμα των προϊόντων ενεργοποίησης. Σε αυτό το σημείο τα φάσματα συγκρίθηκαν και με τα

φάσματα του υποβάθρου ώστε να ελεγχθεί αν οι κορυφές ενδιαφέροντος δεν αλληλοεπικαλύπτονται με άλλες κορυφές που υπήρχαν στο υπόβαθρο. Παρακάτω στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται σαν παράδειγμα το φάσμα από την μέτρηση του γεωλογικού δείγματος, *IAEA Soil 7*, όπως λήφθηκε από τον ανιχνευτή ανιχνευτικής απόδοσης 40% μαζί με το φάσμα του υποβάθρου που λήφθηκε από τον ίδιο ανιχνευτή.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5 η πλειοψηφία των κορυφών εμφανίζεται και στα δύο φάσματα, άρα είναι κορυφές του υποβάθρου το οποίο γίνεται αντιληπτό και από τις ενέργειες στις οποίες εμφανίζονται οι ακτίνες γάμμα. Παρακάτω φαίνεται και η μοναδική κορυφή ενδιαφέροντος που εμφανίζεται στο φάσμα του γεωλογικού δείγματος που αντιστοιχεί στο ισότοπο ^{24}Na .



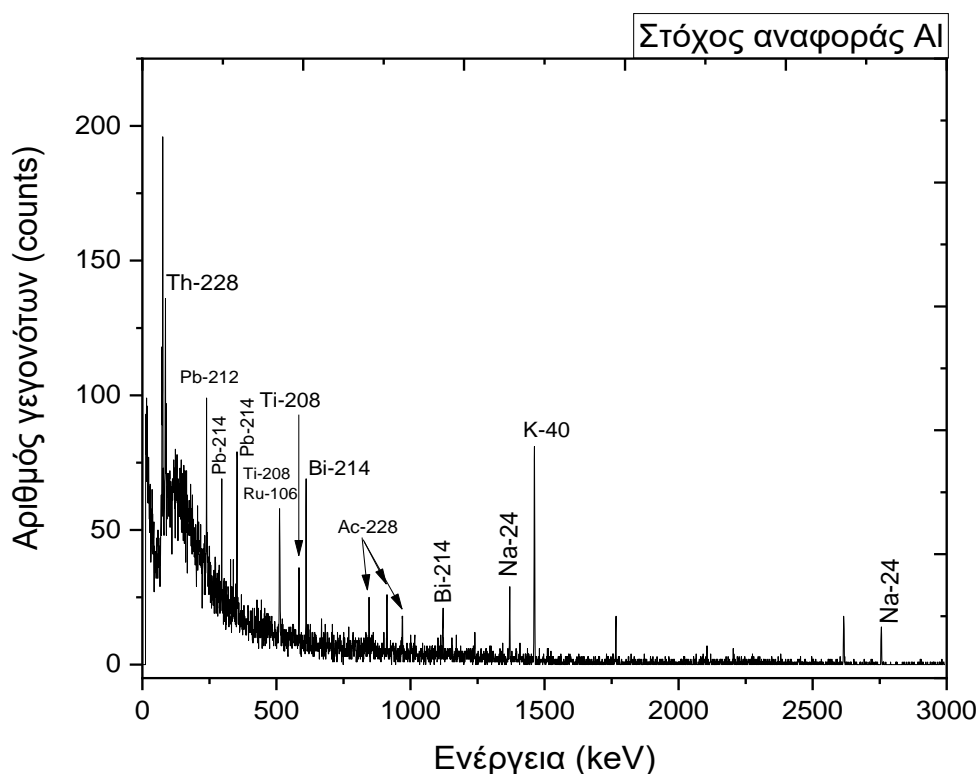
Σχήμα 5: Φάσματα υποβάθρου ανιχνευτή απόδοσης 40% και του γεωλογικού δείγματος, *IAEA Soil 7*, όπως λήφθηκε από τον ίδιο ανιχνευτή

Αρχικά, λοιπόν, αναγνωρίστηκαν οι κορυφές ενδιαφέροντος στα φάσματα που λήφθηκαν μετά την ακτινοβόληση. Η ανάλυση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Tv. Για κάθε κορυφή ενδιαφέροντος μια συγκεκριμένη ενέργεια αφαιρείται η ακτινοβολία του υποβάθρου. Στη συνέχεια γίνεται ολοκλήρωση της κορυφής ώστε να ληφθεί ο αριθμός των κρούσεων που καταγράφηκε κατά την μέτρηση του εκάστοτε δείγματος. Πρακτικά, το πρόγραμμα υπολογίζει το εμβαδόν κάτω από την κορυφή και αφαιρεί από αυτό το υπόβαθρο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πειραματικά φάσματα του στόχου *Al*, του βιολογικού δείγματος *IAEA A – 13* και του γεωλογικού δείγματος *IAEA Soil 7* καθώς και η ανάλυση των φωτοκορυφών ενδιαφέροντος όπως προέκυψε με την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω.

Στόχος *Al*

Ο χρόνος λήψης του φάσματος (real time) ήταν *4059 sec* ενώ ο πραγματικός χρόνος λήψης των φασμάτων (live time), χωρίς το νεκρό χρόνο που προστίθεται λόγω των ηλεκτρονικών ήταν *4057 sec*.



Σχήμα 6: Πειραματικό φάσμα *Al*

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6 παρατηρούνται δύο κορυφές του ^{24}Na στα 1368.63 keV και στα 2754.058 keV που υποδεικνύει την ενεργοποίηση του στόχου *Al*, μάζας 0.256 g . Η αντίδραση μέσω της οποίας παράχθηκε το συγκεκριμένο ισότοπο είναι η $\text{Al} - 27(n, \alpha)\text{Na} - 24$. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται το ισότοπο το οποίο παράγεται κατά την ενεργοποίηση με νετρόνια και η ενέργεια της ακτίνας γάμμα που παρατηρήθηκε και μελετήθηκε μέσω του φάσματος. Με την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω ολοκληρώθηκαν οι κορυφές, από τις οποίες αφαιρέθηκε η ακτινοβολία υποβάθρου και έτσι λήφθηκε ο συνολικός αριθμός των γεγονότων. Το σφάλμα του αριθμού των γεγονότων υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$\delta N_{\gamma} = \sqrt{N_{\gamma}} \quad (1)$$

Επιπλέον, καταγράφεται και ο αριθμός των γεγονότων του υποβάθρου και το αντίστοιχο σφάλμα ώστε να υπολογιστεί το ελάχιστο όριο ανίχνευσης του συγκεκριμένου ισότοπου βάσει της φωτοκορυφής που αναλύθηκε. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό των ελαχίστων ορίων ανίχνευσης μιας φωτοκορυφής που κείται πάνω σε υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε η σχέση (3.7)

Το ελάχιστο όριο ανίχνευσης που υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση αφορά στο συγκεκριμένο στοιχείο στο συγκεκριμένο δείγμα, αφού το ελάχιστο όριο ανίχνευσης για ένα στοιχείο διαφέρει από δείγμα σε δείγμα λόγω της αλλαγής στη σύστασή τους. Αντίστοιχα, υπολογίζεται το όριο ποσοτικοποίησης για κάθε κορυφή του ^{24}Na μέσω της σχέσης (3.8).

Ισότοπο	^{24}Na	
	Ενέργεια (keV)	1368.6
Αριθμός γεγονότων N_{γ} (counts)	9.8E+01	5.3E+01
Σφάλμα αριθμού γεγονότων N_{γ} (counts)	0.1E+01	0.7E+01
Αριθμός γεγονότων υποβάθρου B	1.3E+01	0.09E+01
Τυπική απόκλιση του υποβάθρου σ_B (counts)	0.4E+01	0.10E+01
Ελάχιστο Όριο ανίχνευσης D_L (counts)	1.32E+01	3.17E+00
Όριο ποσοτικοποίησης D_q (counts)	4.00E+01	9.60E+00

Πίνακας 4: Πειραματικά αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την ανάλυση του φάσματος του Al

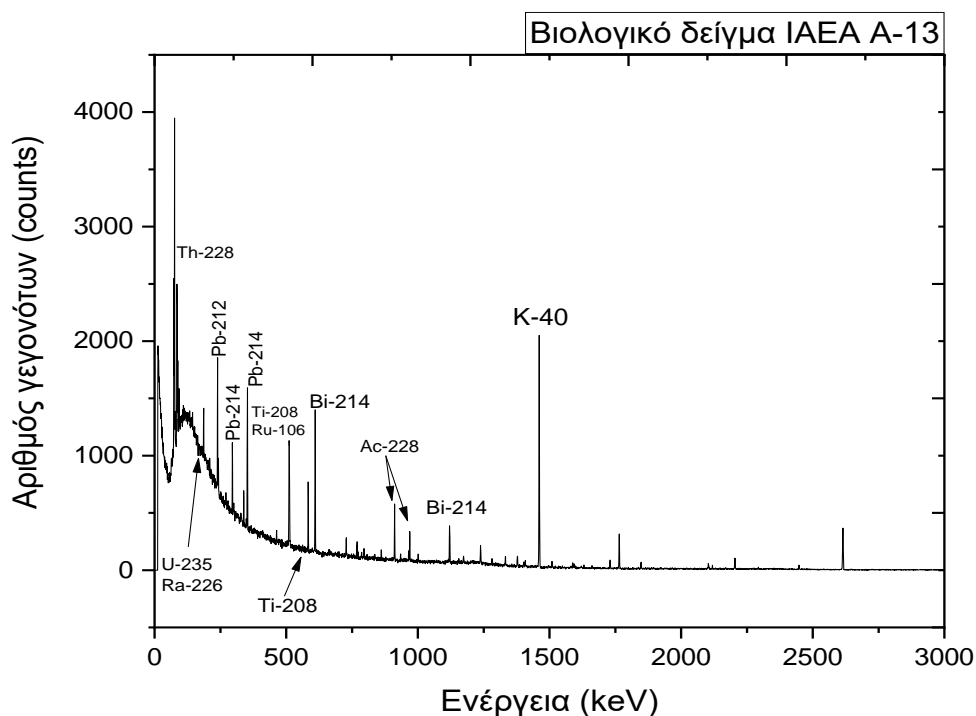
Παρατηρείται ότι ο αριθμός των γεγονότων που καταγράφηκαν και για τις δύο κορυφές του ^{24}Na είναι μεγαλύτερος από το ελάχιστο όριο ανίχνευσης σε κάθε μία από τις δύο ενέργειες άρα μπορεί να ανιχνευτεί το Al στο στόχο αναφοράς. Επίσης ο αριθμός των κρούσεων ξεπερνάει και το όριο ποσοτικοποίησης, συνεπώς θα μπορούσε να υπολογιστεί η ποσότητα του Al στο στόχο αναφοράς.

Βιολογικό δείγμα IAEA A – 13

Ο χρόνος λήψης του φάσματος (real time) ήταν 82807 sec ενώ ο πραγματικός χρόνος λήψης των φασμάτων (live time), χωρίς το νεκρό χρόνο που προστίθεται λόγω των ηλεκτρονικών ήταν 82774 sec. Ωστόσο, λόγω ενός τεχνικού προβλήματος η μέτρηση διακόπηκε και δεν συλλέχθηκε φάσμα.

Σύμφωνα με την προσομοίωση όπως προέκυψε από τον κώδικα NAAPRO αν δεν είχε καθυστερήσει η μέτρηση του δείγματος και είχε ξεκινήσει άμεσα μετά το τέλος της ακτινοβολήσης θα αναμενόταν ίσως να διακριθούν κορυφές που θα

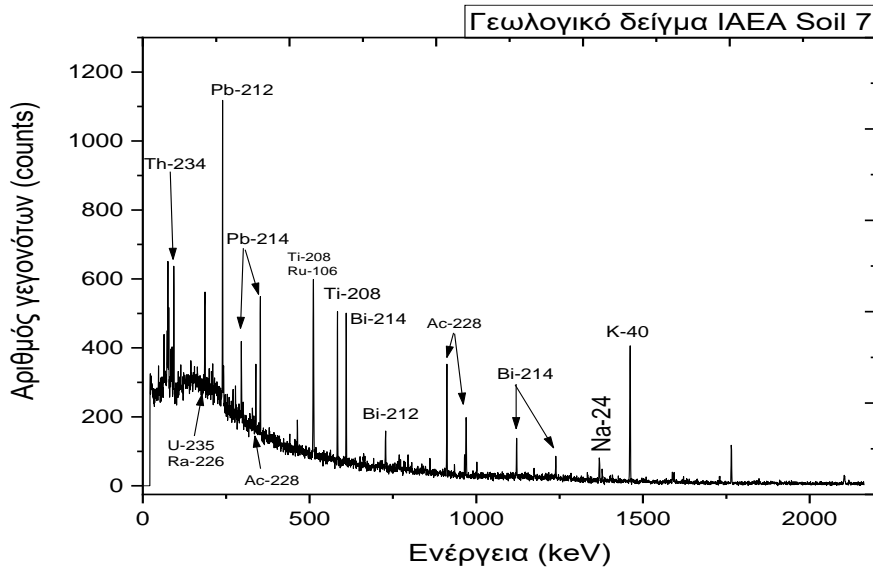
αντιστοιχούσαν είτε στο ^{24}Na ή στο ^{56}Mn . Δεδομένου ότι οι χρόνοι ημιζωής των ισοτόπων, 14.959 h και 2.5789 h , αντίστοιχα, είναι μικρότεροι από τον χρόνο αναμονής από το τέλος της ακτινοβόλησης μέχρι την αρχή της μέτρησης (21.05 h) είναι αναμενόμενο να μη καταγράφεται κάποια ακτίνα γάμμα των δύο αυτών ισοτόπων το οποίο γίνεται εμφανές και στο φάσμα του δείγματος στο Σχήμα 7 όπου δεν διακρίνεται κάποιο άλλο ισότοπο εκτός από τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα.



Σχήμα 7: Πειραματικό φάσμα βιολογικού δείγματος IAEA A-13

Γεωλογικό δείγμα IAEA Soil 7

Ο χρόνος λήψης του φάσματος (real time) ήταν 86411 sec ενώ ο πραγματικός χρόνος λήψης των φασμάτων (live time), χωρίς το νεκρό χρόνο που προστίθεται λόγω των ηλεκτρονικών ήταν 86400 sec .



Σχήμα 8: Πειραματικό φάσμα γεωλογικού δείγματος IAEA Soil 7

Η κορυφή του ^{24}Na στα 1368.63 keV είναι η μοναδική κορυφή που υποδεικνύει την ενεργοποίηση του δείγματος. Ισότοπα των στοιχείων του Al και του Mg αντιδρούν με τα νετρόνια και παράγεται το συγκεκριμένο ισότοπο. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση της συγκεκριμένης κορυφής που μελετάται. Όπως και στον στόχο του Al χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (3.7), (3.8) για τον υπολογισμό του ελαχίστου ορίου ανίχνευσης και του ορίου ποσοτικοποίησης, αντίστοιχα, σε μονάδες counts.

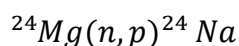
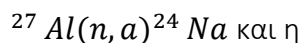
Τα ελάχιστα όρια ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης είναι δυνατό να μετατραπούν σε μονάδες συγκέντρωσης μέσω της σχέσης

$$MDL_{\sigma} = \frac{MDL_{counts} \cdot C}{N_s} \quad (2)$$

όπου MDL_{σ} είναι το ελάχιστο όριο ανίχνευσης του στοιχείου σε μονάδες συγκέντρωσης, MDL_{counts} είναι το ελάχιστο όριο ανίχνευσης του στοιχείου σε μονάδες counts, C η τιμή της συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα και N_s ο αριθμός των γεγονότων στη φωτοκορυφή που δίνει η συγκεκριμένη συγκέντρωση στοιχείου στο δείγμα.

Το πρόβλημα που προκύπτει στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι το μοναδικό ισότοπο που ανιχνεύτηκε κατά την πειραματική διαδικασία, ^{24}Na , παράγεται από δύο διαφορετικά ισότοπα δύο διαφορετικών στοιχείων, του Al και του Mg το οποίο καθιστά αδύνατη τη μελέτη της συγκεκριμένη φωτοκορυφής αφού δεν είναι γνωστό σε τι ποσοστό συνεισφέρει η κάθε αντίδραση στην παραγωγή του

ισοτόπου προς μελέτη. Πιο συγκεκριμένα, οι αντιδράσεις που αποδίδουν το ^{24}Na είναι οι:



Στην συγκεκριμένη περίπτωση, λοιπόν, αφού δεν είναι γνωστό το ποσοστό συνεισφοράς της κάθε αντίδρασης είναι αδύνατο να μετατραπούν τα ελάχιστα όρια ανίχνευσης ή ποσοτικοποίησης από μονάδες counts σε μονάδες συγκέντρωσης.

Ακολουθούν στον Πίνακα 5 τα πειραματικά αποτελέσματα για το γεωλογικό δείγμα *IAEA Soil 7*. Παρατηρείται ότι ο αριθμός των γεγονότων είναι μεγαλύτερος από το ελάχιστο όριο ανίχνευσης, συνεπώς μπορεί να καταδειχθεί η παρουσία του ισοτόπου ^{24}Na με βεβαιότητα. Παρόμοια, ο αριθμός των γεγονότων είναι μεγαλύτερος από το όριο ποσοτικοποίησης οπότε θα ήταν δυνατός και ο προσδιορισμός του ισοτόπου ^{24}Na .

Ισότοπο	^{24}Na
Ενέργεια (keV)	1368.6
Αριθμός γεγονότων N_g (counts)	2.6E+02
Σφάλμα αριθμού γεγονότων N_g (counts)	0.2E+02
Αριθμός γεγονότων υποβάθρου B	1.3E+01
Τυπική απόκλιση του υποβάθρου σ_B (counts)	0.4E+01
Ελάχιστο Όριο ανίχνευσης D_L (counts)	1.2E+01
Όριο ποσοτικοποίησης D_q (counts)	3.7E+01

Πίνακας 5: Πειραματικά αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την ανάλυση του φάσματος του γεωλογικού δείγματος *IAEA Soil 7*

Τα όρια ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης αποτελούν ένα κατώφλι πάνω από το οποίο ένα στοιχείο μπορεί να ανιχνευτεί ή να ποσοτικοποιηθεί αντίστοιχα οπότε δεν θα είχε φυσική σημασία η εύρεση ενός σφάλματος των τιμών που υπολογίστηκαν.

Να σημειωθεί ότι το βιολογικό και το γεωλογικό δείγμα ακτινοβολήθηκαν μαζί με τα φιαλίδια στα οποία περιέχονταν και τα γεγονότα που καταγράφονται στο φάσμα αντιπροσωπεύουν το συνολικό αριθμό κρούσεων που προέρχεται από το υλικό και το φιαλίδιο μαζί καθώς και ότι κατά την προσομοίωση των ακτινοβολήσεων

και των μετρήσεων των δύο δειγμάτων δεν λήφθηκε υπόψη η παρουσία των φιαλιδίων, διότι δεν καθίσταται δυνατό από τον κώδικα.

Παράρτημα II

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τον κώδικα NAAPRO για τους πέντε διαφορετικούς κύκλους ακτινοβολήσης που υλοποιήθηκαν.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα στοιχεία των πέντε διαφορετικών κύκλων

	1ος κύκλος	2ος κύκλος	3ος κύκλος	4ος κύκλος	5ος κύκλος
Χρονος ακτινοβολήσης	60 sec	300 sec	0.5 h	3 h	24 h
Χρόνος αναμονής	60 sec	300 sec	0.5 h	3 h	24 h
Χρόνος μέτρησης	60 sec	300 sec	0.5 h	3 h	24 h

Αρχικά δίνονται οι παρεμβολές που παρατηρούνται για ορισμένα ισότοπα, δηλαδή ισότοπα που παράγονται από ανταγωνιστικές αντιδράσεις ισοτόπων διαφορετικών στοιχείων.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για το δείγμα του αίματος βοοειδών, IAEA-A-13 και ακολουθεί το γεωλογικό δείγμα, IAEA-Soil-7.

Ισότοπο	Χημικά στοιχεία				
	1 ^{ος} κύκλος	2 ^{ος} κύκλος	3 ^{ος} κύκλος	4 ^{ος} κύκλος	5 ^{ος} κύκλος
Al-28	Al, Si, P				
Ar-41	Ca, K	Ca, K			
As-76		As, Br, Se			
As-77			Br, Se	Br, Se	Br, Se
As-78	Br, Se	Br, Se	Br, Se		
As-79		Br, Se			
Ba-139	Ba, Ce, La	Ba, Ce, La	Ba, Ce, La		
Br-82	Br, Rb	Br, Rb	Br, Rb	Br, Rb	Br, Rb
Br-83	Rb, Se	Rb, Se	Rb, Se		
Ca-47	Ca, Ti	Ca, Ti	Ca, Ti	Ca, Ti	Ca, Ti
Ce-139	Ce, Nd	Ce, Nd	Ce, Nd	Ce, Nd	Ce, Nd
Ce-141	Ce, Nd	Ce, Nd	Ce, Nd	Ce, Nd	Ce, Nd
Ce-143	Ce, Nd	Ce, Nd	Ce, Nd	Ce, Nd	Ce, Nd
Co-58	Co, Ni	Co, Ni	Co, Ni	Co, Ni	Co, Ni
Co-60	Cu, Ni	Cu, Ni	Cu, Ni	Cu, Ni	Cu, Ni
Co-60m1	Co, Ni	Co, Ni			
Co-61	Cu, Ni	Cu, Ni	Cu, Ni		
Cr-51	Cr, Fe	Cr, Fe	Cr, Fe	Cr, Fe	Cr, Fe
Cr-55	Fe, Mn				
Cs-132	Ba, Cs	Ba, Cs	Ba, Cs	Ba, Cs	Ba, Cs
Cs-136	Ba, La	Ba, La	Ba, La	Ba, La	Ba, La
Cu-62	Cu, Zn	Cu, Zn			
Cu-64	Cu, Zn	Cu, Zn	Cu, Zn		
Cu-66	Cu, Ga, Zn				
Cu-67	Ga, Zn	Ga, Zn	Ga, Zn	Ga, Zn	Ga, Zn
Fe-55			Fe, Ni	Fe, Ni	Fe, Ni
Fe-59	Co, Fe, Ni	Co, Fe, Ni	Co, Fe, Ni	Co, Fe, Ni	Co, Fe, Ni
Ga-72		Ga, As	Ga, As	Ga, As	
Gd-159		Dy, Tb	Dy, Tb	Dy, Tb	
Ge-75	As, Se	As, Se	As, Se		
Hf-181			Hf, Ta	Hf, Ta	Hf, Ta
Hg-203		Hg, Pb	Hg, Pb	Hg, Pb	Hg, Pb
Hg-205	Hg, Pb				
In-117	Sb, Cd	Sb, Cd	Sb, Cd		
K-38	Ca, K	Ca, K			
K-42	Ca, K, Sc	Ca, K, Sc	Ca, K, Sc	Ca, K, Sc	
Kr-83m1	Sr, Se	Sr, Se	Rb, Sr		
Kr-85			Rb, Sr	Rb, Sr	Rb, Sr
Kr-87	Rb, Sr	Rb, Sr			

La-140	Ce, La	Ce, La			Ce, La
Lu-174					Hf, Lu
Lu-177			Hf, Ta, Zr	Hf, Ta, Zr	Hf, Lu, Ta, Tb
Lu-178	Hf, Ta	Hf, Ta			
Mg-27	Al, Mg, Si	Al, Mg, Si			
Mn-54		Fe, Mn	Fe, Mn	Fe, Mn	Fe, Mn
Mn-56	Co, Fe, Mn	Co, Fe, Mn	Co, Fe, Mn		
Na-24	Al, Mg	Al, Mg	Al, Mg	Al, Mg	Al, Mg
Nb-92m1	Mo, Nb	Mo, Nb	Mo, Nb	Mo, Nb	Mo, Nb
Nb-94m1	Nb, Mo				
Nb-95	Mo, Zr	Mo, Zr	Mo, Zr	Mo, Zr	Mo, Zr
Nb-97	Mo, Zr	Mo, Zr	Mo, Zr		
Nd-141	Nd, Sm	Nd, Sm	Nd, Sm		
Nd-147		Nd, Sm	Nd, Sm	Nd, Sm	Nd, Sm
Nd-149	Nd, Sm	Nd, Sm	Nd, Sm		
Nd-151	Nd, Sm	Nd, Sm			
Ni-65	Cu, Zn, Ni	Cu, Zn, Ni	Cu, Zn, Ni		
P-30	P, Si				
Pm-147					Eu, Nd, Sm
Pm-148		Eu, Sm	Eu, Sm	Eu, Sm	Eu, Sm
Pm-149		Eu, Nd, Sm	Eu, Nd, Sm	Eu, Nd, Sm	Eu, Nd, Sm
Pm-150		Eu, Sm	Eu, Sm		
Pm-151		Nd, Sm	Nd, Sm	Nd, Sm	Nd, Sm
Rb-84		Rb, Sr	Rb, Sr	Rb, Sr	Rb, Sr
Rb-86		Rb, Sr, Y	Rb, Sr, Y	Rb, Sr, Y	Rb, Sr, Y
Rb-88	Rb, Sr	Rb, Sr			
Sc-44	Sc, Ti	Sc, Ti	Sc, Ti	Sc, Ti	
Sc-46	Sc, Ti	Sc, Ti	Sc, Ti	Sc, Ti	Sc, Ti
Sc-47	Ca, V, Ti	Ca, Ti	Ca, Ti	Ca, Ti	Ca, Ti
Sc-48	Ti, V	Ti, V	Ti, V	Ti, V	Ti, V
Sc-49	Ca, Ti	Ca, Ti	Ca, Ti		
Se-81	Br, Se	Br, Se			
Si-31	P, Si	P, Si			
Sm-151					Eu, Sm
Sm-153	Eu, Sm	Eu, Sm	Eu, Sm	Eu, Sm	Eu, Sm
Sr-89				Sr, Y, Zr	Sr, Y, Zr
Tb-160				Dy, Tb	Dy, Tb
Tm-172			Lu, Yb	Lu, Yb	Lu, Yb
V-52	Cr, Mn, V				
Xe-133	Ba, Cs	Ba, Cs	Ba, Cs	Ba, Cs	Ba, Cs
Y-90					Nb, Y, Zr

Y-91	Zr, Nb	Zr, Nb	Zr, Nb	Zr, Nb	Zr, Nb
Y-92	Nb, Zr	Nb, Zr	Nb, Zr	Nb, Zr	
Yb-175	Lu, Yb	Lu, Yb	Lu, Yb	Lu, Yb	Lu, Yb
Yb-177		Hf, Yb	Hf, Yb		
Zn-69		Ga, Zn	Ga, Zn		
Zn-71	Ga, Zn				
Zr-89	Zr, Mo	Zr, Mo	Zr, Mo	Zr, Mo	Zr, Mo
Zr-95		Zr, Mo	Zr, Mo	Zr, Mo	Zr, Mo
Zr-97		Zr, Mo	Zr, Mo	Zr, Mo	

Πίνακας 1: Παρεμβολές ισοτόπων για το γεωλογικό δείγμα IAEA Soil 7

Ισότοπο	Χημικά στοιχεία				
	1 ^{ος} κύκλος	2 ^{ος} κύκλος	3 ^{ος} κύκλος	4 ^{ος} κύκλος	5 ^{ος} κύκλος
Ar-41	Ca, K	Ca, K			
As-76	Br, Se	Br, Se	Br, Se	Br, Se	Br, Se
As-77			Br, Se	Br, Se	Br, Se
As-78	Br, Se	Br, Se			
Br-82			Br, Rb	Br, Rb	Br, Rb
Co-60	Cu, Ni	Cu, Ni	Cu, Ni	Cu, Ni	Cu, Ni
Co-61	Cu, Ni	Cu, Ni			
Co-62	Cu, Ni				
Cu-64	Cu, Zn	Cu, Zn	Cu, Zn	Cu, Zn	
Cu-66	Cu, Zn	Cu, Zn			
Fe-59			Fe, Ni	Fe, Ni	Fe, Ni
K-38	Ca, K	Ca, K			
K-42	Ca, K	Ca, K	Ca, K	Ca, K	
Ni-65	Cu, Zn	Cu, Zn			
P-30	P, S				
Se-81	Br, Se	Br, Se			
Si-31	P, S	P, S			

Πίνακας 2: Παρεμβολές ισοτόπων για το βιολογικό δείγμα IAEA A-13

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (min)	Ενέργεια (keV)	ly (counts)	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)	Χημικό Στοιχείο	Αλυσίδα αντίδρασης
Al-28	2.2414	1778.85	5.66E+06	3.09E+01	P	P-31(n,a)Al-28
Br-78	6.46	613.68	1.50E+04	1.86E+02	Br	Br-79(n,2n)Br-78(88.26%)+Br-79(n,p)Se-79(B-)Br-79(n,2n)Br-78(11.74%)
Br-80	17.68	616.3	3.12E+03	8.98E+02	Br	Br-81(n,2n)Br-80(99.86%)+Br-79(n,g)Br-80(0.08%)+Br-79(n,p)Se-79(B-)Br-79(n,g)Br-80m1(IT)Br-80(0.03%)+Br-79(n,p)Se-79(B-)Br-79(n,g)Br-80(0.03%)
Cl-38	37.24	2167.41*	7.80E+04	8.45E+03	K	K-41(n,a)Cl-38(74.67%)+K-41(n,a)Cl-38m1(IT)Cl-38(25.33%)
Mn-56	154.73	846.754	1.83E+05	2.19E+03	Fe	Fe-56(n,p)Mn-56(99.78%)+Fe-57(n,np)Mn-56(0.19%)+Fe-57(n,d)Mn-56(0.02%)
		1810.72	5.05E+04	9.20E+03		
		2113.05	2.66E+04	2.12E+04		
Mn-57	1.4233	122.063	1.29E+04	7.98E+03	Fe	Fe-57(n,p)Mn-57(99.90%)+Fe-58(n,np)Mn-57(0.05%)+Fe-58(n,d)Mn-57(0.05%)
Na-24	897.54	1368.63	6.24E+09	1.63E-04	Mg	Mg-24(n,p)Na-24m1(IT)Na-24(B-)Mg-24(n,p)Na-24m1(IT)Na-24(100.00%)+...
		2754.03	6.24E+09	1.95E-05		

*K-38(86.48%)+Cl-38(13.52%)

Ισότοπο	Όριο μέτρησης (ppm)	Όριο ποσοτικοποίησης (ppm)
Al-28	2.63E+01	2.67E+01
Br-78	1.58E+02	1.60E+02
Br-80	7.64E+02	7.75E+02
Cl-38	7.18E+03	7.28E+03
Mn-56	1.86E+03	1.89E+03
	7.82E+03	7.93E+03
	1.81E+04	1.83E+04
Mn-57	6.79E+03	6.88E+03
Na-24	1.40E-04	1.42E-04
	1.83E-05	1.85E-05

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (min)	Ενέργεια (keV)	Iγ (counts)	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)	Χημικό Στοιχείο	Αλυσίδα αντίδρασης
Br-78	6.46	613.68	1.49E+05	4.19E+01	Br	Br-79(n,2n)Br-78(96.84%)+Br-79(n,p)Se-79(B-)Br-79(n,2n)Br-78(3.16%)
Br-80	17.68	616.3	5.72E+04	1.09E+02	Br	Br-81(n,2n)Br-80(99.90%)+Br-79(n,g)Br-80(0.08%)+...
		665.8	9.25E+03	6.36E+02		
Cl-38	37.24	1642.71	1.71E+05	4.94E+03	K	K-41(n,a)Cl-38(74.67%)+K-41(n,a)Cl-38m1(IT)Cl-38(25.33%)
		2167.41	1.06E+06	1.39E+03		
K-44	22.13	1157	1.62E+04	1.08E+04	Ca	Ca-44(n,p)K-44
Mn-56	154.73	846.754	4.43E+06	2.02E+02	Fe	Fe-56(n,p)Mn-56(99.78%)+Fe-57(n,np)Mn-56(0.19%)+Fe-57(n,d)Mn-56(0.02%)
		1810.72	1.22E+06	8.50E+02		
		2113.05	6.42E+05	1.96E+03		
		2657.45	2.92E+04	2.71E+04		
		2959.77	1.37E+04	8.50E+01		
		3369.6	7.52E+03	1.74E+02		
Na-24	897.54	1368.63	3.11E+10	3.64E-05	Mg	Mg-24(n,p)Na-24m1(IT)Na-24(B-)Mg-24(n,p)Na-24m1(IT)Na-24(100.00%)+...
		2754.03	3.11E+10	1.37E-05		
Zn-63	38.47	669.62	3.30E+03	1.18E+03	Zn	Zn-64(n,2n)Zn-63

*K-38(86.48%)+Cl-38(13.52%)

Ισότοπο	Όριο μέτρησης (ppm)	Όριο ποσοτικοποίησης (ppm)
Br-78	3.56E+01	3.61E+01
Br-80	9.28E+01	9.41E+01
	5.41E+02	5.48E+02
Cl-38	4.20E+03	4.26E+03
	1.18E+03	1.20E+03
K-44	9.21E+03	9.34E+03
Mn-56	1.72E+02	1.74E+02
	7.23E+02	7.33E+02
	1.67E+03	1.69E+03
	2.30E+04	2.34E+04
	1.03E+02	1.04E+02
	2.08E+02	2.10E+02
Na-24	3.11E-05	3.15E-05
	1.19E-05	1.21E-05
Zn-63	1.00E+03	1.02E+03

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (min)	Ενέργεια (keV)	Iγ (counts)	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)	Χημικό Στοιχείο	Αλυσίδα αντίδρασης
Cl-38	37.24	1642.714	2.49E+06	8.20E+02	K	K-41(n,a)Cl-38(74.67%)+K-41(n,a)Cl-38m1(IT)Cl-38(25.33%)
		2167.405	3.87E+06	9.16E+02		
Mn-56	154.73	846.754	1.28E+08	1.69E+01	Fe	Fe-56(n,p)Mn-56(99.78%)+Fe-57(n,np)Mn-56(0.19%)+Fe-57(n,d)Mn-56(0.02%)
		1238.255	1.28E+05	1.73E+04		
		1810.72	3.51E+07	7.12E+01		
		2113.05	1.85E+07	1.65E+02		
		2522.88	1.28E+06	4.23E+03		
		2657.45	8.42E+05	2.27E+03		
		2959.77	3.95E+05	5.95E+00		
		3369.6	2.17E+05	1.16E+01		
Na-24	897.54	1368.633	1.81E+11	1.45E-05	Mg	Mg-24(n,p)Na-24m1(IT)Na-24(B-)Mg-24(n,p)Na-24m1(IT)Na-24(100.00%)+...
		2754.028	1.81E+11	1.33E-05		
Zn-63	38.47	669.62	4.94E+04	1.90E+02	Zn	Zn-64(n,2n)Zn-63
		962.06	3.91E+04	3.54E+02		

*K-38(86.48%)+Cl-38(13.52%)

Ισότοπο	Όριο μέτρησης (ppm)	Όριο ποσοτικοποίησης (ppm)
Cl-38	6.97E+02	7.07E+02
	7.79E+02	7.90E+02
Mn-56	1.44E+01	1.46E+01
	1.47E+04	1.49E+04
	6.06E+01	6.14E+01
	1.40E+02	1.42E+02
	3.60E+03	3.65E+03
	1.93E+03	1.96E+03
	5.84E+00	5.92E+00
	1.15E+01	1.16E+01
Na-24	1.23E-05	1.25E-05
	1.14E-05	1.16E-05
Zn-63	1.62E+02	1.64E+02
	3.01E+02	3.05E+02

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (min)	Ενέργεια (keV)	Ιγ (counts)	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)	Χημικό Στοιχείο	Αλυσίδα αντίδρασης
Ca-47	6531.8	1297.09	2.14E+05	2.20E+03	Ca	Ca-48(n,2n)Ca-47
Cr-51	39892	320.08	1.09E+05	2.12E+04	Fe	Fe-54(n,a)Cr-51
K-43	1338	372.76	1.37E+05	2.15E+03	Ca	Ca-43(n,p)K-43(80.97%)+Ca-44(n,np)K-43(15.28%)+Ca-44(n,d)K-43(3.68%)+Ca-46(n,a)Ar-43(B-)K-43(0.08%)
		617.49	1.25E+05	3.54E+03		
Mn-54	449453	834.848	4.13E+05	1.16E+04	Fe	Fe-54(n,p)Mn-54(99.99%)+Fe-56(n,t)Mn-54(0.01%)
Na-22	1E+06	1274.53	1.65E+06	1.24E+04	Na	Na-23(n,2n)Na-22
Na-24	897.54	1368.633	9.14E+11	1.22E-05	Mg	Mg-24(n,p)Na-24m1(IT)Na-24(B-)Mg-24(n,p)Na-24m1(IT)Na-24(99.98%)+Mg-24(n,p)Na-24(0.01%)+...
		2754.028	9.14E+11	1.39E-05		

Ισότοπο	Όριο μέτρησης (ppm)	Όριο ποσοτικοποίησης (ppm)
Ca-47	1.87E+03	1.90E+03
Cr-51	1.81E+04	1.84E+04
K-43	1.83E+03	1.85E+03
	3.01E+03	3.05E+03
Mn-54	9.85E+03	9.99E+03
Na-22	1.06E+04	1.07E+04
Na-24	1.04E-05	1.06E-05
	1.19E-05	1.20E-05

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (min)	Ενέργεια (keV)	Iγ (counts)	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)	Χημικό Στοιχείο	Αλυσίδα αντίδρασης
Ca-47	6531.84	489.23	9.24E+05	5.11E+02	Ca	Ca-48(n,2n)Ca-47(100.00%)+...
		807.86	9.24E+05	8.31E+02		
		1297.09	1.05E+07	6.25E+01		
Cr-51	39891.6	320.082	6.68E+06	4.83E+02	Fe	Fe-54(n,a)Cr-51
Mn-54	449453	834.848	2.63E+07	2.54E+02	Fe	Fe-54(n,p)Mn-54(99.99%)+Fe-56(n,t)Mn-54(0.01%)
Na-22	1366623	1274.53	1.05E+08	2.72E+02	Na	Na-23(n,2n)Na-22
Rb-84	47188.8	881.604	4.04E+06	1.69E+00	Rb	Rb-85(n,2n)Rb-84
Sc-47	4822.85	159.381	3.91E+06	5.09E+01	Ca	Ca-48(n,2n)Ca-47(B-)Sc-47

Ισότοπο	Όριο μέτρησης (ppm)	Όριο ποσοτικοποίησης (ppm)
Ca-47	4.35E+02	4.41E+02
	7.07E+02	7.17E+02
	5.32E+01	5.39E+01
Cr-51	4.11E+02	4.16E+02
Mn-54	2.16E+02	2.19E+02
Na-22	2.31E+02	2.34E+02
Rb-84	1.44E+00	1.46E+00
Sc-47	4.33E+01	4.39E+01

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (min)	Ενέργεια (keV)	Iγ (counts)	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)	Χημικό Στοιχείο	Αλυσίδα αντίδρασης
Ag-113	322.2	17.7	1.00E+04	3.70E+28	Cd	Cd-116(n,p)Ag-116(B)-Cd-116(n,a)Pd-113(B-)Ag-113m1(IT)Ag-113(100.00%)+...
		96.2	8.84E+03	3.32E+02		
		206.4	4.78E+03	5.37E+02		
		217.2	6.69E+03	5.64E+02		
		258.8	3.91E+05	1.12E+01		
		298.6	2.39E+06	1.64E+00		
		316.3	3.21E+05	1.44E+01		
		333.1	1.41E+05	3.33E+01		
		339.4	1.53E+05	2.69E+01		
		364.4	3.35E+04	1.46E+02		
		374.3	5.98E+03	8.29E+02		
		382.1	3.47E+04	1.45E+02		
		392.4	4.78E+03	1.06E+03		
		584	5.02E+04	1.27E+02		
		611	1.08E+04	6.13E+02		
		624	4.44E+03	1.51E+03		
		672.3	2.15E+05	3.65E+01		
		680.6	1.66E+05	4.76E+01		
		809.9	3.59E+03	2.32E+03		
		878.5	1.24E+04	8.20E+02		
		883.6	6.74E+04	1.52E+02		
		896.1	1.39E+04	7.54E+02		
988.4	1.01E+05	1.19E+02				
1049.9	1.08E+04	1.26E+03				
1126.1	1.46E+04	1.32E+03				
1180.8	8.84E+03	1.59E+03				
1194.6	9.04E+04	1.47E+02				
1479.2	1.63E+04	4.84E+02				
Al-29	6.56	754.74	1.38E+06	8.77E+05	Si	Si-29(n,p)Al-29(98.95%)+Si-30(n,d)Al-29(1.05%)
		1152.6	5.27E+06	4.70E+05		
		1273.4	5.43E+08	2.01E+03		
		2028.1	2.22E+07	8.73E+04		
		2425.9	3.42E+07	9.12E+04		
Br-78	6.46	613.68	8.43E+04	4.72E+02	Br	Br-79(n,2n)Br-78(88.26%)+Br-79(n,p)Se-79(B-)Br-79(n,2n)Br-78(11.74%)
Br-80	17.68				Br	Br-81(n,2n)Br-80(99.85%)+Br-79(n,g)Br-80(0.08%)+Br-79(n,p)Se-79(B-)Br-79(n,g)Br-80m1(IT)Br-80(0.03%)+Br-79(n,p)Se-79(B-)Br-79(n,g)Br-80(0.03%)+...
		616.3	1.75E+04	2.28E+03		
Ca-49	8.718	3084.4	3.98E+04	7.83E+03	Ca	Ca-48(n,g)Ca-49
Cl-38	37.24	1642.7	6.76E+05	1.22E+05	K	K-41(n,a)Cl-38(74.67%)+K-41(n,a)Cl-38m1(IT)Cl-38(25.33%)
K-44	22.13	1157	8.31E+06	2.41E+05	Ca	Ca-44(n,p)K-44
		1499.5	1.12E+06	8.17E+05		
		2150.8	3.25E+06	5.80E+05		

1^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

		3158.1	2.16E+04	1.66E+04		
		3201.3	1.01E+05	2.50E+03		
		3252.1	2.25E+04	1.05E+04		
		3301.2	4.57E+04	3.40E+03		
		3395.5	2.39E+05	4.55E+02		
		3661.4	8.73E+05	1.65E+02		
		3868.6	9.14E+03	7.69E+03		
K-46	1.75	3735	5.56E+03	2.39E+04	Ca	Ca-46(n,p)K-46
Mn-57	1.4233	122.06	2.43E+06	2.03E+04	Fe	Fe-57(n,p)Mn-57(99.90%)+Fe-58(n,np)Mn-57(0.05%)+Fe-58(n,d)Mn-57(0.05%)
		136.48	3.36E+05	1.42E+05		
		352.32	3.65E+05	2.60E+05		
		692	9.61E+05	1.49E+05		
Sc-50	1.7083	523.79	9.35E+05	1.47E+04	Ti	Ti-50(n,p)Sc-50
		1121.1	1.05E+06	4.15E+04		
		1553.8	1.06E+06	1.82E+04		
V-53	1.61	1006	1.25E+05	4.99E+03	Cr	Cr-53(n,p)V-53(99.02%)+Cr-54(n,d)V-53(0.98%)+...
Zr-89m1	4.161	587.8	1.97E+06	4.63E+02	Zr	Zr-90(n,2n)Zr-89m1
		1507.4	1.33E+05	8.59E+03		

*Mn-57(100.00%)+...

Ισότοπο	Όριο μέτρησης (ppm)	Όριο ποσοτικοποίησης (ppm)
Ag-113	1.07E+29	1.09E+29
	2.82E+02	2.86E+02
	4.57E+02	4.63E+02
	4.79E+02	4.86E+02
	9.54E+00	9.68E+00
	1.40E+00	1.42E+00
	1.22E+01	1.24E+01
	2.83E+01	2.87E+01
	2.29E+01	2.32E+01
	1.24E+02	1.26E+02
	7.05E+02	7.15E+02
	1.23E+02	1.25E+02
	9.03E+02	9.16E+02
	1.08E+02	1.10E+02
	5.22E+02	5.29E+02
	1.28E+03	1.30E+03
	3.10E+01	3.15E+01
	4.05E+01	4.11E+01
	1.97E+03	2.00E+03
	6.97E+02	7.07E+02
1.30E+02	1.31E+02	
6.42E+02	6.50E+02	
1.01E+02	1.02E+02	

	1.07E+03	1.09E+03
	1.12E+03	1.14E+03
	1.35E+03	1.37E+03
	1.25E+02	1.27E+02
	4.12E+02	4.17E+02
Al-29	7.48E+05	7.58E+05
	4.00E+05	4.05E+05
	1.71E+03	1.73E+03
	7.42E+04	7.52E+04
	7.75E+04	7.86E+04
Br-78	4.02E+02	4.07E+02
Br-80	1.94E+03	1.97E+03
Ca-49	7.79E+03	7.90E+03
Cl-38	1.04E+05	1.05E+05
K-44	2.05E+05	2.08E+05
	6.94E+05	7.04E+05
	4.93E+05	5.00E+05
	1.85E+04	1.88E+04
	2.46E+03	2.50E+03
	1.36E+04	1.38E+04
	4.39E+03	4.45E+03
	5.53E+02	5.61E+02
	1.71E+02	1.74E+02
	1.23E+04	1.25E+04
K-46	2.70E+04	2.74E+04
Mn-57	1.72E+04	1.75E+04
	1.21E+05	1.22E+05
	2.21E+05	2.24E+05
	1.27E+05	1.29E+05
Sc-50	1.25E+04	1.26E+04
	3.53E+04	3.57E+04
	1.55E+04	1.57E+04
V-53	4.24E+03	4.30E+03
Zr-89m1	3.94E+02	3.99E+02
	7.30E+03	7.40E+03

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (min)	Ενέργεια (keV)	Ιγ (counts)	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)	Χημικό Στοιχείο	Αλυσίδα αντίδρασης
Ag-113	322.2	96.2	4.37E+04	1.50E+02	Cd	Cd-116(n,p)Ag-116(B-)Cd-116(n,a)Pd-113(B-)Ag-113m1(IT)Ag-113(100.00%)
		206.4	2.36E+04	2.43E+02		
		217.2	3.30E+04	2.55E+02		
		258.8	1.93E+06	5.07E+00		
		298.6	1.18E+07	7.43E-01		
		316.3	1.58E+06	6.50E+00		
		333.1	6.97E+05	1.50E+01		
		339.4	7.53E+05	1.22E+01		
		364.4	1.65E+05	6.60E+01		
		374.3	2.95E+04	3.75E+02		
		382.1	1.71E+05	6.53E+01		
		392.4	2.36E+04	4.80E+02		
		584	2.48E+05	5.76E+01		
		611	5.31E+04	2.77E+02		
		624	2.19E+04	6.82E+02		
		672.3	1.06E+06	1.65E+01		
		680.6	8.20E+05	2.15E+01		
		809.9	1.77E+04	1.05E+03		
		878.5	6.14E+04	3.71E+02		
		883.6	3.33E+05	6.88E+01		
896.1	6.84E+04	3.41E+02				
988.4	4.99E+05	5.36E+01				
1049.9	5.31E+04	5.70E+02				
1126.1	7.20E+04	5.97E+02				
1180.8	4.37E+04	7.20E+02				
1194.6	4.46E+05	6.66E+01				
1479.2	8.02E+04	2.18E+02				
Br-78	6.46	613.68	8.33E+05	1.07E+02	Br	Br-79(n,2n)Br-78(96.84%)+Br-79(n,p)Se-79(B-)Br-79(n,2n)Br-78(3.16%)
Br-80	17.68	616.3	3.21E+05	2.78E+02	Br	Br-81(n,2n)Br-80(99.90%)+Br-79(n,g)Br-80(0.08%)+...
		639.4	1.25E+04	7.30E+03		
		665.8	5.18E+04	1.62E+03		
Br-84	31.8	3927.5	3.25E+03	7.31E+01	Rb	Rb-87(n,a)Br-84(97.03%)+Rb-85(n,2p)Br-84(2.97%)
Ca-49	8.718	3084.4	5.34E+05	2.44E+03	Ca	Ca-48(n,g)Ca-49
		4071.9	4.06E+04	2.52E+03		
Cl-38	37.24	1642.7	1.46E+07	1.26E+04	K	K-41(n,a)Cl-38(74.67%)+K-41(n,a)Cl-38m1(IT)Cl-38(25.33%)
		2167.4	9.00E+07	3.54E+03		
Cr-49	42.3	62.289	3.79E+03	1.98E+05	Cr	Cr-50(n,2n)Cr-49
		90.639	1.23E+04	2.63E+04		
		152.93	7.00E+03	4.06E+04		
Cs-138	33.41	1435.9	8.54E+04	2.43E+04	Ba	Ba-138(n,p)Cs-138
Eu-152m2	96	89.847	4.47E+03	1.22E+03	Eu	Eu-153(n,2n)Eu-152m2(99.80%)+Eu-151(n,g)Eu-152m2(0.20%)
Fe-53	8.51	377.9	1.80E+06	1.22E+05	Fe	Fe-54(n,2n)Fe-53
Ga-68	67.71	1077.3	8.19E+04	3.07E+03	Ga	Ga-69(n,2n)Ga-68

2^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

Ga-70	21.14	176.17	1.42E+04	2.96E+03	Ga	Ga-71(n,2n)Ga-70(99.87%)+Ga-69(n,g)Ga-70(0.13%)
K-43	1338	372.76	1.27E+06	1.09E+06	Ca	Ca-43(n,p)K-43(80.99%)+Ca-44(n,np)K-43(15.28%)+Ca-44(n,d)K-43(3.68%)+Ca-46(n,a)Ar-43(B-)K-43(0.05%)
K-44	22.13	368.21	6.29E+06	2.18E+05	Ca	Ca-44(n,p)K-44
		726.49	1.05E+07	2.24E+05		
		747.63	5.84E+06	4.14E+05		
		876.53	4.83E+06	5.88E+05		
		1019.6	2.35E+06	1.51E+06		
		1024.7	1.86E+07	1.92E+05		
		1126.1	2.12E+07	2.54E+05		
		1157	1.62E+08	2.76E+04		
		1244.8	2.32E+06	1.15E+06		
		1499.5	2.19E+07	9.31E+04		
		1752.6	1.14E+07	2.62E+05		
		1778	5.92E+06	5.71E+05		
		2144.2	2.09E+06	2.00E+06		
		2150.8	6.34E+07	6.63E+04		
		2519	2.71E+07	2.69E+05		
		2656.4	2.74E+06	8.91E+05		
		2982.5	3.57E+05	3.22E+03		
		3103.2	1.78E+05	8.79E+03		
		3158.1	4.21E+05	3.03E+03		
		3201.3	1.96E+06	5.26E+02		
3252.1	4.38E+05	1.72E+03				
3301.2	8.91E+05	5.16E+02				
3395.5	4.65E+06	6.21E+01				
3661.4	1.70E+07	2.52E+01				
3868.6	1.78E+05	8.34E+02				
Xe-135	548.4	526.56	7.54E+04	2.41E+04	Ba	Ba-138(n,a)Xe-135(77.97%)+Ba-138(n,a)Xe-135m1(IT)Xe-135(21.99%)+Ba-137(n,He3)Xe-135(0.03%)+Ba-136(n,2p)Xe-135(0.01%)
Xe-135m1	15.29	526.56	7.54E+04	2.41E+04	Ba	Ba-138(n,a)Xe-135m1
Zn-63	38.47	669.62	4.65E+05	3.00E+03	Zn	Zn-64(n,2n)Zn-63
		962.06	3.67E+05	5.59E+03		
		1412.1	4.23E+04	3.15E+04		

*K-38(78.97%)+Cl-38(21.03%)

Ισότοπο	Όριο μέτρησης (ppm)	Όριο ποσοτικοποίησης (ppm)
Ag-113	1.28E+02	1.29E+02
	2.07E+02	2.09E+02
	2.17E+02	2.20E+02
	4.31E+00	4.37E+00
	6.32E-01	6.41E-01
	5.53E+00	5.60E+00
	1.28E+01	1.30E+01
	1.03E+01	1.05E+01
	5.61E+01	5.69E+01
	3.19E+02	3.23E+02
	5.55E+01	5.63E+01
	4.08E+02	4.14E+02
	4.90E+01	4.96E+01
	2.36E+02	2.39E+02
	5.80E+02	5.88E+02
	1.40E+01	1.42E+01
	1.83E+01	1.86E+01
	8.91E+02	9.04E+02
	3.15E+02	3.19E+02
	5.85E+01	5.93E+01
	2.90E+02	2.94E+02
	4.55E+01	4.62E+01
	4.85E+02	4.91E+02
5.08E+02	5.15E+02	
6.12E+02	6.20E+02	
5.66E+01	5.74E+01	
1.85E+02	1.88E+02	
Br-78	9.07E+01	9.19E+01
Br-80	2.36E+02	2.40E+02
	6.21E+03	6.30E+03
	1.38E+03	1.40E+03
Br-84	6.41E+01	6.50E+01
Ca-49	2.16E+03	2.19E+03
	4.08E+03	4.14E+03
Cl-38	1.07E+04	1.09E+04
	3.01E+03	3.05E+03
Cr-49	1.68E+05	1.71E+05
	2.24E+04	2.27E+04
	3.45E+04	3.50E+04
Cs-138	2.06E+04	2.09E+04
Eu-152m2	1.04E+03	1.05E+03
Fe-53	1.04E+05	1.05E+05
Ga-68	2.61E+03	2.65E+03

2^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

Ga-70	2.51E+03	2.55E+03
K-43	9.27E+05	9.40E+05
K-44	1.86E+05	1.88E+05
	1.91E+05	1.93E+05
	3.52E+05	3.57E+05
	5.00E+05	5.07E+05
	1.28E+06	1.30E+06
	1.63E+05	1.66E+05
	2.16E+05	2.19E+05
	2.35E+04	2.38E+04
	9.77E+05	9.91E+05
	7.91E+04	8.02E+04
	2.23E+05	2.26E+05
	4.85E+05	4.92E+05
	1.70E+06	1.72E+06
	5.64E+04	5.72E+04
	2.29E+05	2.32E+05
	7.57E+05	7.68E+05
	2.92E+03	2.96E+03
	8.18E+03	8.30E+03
	2.73E+03	2.77E+03
	4.61E+02	4.67E+02
1.61E+03	1.63E+03	
4.88E+02	4.95E+02	
5.87E+01	5.95E+01	
2.27E+01	2.30E+01	
9.05E+02	9.18E+02	
Xe-135	2.05E+04	2.08E+04
Xe-135m1	2.05E+04	2.08E+04
Zn-63	2.55E+03	2.59E+03
	4.75E+03	4.82E+03
	2.68E+04	2.71E+04

3^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (min)	Ενέργεια (keV)	Iγ (counts)	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)	Χημικό Στοιχείο	Αλυσίδα αντίδρασης
Ag-113	322.2	96.2	2.42E+05	6.54E+01	Cd	Cd-116(n,p)Ag-116(B-)Cd-116(n,a)Pd-113(B-)Ag-113m1(IT)Ag-113(100.00%)+...
		206.4	1.31E+05	1.06E+02		
		217.2	1.83E+05	1.11E+02		
		258.8	1.07E+07	2.21E+00		
		298.6	6.53E+07	3.24E-01		
		316.3	8.77E+06	2.83E+00		
		333.1	3.86E+06	6.55E+00		
		339.4	4.17E+06	5.30E+00		
		364.4	9.14E+05	2.88E+01		
		374.3	1.63E+05	1.63E+02		
		382.1	9.47E+05	2.85E+01		
		392.4	1.31E+05	2.09E+02		
		584	1.37E+06	2.51E+01		
		611	2.94E+05	1.21E+02		
		624	1.21E+05	2.97E+02		
		672.3	5.88E+06	7.19E+00		
		680.6	4.54E+06	9.38E+00		
		809.9	9.80E+04	4.57E+02		
		878.5	3.40E+05	1.62E+02		
		883.6	1.84E+06	3.00E+01		
896.1	3.79E+05	1.49E+02				
988.4	2.76E+06	2.33E+01				
1049.9	2.94E+05	2.48E+02				
1126.1	3.98E+05	2.60E+02				
1180.8	2.42E+05	3.14E+02				
1194.6	2.47E+06	2.90E+01				
1479.2	4.44E+05	9.47E+01				
Ar-41	109.3398	1293.587	1.60E+09	3.09E+03	Ca	Ca-44(n,a)Ar-41(58.71%)+K-41(n,p)Ar-41(41.29%)
As-74	25588.8	595.83	3.97E+05	9.07E+02	As	As-75(n,2n)As-74(100.00%)+...
		634.78	1.03E+05	3.67E+03		
Ba-129	133.8	220.83	7.14E+04	3.50E+04	Ba	Ba-130(n,2n)Ba-129
		554.1	2.47E+04	1.64E+05		
Cl-38	37.24	1642.714	2.12E+08	2.09E+03	K	K-41(n,a)Cl-38(74.67%)+K-41(n,a)Cl-38m1(IT)Cl-38(25.33%)
		2167.405	3.30E+08	2.33E+03		
Co-57	391305.6	122.061	3.46E+04	7.76E+03	Ni	Ni-58(n,np)Co-57(96.96%)+Ni-58(n,d)Co-57(3.04%)
Cr-49	42.3	62.289	6.12E+04	2.95E+04	Cr	Cr-50(n,2n)Cr-49
		90.639	1.99E+05	3.93E+03		
		152.928	1.13E+05	6.05E+03		
Eu-152m1	558.696	841.594	3.30E+04	1.22E+03	Eu	Eu-153(n,2n)Eu-152m1(99.94%)+Eu-151(n,g)Eu-152m1(

3^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

		963.39	2.72E+04	1.76E+03		0.06%)
Eu-152m2	96	89.847	1.12E+05	1.17E+02	Eu	Eu-153(n,2n)Eu-152m2(99.80%)+Eu-151(n,g)Eu-152m2(0.20%)
Ga-68	67.71	578.52	1.85E+04	1.59E+04	Ga	Ga-69(n,2n)Ga-68
		805.83	5.20E+04	7.35E+03		
		1077.34	1.78E+06	3.41E+02		
		1261.08	5.22E+04	7.35E+03		
		1883.16	7.55E+04	6.54E+03		
K-43	1338	220.632	2.46E+06	9.02E+05	Ca	Ca-43(n,p)K-43(80.99%)+Ca-44(n,np)K-43(15.28%)+Ca-44(n,d)K-43(3.68%)+Ca-46(n,a)Ar-43(B-)K-43(0.05%)
		372.76	4.45E+07	7.49E+04		
		396.861	6.08E+06	5.67E+05		
		593.39	5.77E+06	8.45E+05		
		617.49	4.06E+07	1.23E+05		
La-142	91.0998	641.285	5.73E+04	3.35E+04	Ce	Ce-142(n,p)La-142
Nb-91m1	87638.4	104.62	3.36E+00	8.38E+06	Mo	Mo-92(n,d)Nb-91m1
		1204.67	1.17E+01	1.11E+07		
Ni-57	2135.99 5	127.164	5.09E+04	5.19E+03	Ni	Ni-58(n,2n)Ni-57
		1377.63	2.50E+05	2.87E+03		
Pb-203	3112.38 7	279.197	2.32E+05	4.78E+03	Pb	Pb-204(n,2n)Pb-203(59.11%)+Pb-204(n,2n)Pb-203m1(IT)Pb-203(40.89%)
Sb-122	3918.09 6	564.24	1.51E+05	2.91E+02	Sb	Sb-123(n,2n)Sb-122(99.82%)+Sb-121(n,g)Sb-122(0.17%)+Sb-121(n,g)Sb-122m1(IT)Sb-122(0.01%)
Ta-180	489.12	93.4	8.33E+04	1.21E+02	Ta	Ta-181(n,2n)Ta-180
Tc-99m1	360.9	140.511	1.14E+04	2.18E+03	Mo	Mo-100(n,2n)Mo-99(B-)Tc-99m1
Th-231	1531.19 5	81.228	2.88E+04	4.36E+03	Th	Th-232(n,2n)Th-231
		84.214	2.13E+05	5.54E+02		
		89.95	3.04E+04	2.90E+03		
U-237	9720	59.536	3.51E+04	2.64E+03	U	U-238(n,2n)U-237
		208	2.16E+04	1.48E+03		
Xe-135	548.4	249.794	2.42E+05	1.19E+04	Ba	Ba-138(n,a)Xe-135(77.97%)+Ba-138(n,a)Xe-135m1(IT)Xe-135(21.99%)+Ba-137(n,He3)Xe-135(0.03%)+Ba-136(n,2p)Xe-135(0.01%)
		526.561	3.26E+05	1.35E+04		
Y-88	153576	898.042	1.21E+05	7.56E+03	Y	Y-89(n,2n)Y-88(99.98%)+Y-89(n,p)Sr-89(B-)Y-89(n,2n)Y-88(0.02%)
		1836.06 3	1.28E+05	7.86E+03		
Y-90m1	191.4	202.53	3.66E+04	6.06E+03	Y	Y-89(n,g)Y-90m1
		479.51	3.41E+04	1.60E+04		
Zn-63	38.47	449.93	2.01E+05	1.17E+04	Zn	Zn-64(n,2n)Zn-63
		669.62	6.96E+06	4.84E+02		
		962.06	5.50E+06	9.01E+02		
		1412.08	6.34E+05	5.06E+03		

*K-38(14.87%)+Cl-38(85.13%)

Ισότοπο	Όριο μέτρησης (ppm)	Όριο ποσοτικοποίησης (ppm)
Ag-113	5.56E+01	5.64E+01
	9.00E+01	9.12E+01
	9.45E+01	9.58E+01
	1.88E+00	1.91E+00
	2.75E-01	2.79E-01
	2.41E+00	2.44E+00
	5.57E+00	5.65E+00
	4.51E+00	4.57E+00
	2.45E+01	2.48E+01
	1.39E+02	1.41E+02
	2.42E+01	2.45E+01
	1.78E+02	1.80E+02
	2.13E+01	2.16E+01
	1.03E+02	1.04E+02
	2.53E+02	2.56E+02
	6.11E+00	6.19E+00
	7.98E+00	8.09E+00
	3.89E+02	3.94E+02
	1.37E+02	1.39E+02
	2.55E+01	2.59E+01
	1.26E+02	1.28E+02
	1.99E+01	2.01E+01
	2.11E+02	2.14E+02
2.21E+02	2.24E+02	
2.67E+02	2.71E+02	
2.47E+01	2.50E+01	
8.05E+01	8.17E+01	
Ar-41	2.62E+03	2.66E+03
As-74	7.72E+02	7.82E+02
	3.12E+03	3.16E+03
Ba-129	2.97E+04	3.02E+04
	1.40E+05	1.42E+05
Cl-38	1.77E+03	1.80E+03
	1.98E+03	2.01E+03
Co-57	6.60E+03	6.69E+03
Cr-49	2.95E+04	2.95E+04
	3.93E+03	3.93E+03
	6.05E+03	6.05E+03
Eu-152m1	1.03E+03	1.05E+03
	1.49E+03	1.51E+03
Eu-152m2	9.94E+01	1.01E+02

Ga-68	1.35E+04	1.37E+04
	6.25E+03	6.34E+03
	2.90E+02	2.94E+02
	6.25E+03	6.34E+03
	5.56E+03	5.64E+03
K-43	7.67E+05	7.77E+05
	6.37E+04	6.46E+04
	4.82E+05	4.89E+05
	7.18E+05	7.28E+05
	1.05E+05	1.06E+05
La-142	2.85E+04	2.89E+04
Nb-91m1	7.13E+06	7.23E+06
	9.47E+06	9.60E+06
Ni-57	4.41E+03	4.47E+03
	2.44E+03	2.47E+03
Pb-203	4.06E+03	4.12E+03
Sb-122	2.48E+02	2.51E+02
Ta-180	1.03E+02	1.04E+02
Tc-99m1	1.85E+03	1.88E+03
Th-231	3.71E+03	3.76E+03
	4.71E+02	4.78E+02
	2.46E+03	2.50E+03
U-237	2.25E+03	2.28E+03
	1.26E+03	1.28E+03
Xe-135	1.01E+04	1.03E+04
	1.14E+04	1.16E+04
Y-88	6.43E+03	6.52E+03
	6.68E+03	6.77E+03
Y-90m1	5.15E+03	5.22E+03
	1.36E+04	1.38E+04
Zn-63	9.92E+03	1.01E+04
	4.12E+02	4.17E+02
	7.66E+02	7.77E+02
	4.30E+03	4.36E+03

4^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (min)	Ενέργεια (keV)	Iγ (counts)	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)	Χημικό Στοιχείο	Αλυσίδα αντίδρασης
Ag-113	322.2	96.2	8.99E+05	3.95E+01	Cd	Cd-116(n,p)Ag-116(B-)Cd-116(n,a)Pd-113(B-)Ag-113m1(IT)Ag-113(100.00%)+...
		206.4	4.86E+05	6.39E+01		
		217.2	6.80E+05	6.71E+01		
		258.8	3.97E+07	1.34E+00		
		298.6	2.43E+08	1.96E-01		
		316.3	3.26E+07	1.71E+00		
		333.1	1.44E+07	3.96E+00		
		339.4	1.55E+07	3.20E+00		
		364.4	3.40E+06	1.74E+01		
		374.3	6.07E+05	9.87E+01		
		382.1	3.52E+06	1.72E+01		
		392.4	4.86E+05	1.26E+02		
		584	5.10E+06	1.52E+01		
		611	1.09E+06	7.30E+01		
		624	4.51E+05	1.80E+02		
		672.3	2.19E+07	4.34E+00		
		680.6	1.69E+07	5.67E+00		
		809.9	3.65E+05	2.76E+02		
		878.5	1.26E+06	9.75E+01		
		883.6	6.85E+06	1.81E+01		
896.1	1.41E+06	8.98E+01				
988.4	1.03E+07	1.41E+01				
1049.9	1.09E+06	1.50E+02				
1126.1	1.48E+06	1.57E+02				
1180.8	8.99E+05	1.90E+02				
1194.6	9.18E+06	1.75E+01				
1479.2	1.65E+06	5.72E+01				
As-74	25588.8	595.83	1.42E+07	5.71E+01	As	As-75(n,2n)As-74(100.00%)+...
		634.78	3.66E+06	2.31E+02		
As-76	1574.395				As	Br-79(n,p)Se-79(B-)Br-79(n,a)As-76(79.49%)+Br-79(n,a)As-76(12.91%)+As-75(n,g)As-76(6.75%)+Se-76(n,p)As-76(0.82%)+Se-77(n,np)As-76(0.01%)+Se-77(n,d)As-76(0.01%)
		559.1	2.43E+05	3.18E+03		
Ba-131	16560	496.326	1.75E+05	4.86E+04	Ba	Ba-132(n,2n)Ba-131
Cd-115	3207.6	492.351	1.17E+05	5.92E+02	Cd	Cd-116(n,2n)Cd-115(99.74%)+Cd-114(n,g)Cd-115(0.26%)
		527.901	3.99E+05	1.81E+02		
Ce-135	1062	265.56	5.67E+05	3.82E+03	Ce	Ce-136(n,2n)Ce-135
		300.07	3.19E+05	8.07E+03		
		518.05	1.85E+05	1.81E+04		
		572.26	1.41E+05	2.55E+04		
		606.76	2.55E+05	1.46E+04		
Co-57	391305.6	122.061	1.25E+06	4.83E+02	Ni	Ni-58(n,np)Co-57(96.96%)+Ni-58(n,d)Co-57(3.04%)
		136.474	1.56E+05	3.75E+03		

4^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

Cs-129	1923.5 95	371.918	6.75E+05	1.08E+04	Ba	Ba-130(n,2n)Ba-129(EC)Cs-129(88.00%)+Ba-130(n,np)Cs-129(10.25%)+Ba-130(n,d)Cs-129(1.76%)
		411.49	4.92E+05	1.36E+04		
Dy-157	488.4	326.16	1.74E+05	9.72E+02	Dy	Dy-158(n,2n)Dy-157
Eu-150m1	768	333.9	1.89E+05	2.31E+02	Eu	Eu-151(n,2n)Eu-150m1(99.97%)+Eu-151(n,p)Sm-151(B-) Eu-151(n,2n)Eu-150m1(0.03%)
		406.5	1.34E+05	3.11E+02		
Eu-152	709067 9	89.847	5.31E+05	5.56E+01	Eu	Eu-153(n,2n)Eu-152
Eu-152m1	558.69 6	121.777	4.06E+05	5.70E+01	Eu	Eu-153(n,2n)Eu-152m1(99.94%)+Eu-151(n,g)Eu-152m1(0.06%)
		344.31	1.38E+05	3.22E+02		
		841.594	8.23E+05	1.09E+02		
		963.39	6.77E+05	1.58E+02		
Hf-173	1416	123.675	1.82E+05	6.47E+02	Hf	Hf-174(n,2n)Hf-173
I-130	741.6	536.066	1.72E+05	1.76E+03	Cs	Cs-133(n,a)I-130
		739.512	1.43E+05	3.02E+03		
In-115m1	269.16	336.241	4.11E+05	1.39E+02	Cd	Cd-116(n,2n)Cd-115(B-)In-115m1
K-43	1338	220.632	7.59E+07	6.57E+04	Ca	Ca-43(n,p)K-43(80.99%)+Ca-44(n,np)K-43(15.28%)+Ca-44(n,d)K-43(3.68%)+Ca-46(n,a)Ar-43(B-)K-43(0.05%)
		372.76	1.37E+09	5.46E+03		
		396.861	1.87E+08	4.13E+04		
		404.214	5.77E+06	1.35E+06		
		593.39	1.78E+08	6.15E+04		
		617.49	1.25E+09	8.99E+03		
		990.245	4.53E+06	4.03E+06		
		1021.69 8	3.10E+07	6.22E+05		
Mo-99	3956.4	140.511	1.32E+06	4.24E+01	Mo	Mo-100(n,2n)Mo-99(99.67%)+Mo-98(n,g)Mo-99(0.33%)
		181.068	1.79E+05	3.69E+02		
		739.5	3.62E+05	5.51E+02		
		777.921	1.27E+05	1.47E+03		
Na-22	136662 3	1274.53	5.53E+06	3.17E+04	Na	Na-23(n,2n)Na-22
Nb-96	1401	568.871	1.16E+05	1.26E+03	Mo	Mo-96(n,p)Nb-96(96.67%)+Mo-97(n,d)Nb-96(1.76%)+Mo-97(n,np)Nb-96(1.57%)
		778.224	1.92E+05	1.08E+03		
Ni-57	2135.9 95	127.164	1.66E+06	3.57E+02	Ni	Ni-58(n,2n)Ni-57
		1377.63	8.15E+06	1.97E+02		
		1757.55	5.74E+05	4.85E+03		
		1919.52	1.22E+06	2.61E+03		
Pb-203	3112.3 87	279.197	7.80E+06	3.19E+02	Pb	Pb-204(n,2n)Pb-203(59.11%)+Pb-204(n,2n)Pb-203m1(IT)Pb-203(40.89%)
		401.325	3.23E+05	8.87E+03		
Sb-122	3918.0 96	692.65	2.81E+05	4.56E+02	Sb	Sb-123(n,2n)Sb-122(99.82%)+Sb-121(n,g)Sb-122(0.17%)+Sb-121(n,g)Sb-122m1(IT)Sb-122(0.01%)
Sr-91	577.8	652.3	1.98E+05	6.68E+04	Zr	Zr-94(n,a)Sr-91(99.61%)+Zr-92(n,2p)Sr-91(0.39%)
		652.9	5.35E+05	2.22E+04		
		749.8	1.58E+06	9.46E+03		
		925.8	2.56E+05	7.33E+04		
		1024.3	2.23E+06	9.89E+03		
Ta-180	489.12	93.4	1.97E+06	1.15E+01	Ta	Ta-181(n,2n)Ta-180
		103.6	3.55E+05	5.75E+01		

4^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

Tc-99m1	360.9	140.511	1.32E+06	4.24E+01	Mo	Mo-100(n,2n)Mo-99(B-)Tc-99m1
Th-231	1531.1 95	25.64	1.48E+07	8.11E+06	Th	Th-232(n,2n)Th-231
		58.57	4.88E+05	1.44E+03		
		72.751	2.55E+05	1.38E+03		
		81.228	9.05E+05	3.12E+02		
		82.087	4.07E+05	6.81E+02		
		84.214	6.71E+06	3.96E+01		
		89.95	9.56E+05	2.07E+02		
		99.278	1.22E+05	1.78E+03		
		102.27	4.17E+05	5.07E+02		
U-237	9720	59.536	1.24E+06	1.69E+02	U	U-238(n,2n)U-237
		208	7.60E+05	9.46E+01		
Xe-135	548.4	249.794	6.24E+06	1.04E+03	Ba	Ba-138(n,a)Xe-135(77.97%)+Ba-138(n,a)Xe-135m1(IT)Xe-135(21.99%)+Ba-137(n,He3)Xe-135(0.03%)+Ba-136(n,2p)Xe-135(0.01%)
		608.185	2.01E+05	4.85E+04		
Y-88	153576	898.042	4.34E+06	4.72E+02	Y	Y-89(n,2n)Y-88(99.98%)+Y-89(n,p)Sr-89(B-)Y-89(n,2n)Y-88(0.02%)
		1836.06 3	4.60E+06	4.91E+02		
Y-90m1	191.4	202.53	4.60E+05	1.08E+03	Y	Y-89(n,g)Y-90m1
		479.51	4.29E+05	2.86E+03		
Zn-65	351446 .4	1115.53 9	1.38E+06	1.18E+04	Zn	Zn-66(n,2n)Zn-65(99.56%)+Zn-64(n,g)Zn-65(0.24%)+Zn-66(n,p)Cu-66(B-)Zn-66(n,2n)Zn-65(0.20%)
Zn-69m1	825.6	438.634	3.81E+05	1.36E+04	Zn	Zn-68(n,g)Zn-69m1

*Tc-99m1(89.78%)+Mo-99(10.22%)

Ισότοπο	Όριο μέτρησης (ppm)	Όριο ποσοτικοποίησης (ppm)
Ag-113	3.36E+01	3.40E+01
	5.44E+01	5.51E+01
	5.71E+01	5.78E+01
	1.14E+00	1.15E+00
	1.66E-01	1.69E-01
	1.46E+00	1.48E+00
	3.37E+00	3.41E+00
	2.72E+00	2.76E+00
	1.48E+01	1.50E+01
	8.39E+01	8.51E+01
	1.46E+01	1.48E+01
	1.07E+02	1.09E+02
	1.29E+01	1.31E+01
	6.20E+01	6.29E+01
	1.53E+02	1.55E+02
	3.69E+00	3.74E+00
4.82E+00	4.88E+00	

	2.35E+02	2.38E+02
	8.30E+01	8.41E+01
	1.54E+01	1.56E+01
	7.63E+01	7.74E+01
	1.20E+01	1.22E+01
	1.28E+02	1.29E+02
	1.34E+02	1.36E+02
	1.61E+02	1.63E+02
	1.49E+01	1.51E+01
	4.87E+01	4.93E+01
As-74	4.86E+01	4.92E+01
	1.96E+02	1.99E+02
As-76	2.71E+03	2.74E+03
Ba-131	4.14E+04	4.19E+04
Cd-115	5.03E+02	5.10E+02
	1.54E+02	1.56E+02
Ce-135	3.25E+03	3.30E+03
	6.86E+03	6.96E+03
	1.54E+04	1.56E+04
	2.17E+04	2.20E+04
	1.24E+04	1.26E+04
Co-57	4.11E+02	4.16E+02
	3.19E+03	3.23E+03
Cs-129	9.20E+03	9.33E+03
	1.15E+04	1.17E+04
Dy-157	8.26E+02	8.38E+02
Eu-150m1	1.97E+02	2.00E+02
	2.64E+02	2.68E+02
Eu-152	4.73E+01	4.80E+01
Eu-152m1	4.85E+01	4.92E+01
	2.74E+02	2.78E+02
	9.31E+01	9.43E+01
	1.35E+02	1.36E+02
Hf-173	5.51E+02	5.58E+02
I-130	1.50E+03	1.52E+03
	2.57E+03	2.60E+03
In-115m1	1.18E+02	1.20E+02
K-43	5.59E+04	5.66E+04
	4.64E+03	4.71E+03
	3.51E+04	3.56E+04
	1.15E+06	1.17E+06
	5.23E+04	5.31E+04
	7.65E+03	7.75E+03
	3.42E+06	3.47E+06
	5.29E+05	5.36E+05

Mo-99	3.60E+01	3.65E+01
	3.14E+02	3.18E+02
	4.69E+02	4.75E+02
	1.25E+03	1.26E+03
Na-22	2.69E+04	2.73E+04
Nb-96	1.08E+03	1.09E+03
	9.19E+02	9.32E+02
Ni-57	3.04E+02	3.08E+02
	1.68E+02	1.70E+02
	4.13E+03	4.18E+03
	2.22E+03	2.25E+03
Pb-203	2.71E+02	2.75E+02
	7.55E+03	7.65E+03
Sb-122	3.88E+02	3.93E+02
Sr-91	5.68E+04	5.76E+04
	1.89E+04	1.91E+04
	8.05E+03	8.16E+03
	6.23E+04	6.32E+04
	8.41E+03	8.53E+03
Ta-180	9.74E+00	9.87E+00
	4.89E+01	4.96E+01
Tc-99m1	3.60E+01	3.65E+01
Th-231	6.90E+06	7.00E+06
	1.22E+03	1.24E+03
	1.17E+03	1.19E+03
	2.65E+02	2.69E+02
	5.79E+02	5.87E+02
	3.37E+01	3.41E+01
	1.76E+02	1.78E+02
	1.51E+03	1.53E+03
	4.31E+02	4.37E+02
	1.14E+03	1.16E+03
U-237	1.43E+02	1.45E+02
	8.05E+01	8.16E+01
Xe-135	8.81E+02	8.93E+02
	4.12E+04	4.18E+04
Y-88	4.02E+02	4.07E+02
	4.18E+02	4.23E+02
Y-90m1	9.20E+02	9.33E+02
	2.44E+03	2.47E+03
Zn-65	1.00E+04	1.02E+04
Zn-69m1	1.16E+04	1.17E+04

4^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής (min)	Ενέργεια (keV)	Iγ (counts)	Ελάχιστο όριο ανίχνευσης (ppm)	Χημικό Στοιχείο	Αλυσίδα αντίδρασης
As-74	25588.8	595.83	8.46E+08	1.34E+00	As	As-75(n,2n)As-74(100.00%)+...
		634.78	2.19E+08	5.40E+00		
As-76	1574.395	559.1	5.30E+06	2.04E+02	As	Br-79(n,p)Se-79(B-)Br-79(n,a)As-76(79.49%)+Br-79(n,a)As-76(12.91%)+As-75(n,g)As-76(6.75%)+Se-76(n,p)As-76(0.82%)+Se-77(n,np)As-76(0.01%)+Se-77(n,d)As-76(0.01%)
		563.23	1.42E+05	7.69E+03		
		595.83	8.46E+08	1.34E+00		
		634.78	2.19E+08	5.40E+00		
Ba-131	16560	123.805	6.23E+06	8.22E+02	Ba	Ba-132(n,2n)Ba-131
		216.078	4.23E+06	1.77E+03		
		373.246	3.02E+06	3.39E+03		
		496.326	1.01E+07	1.18E+03		
Ba-133	5525528	80.997	1.98E+06	3.18E+03	Ba	Ba-134(n,2n)Ba-133(97.12%)+Ba-134(n,p)Cs-134(B-)Ba-134(n,2n)Ba-133(2.88%)
		216.078	4.23E+06	1.77E+03		
		123.805	6.23E+06	8.22E+02		
		356.013	1.13E+06	8.87E+03		
		373.246	3.02E+06	3.39E+03		
		496.326	1.01E+07	1.18E+03		
		818.514	6.78E+06	2.87E+03		
		1048.073	5.56E+06	5.50E+03		
Cd-115	3207.6	260.896	1.06E+06	7.04E+01	Cd	Cd-116(n,2n)Cd-115(99.74%)+Cd-114(n,g)Cd-115(0.26%)
		492.351	4.37E+06	2.21E+01		
		527.901	1.50E+07	6.76E+00		
Co-57	391305.6	14.413	8.69E+06	3.84E+47	Ni	Ni-58(n,np)Co-57(96.96%)+Ni-58(n,d)Co-57(3.04%)
		122.061	8.12E+07	1.04E+01		
		136.474	1.01E+07	8.06E+01		
Cs-129	1923.595	39.578	2.13E+06	1.56E+05	Ba	Ba-130(n,2n)Ba-129(EC)Cs-129(88.00%)+Ba-130(n,np)Cs-129(10.25%)+Ba-130(n,d)Cs-129(1.76%)
		278.614	9.49E+05	8.42E+03		
		318.18	1.76E+06	5.45E+03		
		371.918	2.20E+07	4.66E+02		
		411.49	1.60E+07	5.83E+02		
548.945	2.44E+06	5.20E+03				
Hf-175	100800	343.4	5.79E+06	4.73E+01	Hf	Hf-176(n,p)Lu-176(B-)Hf-176(n,2n)Hf-175(66.46%)+Hf-176(n,2n)Hf-175(33.54%)
Hg-197	3848.4	77.351	1.23E+05	1.71E+01	Hg	Hg-198(n,2n)Hg-197
		133.98	1.36E+00	1.07E+06		
		191.364	4.17E+03	3.12E+02		
		268.71	2.59E+02	7.71E+03		
Mo-99	3956.4	40.584	1.30E+06	3.06E+03	Mo	Mo-100(n,2n)Mo-99(99.67%)+Mo-98(n,g)Mo-99(0.33%)
		140.511	1.11E+08	7.07E-01		
		181.068	7.39E+06	1.25E+01		
		366.421	1.47E+06	1.09E+02		
		739.5	1.50E+07	1.86E+01		
		777.921	5.25E+06	4.96E+01		

4^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

Na-22	136662 3	1274.53	3.54E+08	6.93E+02	Na	Na-23(n,2n)Na-22
Ni-57	2135.9 95	127.164	4.78E+07	1.74E+01	Ni	Ni-58(n,2n)Ni-57
		1377.63	2.34E+08	9.59E+00		
		1757.55	1.65E+07	2.36E+02		
		1919.52	3.52E+07	1.27E+02		
Pb-203	3112.3 87	279.197	2.87E+08	1.21E+01	Pb	Pb-204(n,2n)Pb-203(59.11%)+Pb-204(n,2n)Pb-203m1(IT)Pb-203(40.89%)
		401.325	1.19E+07	3.37E+02		
		680.514	2.68E+06	2.31E+03		
Rb-83	124128	520.399	2.21E+06	4.21E+03	Sr	Sr-84(n,np)Rb-83(93.78%)+Sr-84(n,d)Rb-83(6.22%)
		529.595	1.45E+06	6.50E+03		
Sb-122	3918.0 96	564.24	2.12E+08	6.51E-01	Sb	Sb-123(n,2n)Sb-122(99.82%)+Sb-121(n,g)Sb-122(0.17%)+Sb-121(n,g)Sb-122m1(IT)Sb-122(0.01%)
		692.65	1.16E+07	1.55E+01		
		1140.67	2.27E+06	1.83E+02		
		1256.93	2.44E+06	8.63E+01		
Sr-83	1944.6 05	381.53	1.99E+07	3.06E+02	Sr	Sr-84(n,2n)Sr-83
		418.37	6.24E+06	1.18E+03		
		511	5.67E+09	2.05E+00		
		762.65	4.25E+07	2.91E+02		
Sr-85	93369. 6	514.007	2.42E+08	3.41E+01	Sr	Sr-86(n,2n)Sr-85(99.99%)+Sr-84(n,g)Sr-85(0.01%)+...
Ta-180	489.12	93.4	4.94E+06	6.40E+00	Ta	Ta-181(n,2n)Ta-180
		103.6	8.89E+05	3.21E+01		
Th-231	1531.1 95	25.64	3.12E+08	5.36E+05	Th	Th-232(n,2n)Th-231
		58.57	1.03E+07	9.49E+01		
		72.751	5.41E+06	9.13E+01		
		81.228	1.92E+07	2.06E+01		
		82.087	8.61E+06	4.50E+01		
		84.214	1.42E+08	2.62E+00		
		89.95	2.02E+07	1.37E+01		
		99.278	2.58E+06	1.17E+02		
		102.27	8.83E+06	3.35E+01		
		135.664	1.68E+06	1.53E+02		
		163.101	3.34E+06	8.88E+01		
U-237	9720	51.01	6.53E+05	7.81E+02	U	U-238(n,2n)U-237
		59.536	6.62E+07	4.41E+00		
		64.83	2.46E+06	8.72E+01		
		164.61	3.57E+06	2.28E+01		
		208	4.07E+07	2.48E+00		
		267.54	1.37E+06	9.47E+01		
		332.36	2.30E+06	6.90E+01		
Y-88	153576	898.042	2.75E+08	1.05E+01	Y	Y-89(n,2n)Y-88(99.98%)+Y-89(n,p)Sr-89(B-)Y-89(n,2n)Y-88(0.02%)
		1836.06 3	2.91E+08	1.09E+01		
		2734	2.09E+06	4.48E+02		
Yb-169	46117. 44	177.214	8.18E+05	9.32E+01	Yb	Yb-170(n,2n)Yb-169
		197.958	1.32E+06	6.89E+01		

4^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

Zn-65	351446 .4	1115.53 9	8.78E+07	2.59E+02	Zn	Zn-66(n,2n)Zn-65(99.56%)+Zn-64(n,g)Zn-65(0.24%)+Zn-66(n,p)Cu-66(B-)Zn-66(n,2n)Zn-65(0.20%)
-------	--------------	--------------	----------	----------	----	--

*Tc-99m1(89.78%)+Mo-99(10.22%)

**Pb-203(99.95%)+Hg-203(0.05%)

Ισότοπο	Όριο μέτρησης (ppm)	Όριο ποσοτικοποίησης (ppm)
As-74	1.14E+00	1.15E+00
	4.59E+00	4.65E+00
As-76	1.74E+02	1.76E+02
	6.54E+03	6.63E+03
	1.14E+00	1.15E+00
	4.59E+00	4.65E+00
Ba-131	6.99E+02	7.09E+02
	1.50E+03	1.52E+03
	2.89E+03	2.93E+03
	1.00E+03	1.02E+03
Ba-133	2.71E+03	2.74E+03
	1.50E+03	1.52E+03
	6.99E+02	7.09E+02
	7.54E+03	7.64E+03
	2.89E+03	2.93E+03
	1.00E+03	1.02E+03
	2.44E+03	2.47E+03
	4.68E+03	4.74E+03
Cd-115	5.98E+01	6.07E+01
	1.88E+01	1.91E+01
	5.75E+00	5.83E+00
Co-57	1.11E+48	1.13E+48
	8.84E+00	8.96E+00
	6.86E+01	6.95E+01
Cs-129	1.33E+05	1.35E+05
	7.16E+03	7.26E+03
	4.63E+03	4.70E+03
	3.96E+02	4.02E+02
	4.96E+02	5.03E+02
	4.43E+03	4.49E+03
Hf-175	4.02E+01	4.08E+01
Hg-197	1.45E+01	1.47E+01
	9.09E+05	9.21E+05
	2.65E+02	2.69E+02
	6.55E+03	6.64E+03
Mo-99	2.64E+03	2.60E+03
	6.10E-01	6.01E-01

	1.08E+01	1.06E+01
	9.36E+01	9.24E+01
	1.61E+01	1.59E+01
	4.28E+01	4.22E+01
Na-22	5.89E+02	5.97E+02
Ni-57	1.48E+01	1.50E+01
	8.16E+00	8.27E+00
	2.01E+02	2.04E+02
	1.08E+02	1.09E+02
Pb-203	1.03E+01	1.05E+01
	2.87E+02	2.91E+02
	1.96E+03	1.99E+03
Rb-83	3.58E+03	3.63E+03
	5.52E+03	5.60E+03
Sb-122	5.54E-01	5.61E-01
	1.32E+01	1.34E+01
	1.56E+02	1.58E+02
	7.34E+01	7.44E+01
Sr-83	2.61E+02	2.64E+02
	1.00E+03	1.02E+03
	1.75E+00	1.77E+00
	2.47E+02	2.51E+02
Sr-85	2.90E+01	2.94E+01
Ta-180	5.44E+00	5.52E+00
	2.73E+01	2.77E+01
Th-231	4.56E+05	4.62E+05
	8.07E+01	8.18E+01
	7.76E+01	7.87E+01
	1.75E+01	1.78E+01
	3.83E+01	3.88E+01
	2.22E+00	2.26E+00
	1.16E+01	1.18E+01
	9.98E+01	1.01E+02
	2.85E+01	2.89E+01
	1.31E+02	1.32E+02
	7.55E+01	7.65E+01
U-237	6.64E+02	6.73E+02
	3.75E+00	3.80E+00
	7.41E+01	7.51E+01
	1.94E+01	1.97E+01
	2.10E+00	2.13E+00
	8.05E+01	8.17E+01
	5.87E+01	5.95E+01
Y-88	8.88E+00	9.01E+00
	9.24E+00	9.36E+00
	3.81E+02	3.87E+02

4^{ος} κύκλος, IAEA-Soil-7

Yb-169	7.93E+01	8.04E+01
	5.86E+01	5.94E+01
Zn-65	2.21E+02	2.24E+02