



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ-ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΗ
ΤΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ, ΤΟΥ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ
ΑΘΗΝΩΝ, ΤΟΥ ΙΑΤΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΤΟΥ ΙΑΤΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ
ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΡΑΚΗΣ, ΤΟΥ ΙΑΤΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ
ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ, ΤΟΥ ΙΑΤΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ
(ΥΠΟΥΡΓΙΚΗ ΑΠΟΦΑΣΗ ΑΡΙΘΜ.Β7/371/12.8.98, ΦΕΚ 942/2.9.98 Τ.Β.)

**«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ
ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ»**

ΚΑΣΒΙΚΗ ΚΑΛΛΙΟΠΗ

Φυσικός Ιατρικής - Ακτινοφυσικός

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννινα 2014



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ-ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΗ
ΤΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ, ΤΟΥ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ
ΑΘΗΝΩΝ, ΤΟΥ ΙΑΤΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΤΟΥ ΙΑΤΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ
ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΡΑΚΗΣ, ΤΟΥ ΙΑΤΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ
ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ, ΤΟΥ ΙΑΤΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ
(ΥΠΟΥΡΓΙΚΗ ΑΠΟΦΑΣΗ ΑΡΙΘΜ.Β7/371/12.8.98, ΦΕΚ 942/2.9.98 Τ.Β.)

**«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ
ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ»**

ΚΑΣΒΙΚΗ ΚΑΛΛΙΟΠΗ

Φυσικός Ιατρικής - Ακτινοφυσικός

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννινα 2014

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ιατρική Σχολή του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα Ν. 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2 (νομική κατοχύρωση του Ιατρικού Τμήματος)»

Ένταξη για εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής στο Διαπανεπιστημιακό –Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών σπουδών «Ιατρική Φυσική –Ακτινοφυσική» της κ. Κασβίκη Καλλιόπης : 23-4-2003

Ορισμός Τριμελούς Συμβουλευτικής επιτροπής: 23-4-2003 σύμφωνα με απόφαση της Διατμηματικής Συνέλευσης Ειδικής Σύθεσης ΠΜΣ στην «Ιατρική Φυσική –Ακτινοφυσική».

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καλέφ –Εζρά Τζων Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, επιβλέπων

Φωτόπουλος Ανδρέας Επίκουρος Καθηγητής Πορθηκής Ιατρικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, μέλος

Σταματελάτος Ίων Ερευνητής, Ε.ΚΕ.Φ.Ε «Δημόκριτος» μέλος

Ορισμός Θέματος: 23-4-2003

«Ανάπτυξη διάταξης άμεσης ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση για βιοιατρικές εφαρμογές»

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καλέφ –Εζρά Τζων	Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Κιόρτης Δημήτριος -Νικηφόρος	Καθηγητής Φυσιολογίας της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Παναγιωτάκης Γεώργιος	Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών
Σιαμόπουλος Κωνσταντίνος	Καθηγητής Παθολογίας Νεφρολογίας της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Φωτόπουλος Ανδρέας	Καθηγητής Πορθηκής Ιατρικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Εμμεριζόγλου Δημήτριος	Επίκουρος Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής – Ακτινοφυσικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Λεοντίου Ιωάννης	Επίκουρος Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Έγκριση Διδακτορικής Διατριβής με βαθμό «ΑΡΙΣΤΑ» στις 28-6-2013

ΠΡΟΕΔΡΟΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

Ανδρέας Φωτόπουλος

Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής

Η Γραμματέας του Τμήματος


ΜΑΡΙΑ ΚΑΠΙΤΟΠΟΥΛΟΥ



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Τζ. Καλέφ-Εζρά για την επίβλεψη της διατριβής και για τη στήριξή του. Κυρίως τον ευχαριστώ για την υπομονή του όλα τα χρόνια που καθυστέρησα την παράδοση της εργασίας. Είναι ο δάσκαλος που μου διδάξε τις βασικές αρχές της Ιατρικής Φυσικής και της έρευνας και με εισήγαγε στον κόσμο των ακτινοβολιών, από την αρχή των σπουδών μου, αργότερα κατά το διορισμό μου ως ακτινοφυσικός αλλά μέχρι και σήμερα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Ερευνητή Α' κ. Ι. Σταματελάτο, για την καθημερινή βοήθεια και ενασχόλησή του με την εκπόνηση της διατριβής. Τον ευχαριστώ για την υποστήριξή του και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου από την έναρξη αυτής της εργασίας. Επίσης τον ευχαριστώ για την ευκαιρία που μου έδωσε να κινηθώ στον κόσμο της έρευνας και για την υπομονή και κατανόηση που έδειξε για την παράδοση του τελικού κειμένου.

Ευχαριστώ πολύ τον διευθυντή του Ινστιτούτου Πυρηνικών και Ραδιολογικών Επιστημών, Ενέργειας, Τεχνολογίας και Ασφάλειας καθηγητή Μ. Αντωνόπουλο – Ντόμη και τον προϊστάμενο του Εργαστηρίου του Ερευνητικού Αντιδραστήρα κ. Ν. Κατσαρό για τη φιλοξενία και την υποστήριξη που μου προσέφεραν κατά το χρονικό διάστημα παραμονής μου στο εργαστήριο. Η εμπιστοσύνη που δείξαν και η άνεση που μου παρείχαν κατά τη συνεργασία μας (γραφείο, υπολογιστής, δύκτιο, γραφική ύλη, πρόσβαση σε χώρους, συμμετοχή στα δρώμενα) ήταν καθοριστικά για την ανάπτυξή μου στο χώρο του Εργαστηρίου.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Γ. Λευκόπουλο, ηλεκτρονικό του Εργαστηρίου του Αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», για την τεχνική υποστήριξή του με τα ηλεκτρονικά της διάταξης και το 'δέσιμο' βαρέων τεμαχίων της διάταξης (αμέτρητες αλλαγές της θωράκισης και της γεωμετρίας ανιχνευτών και κατευθυντήρα) όπως επίσης και για τη συντροφιά του και την καλή συνεργασία μας.

Ευχαριστώ πολύ το προσωπικό του Εργαστηρίου του Αντιδραστήρα για την ευγένεια συναναστροφής τους και την άμεση αποδοχή τους στο χώρο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής καθώς και της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για το χρόνο και τη διάθεση που αφιέρωσαν στην επίβλεψη και την εξέταση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την πατρική μου οικογένεια για την αγάπη τους και τη συμπαράστασή τους, ηθική και οικονομική, όλα τα δύσκολα χρόνια συνεχούς εκπαίδευσης και ιδιαιτέρως το σύζυγό μου για την αγάπη του και τη στήριξη που μου παρείχε με τη φροντίδα της κόρης μας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΣΩΜΑΤΟΣ.....	1
1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΜΕΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ.....	2
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	5
ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	5
2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΣΩΜΑΤΟΣ.....	5
2.1.1 Σύσταση ανθρώπινου σώματος.....	5
2.1.2 Μοντέλα σύστασης σώματος	6
2.1.3 Μέθοδοι <i>in vivo</i> ανάλυσης σύστασης σώματος	9
2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ	12
2.2.1 Αλληλεπίδραση νετρονίων με βιολογικούς ιστούς.....	12
2.2.2 Φυσική αρχή της ANE	13
2.3 ΑΜΕΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ (AANE)	14
2.3.1 Η μέθοδος της AANE	14
2.3.2 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές της μεθόδου της AANE	18
2.4 ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ MCNP4C2.....	19
2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	19
2.5.1 <i>In vivo</i> μετρήσεις αζώτου με την τεχνική της PGNAΑ	21
2.5.2 Μετρήσεις <i>in vivo</i> σε μικρά ζώα	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	27

ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	27
3.1 ΥΛΙΚΑ	27
3.1.1 Πειραματική διάταξη.....	27
3.1.2 Ομοιώματα	33
3.1.3 Υπολογιστικό μοντέλο διάταξης AANE	35
3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ.....	37
3.2.1 Προέλευση υποβάθρου μέτρησης με ανιχνευτή NaI(Tl)	37
3.2.2 Μέθοδος πειραματικών μετρήσεων	37
3.2.3 Υπολογιστική μέθοδος με τον κώδικα MCNP4C2	38
3.2.4 Σχεδιασμός διάταξης.....	39
3.2.5 Air Kerma free-in-air	43
3.2.6 Σύνθετη ευαισθησία ενεργοποίησης και ανίχνευσης.....	43
3.2.7 Επίδραση των ανομοιογενειών στη μέτρηση του αζώτου	46
3.2.8 Μέθοδος βαθμονόμησης διάταξης για τη μέτρηση του αζώτου	47
3.2.9 Προσδιορισμός ακρίβειας μέτρησης αζώτου	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	53
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	53
4.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	53
4.1.1 Σύγκριση πηγών $^{239}\text{Pu-Be}$ και $^{241}\text{Am-Be}$	53
4.1.2 Σύγκριση πηγών $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf	56
4.1.3 Επιλογή υλικών και μήκους κατευθυντήρα	62
4.1.4 Θέση και θωράκιση του ανιχνευτή	70
4.2 ΤΥΠΙΚΟ ΦΑΣΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ NaI(Tl).....	72
4.3 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	75

4.4	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΙΩΝ	79
4.5	AIR KERMA FREE-IN-AIR	80
4.6	ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ	81
4.6.1	Σε διαλύματα αζώτου	81
4.6.2	Σε δείγματα ομογενοποιημένου κρέατος	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		85
ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ		85
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	85
5.2	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	85
5.2.1	Επιλογή πηγής ακτινοβολίας	85
5.2.2	Επιλογή υλικού και μήκους κατευθυντήρα.....	87
5.2.3	Θέση και θωράκιση ανιχνευτή.....	87
5.2.4	Υπόβαθρο μέτρησης με τον ανιχνευτή NaI(Tl)	88
5.3	ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΙΩΝ	89
5.4	ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		91
ΓΕΝΙΚΗ ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		91
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΓΛΩΣΣΑ.....		97
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΚΗ ΓΛΩΣΣΑ		99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		101
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕ ΤΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ		117
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		119
ΜΕΛΕΤΗ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ με ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ		119

A.1	ΥΛΙΚΑ	119
A.1.1.	Πειραματική διάταξη.....	119
A.1.2.	Περιγραφή χώρου.....	120
A.1.3.	Όρια δόσεων.....	120
A.1.4.	Όργανα μέτρησης.....	121
A.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	121
A.2.1.	Παραδοχές.....	121
A.2.2.	Μετρήσεις – Υπολογισμοί	121
A.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	122
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	123
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ‘ΚΑΘΑΡΩΝ’ ΠΑΛΜΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	125

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΣΩΜΑΤΟΣ

Η ανάλυση της σύστασης του σώματος απασχόλησε τον άνθρωπο από την εποχή των αρχαίων χρόνων, όταν ο προσωκρατικός υλιστής φιλόσοφος Εμπεδοκλής από τον Ακράγαντα της Σικελίας τον 5^ο αιώνα π.Χ., διατύπωσε στο ποιητικό του έργο *Περί Φύσεως* την ιδέα ότι το σύμπαν, και κατ' επέκταση το ανθρώπινο σώμα, αποτελείται από συνδιασμό τεσσάρων βασικών συστατικών: το νερό (= Νησπς), τη φωτιά (= Ζευς), τον αέρα (= Ήρα) και τη γή (= Αίδωνεύς). Θεώρησε ότι αυτά τα στοιχεία συγκρατούνται μεταξύ τους σε διαφορετική αναλογία, χαρακτηριστική για κάθε αντικείμενο, με την επίδραση δυνάμεων όπως η 'αγάπη' ή 'αρμονία' (= φιλότης) και η 'φιλονικία' ή 'μίσος' (= νείκος). Η διαφορετική αναλογία αυτών των τεσσάρων υλικών σε κάθε αντικείμενο, προσδίδει στο αντικείμενο τη διαφορετική σύσταση και τις φυσικές και χημικές ιδιότητες που αυτό έχει. Με αυτόν τον τρόπο, ο Εμπεδοκλής ο Ακραγαντίνος παρείχε το 'κλειδί' για το πρώτο μοντέλο διαμερισματοποίησης του ανθρώπινου σώματος.

Πραγματικά, το ανθρώπινο σώμα μπορεί να θεωρηθεί συχνά ότι αποτελείται από τέσσερα διαμερίσματα: νερό, πρωτεΐνες, λίπος (αποθήκες ενέργειας) και οστικά άλατα [Hill G.L.

1978]. Για υγιείς ενήλικες, η αναλογία αυτών των στοιχείων, εκτός του λίπους, είναι σχετικά σταθερή για κάθε φύλο. Ωστόσο, σε ασθενείς με ορισμένα μεταβολικά νοσήματα η αναλογία των διαμερισμάτων μπορεί να διαφοροποιηθεί. Ως εκ τούτου, είναι σημαντική η *in vivo* δυνατότητα ποσοτικοποίησης της αναλογίας των διαφόρων διαμερισμάτων με σκοπό τον εντοπισμό και διάγνωση ατόμων με τέτοια νοσήματα, την παρακολούθησή τους, καθώς και σε μελέτες με πειραματικά μοντέλα.

1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΜΕΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες έγινε εκτενής έρευνα για την ανάπτυξη εξειδικευμένων τεχνικών μέτρησης της σύστασης του σώματος. Η Ανάλυση με Νετρονική Ενεργοποίηση (ANE) επιτρέπει την πολυστοιχειακή ανάλυση ενός δείγματος με υψηλή ακρίβεια και μεγάλη ευαισθησία. Η δυνατότητα ανάλυσης με ANE θεωρείται ότι διατυπώθηκε πρώτη φορά το 1936, όταν οι Hevesy και Levi ανακάλυψαν ότι υλικά τα οποία περιέχουν συγκεκριμένα στοιχεία σπάνιων γαιών γίνονται ραδιενεργά μετά την έκθεσή τους σε πηγές νετρονίων. Από αυτή την παρατήρηση, αναγνώρισαν τη δυνατότητα ποιοτικού και ποσοτικού προσδιορισμού των στοιχείων του ακτινοβολούμενου δείγματος, αν μετρούσαν την παραγόμενη ακτινοβολία από τα στοιχεία αυτά. Η εφαρμογή της μεθόδου στην *in vivo* μέτρηση στοιχείων του ανθρώπινου σώματος έδωσε λύση σε ιατρικά θέματα, όπως για παράδειγμα στη μελέτη μεταβολικών διαταραχών [Beddoe A.H. 1984] και στη μελέτη ιατρικών προβλημάτων από περιβαλλοντική επιβάρυνση (π.χ. η εσωτερική εναπόθεση καδμίου στο ήπαρ και τα νεφρά του ανθρώπου) [Harvey T.C. 1975].

Για τη μέτρηση στοιχείων τα οποία δύσκολα μετρούνται με τη μέθοδο της κλασικής ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση, όπως το υδρογόνο και το άζωτο, αναπτύχθηκε η τεχνική της Άμεσης Ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση (AANE) κατά την οποία ανιχνεύονται οι άμεσες ακτίνες-γ που εκπέμπονται από τους πυρήνες σύλληψης νετρονίων. Τα βασικά στοιχεία που απαιτούνται για αυτή την τεχνική είναι ακριβής γνώση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των νετρονίων με το προς εξέταση δείγμα, μία πηγή νετρονίων και μία διάταξη για την ανίχνευση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας-γ. Πρόκειται, επομένως, για μια σχετικά απλή μη καταστροφική τεχνική, η οποία με κατάλληλο σχεδιασμό – υπόβαθρο μέτρησης, στατιστική ακρίβεια, ομοιογένεια – και κατάλληλη βαθμονόμηση, επιτρέπει τον προσδιορισμό της ποσότητας διαφόρων στοιχείων στο δείγμα με ακρίβεια και

επαναληψιμότητα συγκρίσιμες με αυτές άλλων μεθόδων ανάλυσης. Παραδείγματα στοιχείων του ανθρώπινου σώματος τα οποία έχουν μετρηθεί επιτυχώς με την τεχνική της άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση είναι το άζωτο, το κάδμιο και το ασβέστιο.

Με τον συνδυασμό διαφορετικών αναλυτικών πυρηνικών τεχνικών – όπως άμεση ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση, ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση με ‘καθυστερημένες’ ακτίνες-γ, ολόσωμος μετρητής ακτινοβολίας κ.α. - η σύσταση σώματος μπορεί να διαμερισματοποιηθεί και να ποσοτικοποιηθεί τόσο στον άνθρωπο όσο και στα πειραματόζωα ή άλλα βιολογικά υλικά [Cohn S.H. 1992].

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της ερευνητικής προσπάθειας είναι η ανάπτυξη διάταξης Άμεσης Ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση με στόχο τη μέτρηση του συνολικού αζώτου σε βιολογικά δείγματα και σε μικρά ζώα συνολικής μάζας ~0.2 – 1.5 kg. Το συνολικό άζωτο στο σώμα βρίσκεται σε σταθερή αναλογία με τη συνολική πρωτεΐνη στο σώμα και ο ποσοτικός προσδιορισμός του επιτρέπει τη μελέτη του ρυθμού μεταβολής της πρωτεΐνης σε ιστούς λόγω διατροφής ή παθολόγησης.

Η παρούσα εργασία έγινε με συνεργασία δύο ερευνητικών ομάδων: του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων και του Εργαστηρίου του Αντιδραστήρα του Ινστιτούτου Πυρηνικών και Ραδιολογικών Επιστημών, Τεχνολογίας, Ενέργειας και Ασφάλειας στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος».

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ο σχεδιασμός διάταξης AANE, όσον αφορά την πηγή νετρονίων, τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας και του υλικού του κατευθυντήρα της δέσμης νετρονίων και την επιλογή, τη θέση και τη θωράκιση του ανιχνευτή των ακτίνων-γ. Επιπλέον, κατά το σχεδιασμό της θωράκισης της πηγής και του ανιχνευτή, ελήφθη υπόψη η βελτιστοποίηση του σήματος μέτρησης με στόχο τη μείωση του στατιστικού σφάλματος μέτρησης του αζώτου και τη μείωση της απορροφούμενης δόσης στο ακτινοβολούμενο δείγμα. Για την επίτευξη του στόχου κατασκευάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της διάταξης (πηγή νετρονίων, κατευθυντήρας δέσμης νετρονίων, θωρακίσεις και ανιχνευτής) με κώδικα Monte Carlo και έγινε επαλήθευση του μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις.

Σε δεύτερη φάση αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία βαθμονόμησης της διάταξης για τη μέτρηση του αζώτου σε βιολογικά δείγματα όγκου 0.25 – 1.00 L και μελετήθηκε η επίδραση των ανομοιογενειών του δείγματος κατά τη μέτρηση του αζώτου μελετώντας την κατανομή ενεργοποίησης πυρήνων αζώτου στο εσωτερικό του δείγματος και την ικανότητα ομοιογενούς ανίχνευσής τους.

Τέλος, υπολογίστηκε η ακρίβεια μέτρησης του συνολικού αζώτου σε υγρά διαλύματα ‘ισοδύναμα ιστών’ γνωστής συγκέντρωσης αζώτου και σε δείγματα ομογενοποιημένου κρέατος. Οι μετρήσεις επιβεβαιώθηκαν με ανάλυση των δειγμάτων κρέατος με δύο χημικές μεθόδους. Τα αποτελέσματα επιδεικνύουν τη δυνατότητα της τεχνικής Άμεσης Ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση για τον προσδιορισμό της συνολικής πρωτεΐνης σε βιολογικά δείγματα μάζας 0.25 – 1.0 kg, όπως είναι δείγματα κρέατος ή το σώμα μικρών ζώων.

Οι προτάσεις για περαιτέρω βελτιστοποίηση της τεχνικής με στόχο τη μείωση του στατιστικού σφάλματος μέτρησης του αζώτου και τη μείωση του χρόνου ακτινοβολήσης για τις *in vivo* εφαρμογές, είναι εφικτές και εφαρμόσιμες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΣΩΜΑΤΟΣ

2.1.1 Σύσταση ανθρώπινου σώματος

Η μελέτη που αφορά στη σύσταση του ανθρώπινου σώματος δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP) το 1975 [ICRP23 1975] και αναφέρονται στη σύσταση του σώματος στο μέσο υγιή άνθρωπο ηλικίας μεταξύ 20 – 30 ετών, μάζας 70 kg και ύψους 170 cm (‘άνθρωπος αναφοράς’ – ‘reference man’). Ο άνθρωπος αναφοράς ανήκει στην Καυκάσια φυλή και ακολουθεί τον τρόπο ζωής ανθρώπου που ζει στη Δυτική Ευρώπη ή τη Βόρεια Αμερική. Το 2003 διαχωρίστηκε η σύσταση του υγιούς ενήλικα άντρα από αυτήν της ενήλικης γυναίκας με μάζα και ύψος σώματος 73 kg / 176 cm και 60 kg / 163 cm αντίστοιχα [ICRP89 2003]. Επιπλέον, μελετήθηκε η σύσταση του σώματος ανθρώπων διαφορετικής φυλής, κατά την δεκαετία του 1990 κυρίως ασιατών και διαφόρων ηλικιών [Tanaka G. 1996, 1998, ICRP89 2003].

Τα δεδομένα της σύστασης του σώματος βασίζονται κυρίως σε *in vitro* χημικές αναλύσεις βιολογικών ιστών. Ωστόσο, η σύσταση του σώματος μεμονωμένων ατόμων μπορεί να διαφέρει σημαντικά από την σύσταση του ‘ανθρώπου αναφοράς’. Επομένως, σημαντική

ερευνητική προσπάθεια κατευθύνθηκε προς την ανάπτυξη τεχνικών και μεθόδων για την *in vivo* μελέτη της σύστασης του σώματος (βλέπε παράγραφο 2.1.3). Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται σε κλινικές μελέτες μεμονωμένων ατόμων ή πληθυσμών και λαμβάνουν υπ' όψιν την ιδιαίτερη κατατομή του σώματος κάθε ατόμου. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για τη διαμερισματική ανάλυση του σώματος αναφέρονται στην παράγραφο 2.1.2 και χωρίζουν το σώμα σε επιμέρους διαμερίσματα, δίνοντας έμφαση στην ατομική, τη μοριακή και την κυτταρική σύσταση ή τη θερμιδική αξία των συστατικών. Αυτά τα μοντέλα περιορίζονται από την ευκολία και διαθεσιμότητα των πειραματικών μεθόδων μέτρησης του κάθε τμήματος.

Στον Πίνακα 2-1 δίδεται η ατομική σύσταση του ανθρώπου αναφοράς, για στοιχεία που περιέχονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 0.03% κ.β. ως ποσοστό μάζας σύμφωνα με την αναφορά ICRP23, 1975, της Διεθνούς Επιτροπής Ακτινοπροστασίας.

Πίνακας 2-1 Ατομική σύσταση σώματος για τον άνθρωπο αναφοράς [ICRP23 1975]

Σύσταση σώματος	% κ.β.
Οξυγόνο	61.43
Άνθρακας	22.86
Υδρογόνο	10.00
Άζωτο	2.57
Ασβέστιο	1.43
Φώσφορος	1.11
Κάλιο	0.20
Θείο	0.20
Νάτριο	0.14
Χλώριο	0.14
Μαγνήσιο	0.03

2.1.2 Μοντέλα σύστασης σώματος

Το πρώτο μοντέλο που αναπτύχθηκε για το διαχωρισμό των συστατικών του ανθρώπινου σώματος σε διαμερίσματα, θεωρείται ότι είναι το «μοντέλο των δύο διαμερισμάτων» (two-

compartment model) [Brozek J. 1963]. Οι ιστοί χωρίζονται, με βάση την περιεκτικότητά τους σε λίπος, στους λιπώδεις ιστούς (body fat) και στους μη λιπώδεις ιστούς (fat free mass, FFM).

$$\text{μάζα λιπωδών ιστών} + \text{μάζα μη λιπωδών ιστών} = \text{μάζα σώματος} \quad \text{Εξίσωση 2-1}$$

Το μοντέλο των δύο διαμερισμάτων υποθέτει συνήθως σταθερές τιμές της πυκνότητας των λιπωδών και μη λιπωδών ιστών ($\rho_{\text{λιπ}} = 0.9 \text{ g/cm}^3$ και $\rho_{\text{μη-λιπ}} = 1.1 \text{ g/cm}^3$, αντίστοιχα) [Behnke A.R. 1942]. Επομένως υποθέτει εκτός των άλλων σταθερές τιμές συγκέντρωσης του νερού (0.732 l / kg FFM) [Pace N. 1945, ICRP89 2003] και του καλίου ($68.1 \text{ meq / kg FFM}$) [Forbes G.B. 1961] στους μη λιπώδεις ιστούς. Οι τιμές πυκνότητας είναι σχετικά σταθερές για υγιείς ενήλικες, αλλά για παιδιά ή ηλικιωμένους, για ασθενείς ή για ανθρώπους διαφορετικής φυλής, οι τιμές μεταβάλλονται με συνέπεια η ακρίβεια του μοντέλου μειώνεται.

Ένα από τα «μοντέλα τριών διαμερισμάτων» (three-compartment model) διαχωρίζει το σώμα σε τρία χημικά διαμερίσματα: το νερό, το λίπος και στις λοιπές χημικές ενώσεις. Ο διαχωρισμός αυτός δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα, ανεξάρτητα από την ηλικία, αλλά αποτυγχάνει σε ασθενείς με μεγάλες απώλειες σωματικού βάρους, αφού δε λαμβάνει υπ' όψιν τη μεταβολή στο ποσοστό της μάζας των πρωτεϊνών στη συνολική μάζα των λοιπών ενώσεων.

Οι Burkinshaw και συν. (1979) εισήγαγαν ένα εναλλακτικό «μοντέλο τριών διαμερισμάτων» διαχωρίζοντας τους μη λιπώδεις ιστούς σε μυϊκούς και μη-μυϊκούς ιστούς. Στους μη-μυϊκούς ιστούς περιλαμβάνονται ο σκελετός και τα συμπαγή έξω-κυτταρικά συστατικά. Η βασική παραδοχή του μοντέλου είναι ότι υπάρχει σταθερή αναλογία του καλίου προς το άζωτο που περιέχονται στα δύο μη λιπώδη τμήματα. Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπ' όψιν τη διακύμανση του λόγου K:N σε διαφορετικούς μη-μυϊκούς ιστούς, όπως ο εγκέφαλος, το δέρμα και το πλάσμα αίματος. Σημειώνεται ότι ο υπολογισμός της μυϊκής και μη-μυϊκής μάζας με αυτό το μοντέλο έχει συνολικό σφάλμα μεταξύ 15% και 20% λόγω των σφαλμάτων μέτρησης καλίου και αζώτου [Burkinshaw L. 1979].

Η ανάπτυξη «μοντέλων τεσσάρων διαμερισμάτων», έγινε κυρίως για διατροφικές μελέτες. Ένα από τα «χημικά» μοντέλα χωρίζει το σώμα στους λιπώδεις ιστούς, στο συνολικό νερό, σε πρωτεΐνες και σε οστικά άλατα (Πίνακας 2-2). Οι πυκνότητες της συνολικής πρωτεΐνης και

των οστικών αλάτων θεωρούνται συχνά σταθερές στα εν λόγω μοντέλα, 1.34 kg/l και 3.075 kg/l, αντίστοιχα [Snyder W.S. 1984].

Βελτίωση στο προηγούμενο μοντέλο σύστασης σώματος έγινε από τους Beddoe και συν. [Beddoe A.H. 1984b] διαχωρίζοντας τους υδρογονάνθρακες από το συνολικό λίπος του σώματος [Heymsfield S.B. 1990, Baumgartner R.N. 1991, Mackie A. 1989]. Το μοντέλο σύστασης που εισήγαγαν είναι ένα μοντέλο σύστασης σώματος «πέντε διαμερισμάτων», χωρίζοντας τη μάζα του ανθρώπινου σώματος σε λίπος, υδρογονάνθρακες, νερό, πρωτεΐνες και οστικά άλατα [Wang Z.M. 1992].

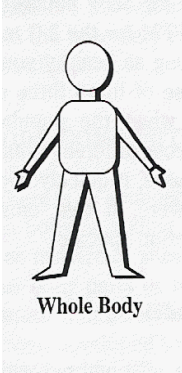
Πίνακας 2-2 Συστατικά σώματος για «μοντέλο τεσσάρων διαμερισμάτων» [ICRP23 1975]

<i>Συστατικά σώματος</i>	<i>Μάζα (g)</i>	<i>% κ.β.</i>
Νερό	42000	56.00
Υπολείμματα καύσεως (ash)	3700	4.93
Λίπος	13300	17.73
Πρωτεΐνη	10600	14.13
Σύνολο	70000	100

Το 1963, οι Moore & Boyden χώρισαν τους μη λιπώδεις ιστούς σε τρία διαφορετικά διαμερίσματα, που μαζί με τους λιπώδεις ιστούς δίνουν ένα κυτταρικό - μεταβολικό «μοντέλο τεσσάρων διαμερισμάτων» [Moore F.D. 1963]. Οι μη λιπώδεις ιστοί χωρίστηκαν σε κυτταρική μάζα (body cell mass, BCM), σε έξω-κυτταρικό υγρό (extra-cellular fluid, ECF) και σε έξω-κυτταρική συμπαγή μάζα (extra-cellular solids, ECS). Ως εκ τούτου η μη λιπώδης μάζα, FFM, υπολογίζεται από το άθροισμα των τριών συστατικών της:

$$FFM = BCM + ECW + ECS \quad \text{Εξίσωση 2-2}$$

Στην Εικόνα 2-1 δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση μερικών από τα μοντέλα σύστασης σώματος.

Λίπος	Λίπος	Λίπος	Λίπος	Λίπος	N,K,Ca,Na....	
Lean Body Mass	Μύες	πρωτεΐνη	υπόλοιπα	Εξωκυττάριο συμπαγή μάζα	Άνθρακας	
	Non muscle	Συνολικό νερό σώματος	αίμα	Ενδοκυττάριο υγρό	Υδρογόνο	
			οστά	Κυτταρική μάζα	Οξυγόνο	
	άλατα οστών	άλατα οστών	Σκελετικός μυς			
Μοντέλο δύο τμημάτων	Μοντέλο τεσσάρων τμημάτων	Μοντέλο τεσσάρων τμημάτων	Μοντέλο πέντε τμημάτων	Κυτταρικό μοντέλο του Moore	Ατομικό μοντέλο	

Εικόνα 2-1 Σχηματική αναπαράσταση των μοντέλων σύστασης σώματος [Heymsfield S.B. 1993]

2.1.3 Μέθοδοι *in vivo* ανάλυσης σύστασης σώματος

Ανασκοπήσεις των μεθόδων *in vivo* ανάλυσης της σύστασης του σώματος έχουν δημοσιευτεί από διάφορους ερευνητές, όπως ο Sutcliffe [Sutcliffe J.F. 1996], ο Ellis [Ellis K.J. 2000] και οι Kehayias και συν. [Kehayias J.J. 2002]. Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για την ανάλυση σύστασης σώματος βασίζονται συνήθως σε φυσικές ιδιότητες του σώματος.

Για τη μέτρηση της λιπώδους και μη λιπώδους μάζας χρησιμοποιείται σε ορισμένες περιπτώσεις η υδροπυκνομετρία. Για τις δύο μάζες διαφορετικής πυκνότητας υπολογίζεται η αναλογία των μαζών, ζυγίζοντας το άτομο στον αέρα και κάτω από το νερό, και διορθώνοντας για τον αέρα στον πνεύμονα. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η δυσκολία στην εφαρμογή της σε ειδικές ομάδες εξεταζόμενων, καθώς απαιτείται η βύθιση όλου του σώματος κάτω από το νερό. Επιπλέον, η θεώρηση σταθερής πυκνότητας λιπώδους και μη λιπώδους μάζας σε ασθενείς και υγιείς μειώνει την ακρίβεια της μεθόδου. Μια άλλη τεχνική είναι η υπολογιστική τομογραφία κατά την οποία διαχωρίζονται τα όργανα και οι μαλακοί ιστοί και δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού των μαζών των επιμέρους τμημάτων. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι κυρίως η μεγάλη ενεργή δόση. Η μέθοδος του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (Magnetic Resonance Imaging, MRI) αναπτύχθηκε παράλληλα με την υπολογιστική τομογραφία ως εναλλακτική κυρίως για την απεικόνιση ‘μαλακών’ ιστών. Στοιχεία που μετρώνται με αυτή τη μέθοδο είναι κυρίως το υδρογόνο (^1H)

και τα ^{13}C , ^{19}F , ^{23}Na , ^{31}P και ^{39}K . Αναλυτική περιγραφή της τεχνικής παρουσιάζεται από τους Kvist και συν, τους Van der Kooy και συν και Smith και συν [Kvist H. 1988, Van Der Kooy K. 1993, Smith S. 1999]. Το πλεονέκτημα της μεθόδου έναντι της υπολογιστικής τομογραφίας είναι η χρήση μη ιοντιζουσών ακτινοβολιών και εφαρμόζεται όπου απαιτείται επαναλαμβανόμενη απεικόνιση προς αποφυγή της υπερέκθεσης στην ιοντίζουσα ακτινοβολία, αλλά μειονεκτεί κυρίως ως προς το οικονομικό κόστος.

Για τη μέτρηση της συνολικής σκελετικής μάζας του σώματος χρησιμοποιείται η τεχνική της διαφορετικής εξασθένησης δύο δεσμών ακτίνων- γ ή X διαφορετικής ενέργειας (Dual-energy x-ray absorptiometry, DXA) μέσα από τα οστά και τους 'μαλακούς' ιστούς. Η συνολική μάζα των 'μαλακών' ιστών του σώματος και η οστική μάζα υπολογίζονται βάση της πυκνότητας των οστών και των σκελετικών μυών. Για το διαχωρισμό του λίπους από τους άπαχους ιστούς, μελετάται η εξασθένηση των ακτίνων-X μέσω των 'μαλακών' ιστών, όπου δεν παρεμβάλλεται οστίτης ιστός, και η ακρίβεια μέτρησης είναι καλύτερη από προηγούμενες τεχνικές [Sutcliffe J.F. 1996]. Η μέθοδος αυτή θεωρείται ως η καλύτερη από αυτές που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή κλινική πράξη δεδομένου ότι, εκτός των άλλων, είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη και απαιτεί ιδιαίτερα χαμηλή ακτινική επιβάρυνση (ενεργή δόση για ολόσωμη ανάλυση $\sim 1 \mu\text{Sv}$). Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία διαχωρισμού μεταξύ πρωτεΐνης και νερού στους μαλακούς ιστούς. Κάτι τέτοιο θεωρητικά επιτυγχάνεται με τη χρήση δεσμών ακτίνων-X τριών διαφορετικών ενεργειών (Triple-energy x-ray absorptiometry, TEXA). Διάφορες όμως μελέτες έδειξαν ότι η τεχνική δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε κλινικές συνθήκες.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι που υπάρχουν για την ανάλυση της σύστασης σώματος είναι η ανάλυση ιστών με ηλεκτρική εμπέδηση (Bioelectrical impedance analysis, BIA) και η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή (Electromagnetic Induction). Τμήματα του ανθρώπινου σώματος που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε νερό παρουσιάζουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαιτίας των ηλεκτρολυτών που περιέχουν, ενώ το λίπος και τα οστά παρουσιάζουν υψηλή ηλεκτρική εμπέδηση. Μετρώντας την ηλεκτρική εμπέδηση ιστών του σώματος διαχωρίζονται οι 'μαλακοί' ιστοί από το λίπος και τα οστά. Η τεχνική αυτή είναι μη επεμβατική, χαμηλής επικινδυνότητας για τους εξεταζόμενους, δίνει άμεσα αποτελέσματα και χρησιμοποιείται συχνά στην ιατρική πράξη [Settle R.G. 1980, Lukaski H.C. 1985], όμως έχουν βρεθεί σημαντικά σφάλματα κυρίως κατά την ανάλυση του σώματος ασθενών με ορισμένα νοσήματα, π.χ. ασκίτη, β -μεσογειακή αναιμία [Kalef-Ezra J. 2000]. Η ηλεκτρομαγνητική

επαγωγή είναι επίσης μια γρήγορη, ασφαλής και μη επεμβατική τεχνική για τη μέτρηση της περιεκτικότητας του σώματος σε νερό. Η τεχνική στηρίζεται σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που επάγει μεταβαλλόμενο ρεύμα σε αγωγίμα υλικά, όπως είναι το σώμα. Το μεταβαλλόμενο ρεύμα επιφέρει μεταβολή στην επαγωγική εμπέδηση του πηνίου που παρήγαγε το αρχικό μαγνητικό πεδίο. Από τη μεταβολή στην επαγωγική εμπέδηση υπολογίζεται η συνολική ποσότητα νερού στο σώμα και η μη λιπώδης μάζα [Harker W. 1973].

Το κάλιο είναι ένα στοιχείο του σώματος που περιέχει φυσικό ραδιενεργό ισότοπο, το ^{40}K , σε ποσοστό 0.011% επί του φυσικού στοιχείου και μεγάλο χρόνο ημιζωής (1.277×10^9 years). Η γ ακτινοβολία- γ που εκπέμπει ενέργειας 1.46 MeV ανιχνεύεται έξω από το σώμα συνήθως με ανιχνευτές σπινθηρισμών. Οι ανιχνευτές θωρακίζονται έναντι της κοσμικής ακτινοβολίας και της ενδεχόμενης ακτινοβολίας χώρου. Η συνολική ποσότητα καλίου στο ανθρώπινο σώμα θεωρείται ότι βρίσκεται σε σταθερή αναλογία στη μη λιπώδη μάζα (fat free mass) για υγιείς ενήλικες (69.4 mmol/kg). Επομένως, μέτρηση του συνολικού καλίου στο σώμα επιτρέπει τον προσδιορισμό της μη λιπώδους μάζας του σώματος [Pallada S. 2012, Flynn M.A. 1989, Morita N. 2007].

Η δυνατότητα για ταυτόχρονη πολύ-στοιχειακή ανάλυση της σύστασης του σώματος δόθηκε με την ανάπτυξη της μεθόδου της Ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση (Neutron Activation Analysis, NAA) [Cohn S.H. 1979, 1982]. Πρόκειται για την ανίχνευση της ακτινοβολίας- γ που εκπέμπεται με τη σύλληψη νετρονίου από τον πυρήνα-στόχο. Η ακτινοβολία εκπέμπεται είτε άμεσα με την αποδιέγερση των πυρήνων, είτε έμμεσα από τους πυρήνες που παραμένουν ραδιενεργοί μετά την ακτινοβόληση. Με την τεχνική της άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση (Prompt Gamma Neutron Activation Analysis, PGNAA) προσδιορίζεται η συνολική ποσότητα αζώτου, χλωρίου, ασβεστίου, υδρογόνου, καδμίου κ.α. στο σώμα. Με την ανίχνευση των 'καθυστερημένων' ακτίνων- γ (Delayed Gamma Neutron Activation Analysis, DGNAA) έχει μετρηθεί, μεταξύ άλλων, η ποσότητα ασβεστίου, φωσφόρου, νατρίου και χλωρίου στον άνθρωπο [Cohn S.H. 1971, McNeill K.G. 1987, Kalef-Ezra J. 1994, 1997].

2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ

2.2.1 Αλληλεπίδραση νετρονίων με βιολογικούς ιστούς

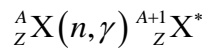
Τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη και τους πυρήνες των ατόμων της ύλης με ποικίλους τρόπους. Κάθε αλληλεπίδραση εντάσσεται σε έναν από τους τρεις κύριους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης: τη δημιουργία σύνθετου πυρήνα, κατά την οποία το νετρόνιο απορροφάται από τον πυρήνα και δημιουργείται ένας σύνθετος πυρήνας, την ελαστική σκέδαση, κατά την οποία το νετρόνιο ανεξάρτητα από την ενέργειά του αλληλεπιδρά με τον πυρήνα ή με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του πυρήνα χωρίς ο πυρήνας να επηρεάζεται και την απευθείας αλληλεπίδραση για υψηλής ενέργειας νετρόνια, η οποία έχει ως αποτέλεσμα είτε την πλήρη απορρόφηση του νετρονίου και την εκπομπή ενός πρωτονίου από τον πυρήνα του ατόμου, είτε την εκπομπή ενός νετρονίου με μικρότερη ενέργεια αφήνοντας τον πυρήνα σε διεγερμένη κατάσταση.

Η αλληλεπίδραση των νετρονίων με την ύλη εξαρτάται έντονα από την ενέργεια των νετρονίων και από το υλικό του μέσου αλληλεπίδρασης. Τα θερμικά νετρόνια – νετρόνια που έχουν ενέργεια μικρότερη από 0.5 eV και πιθανότερη ενέργεια περίπου 0.025 eV σε θερμοκρασία υλικού 20°C – αλληλεπιδρούν μέσω ελαστικών σκεδάσεων με τους πυρήνες του υλικού και μέσω αντιδράσεων απορρόφησης. Τέτοιες αντιδράσεις είναι κυρίως τύπου (n, α), (n, p), (n, fission), (n, γ) και μαζί με τις ελαστικές σκεδάσεις είναι οι πιο σημαντικές αλληλεπιδράσεις νετρονίων με ιστούς [Auxier J.A. 1969]. Για τα νετρόνια μεγαλύτερης ενέργειας, η πιθανότητα αλληλεπίδρασης μέσω σκέδασης αυξάνεται. Το υδρογόνο είναι το στοιχείο για το οποίο τα νετρόνια με ελαστική σκέδαση έχουν μεγάλη πιθανότητα να χάσουν ολόκληρη την κινητική τους ενέργεια. Αν η ενέργεια των νετρονίων είναι υψηλότερη από την πρώτη στάθμη διέγερσης του πυρήνα στόχου, τα νετρόνια μπορούν να αλληλεπιδρούν μέσω ανελαστικών σκεδάσεων (n, n'γ) και χάνουν ακόμη μεγαλύτερη ενέργεια. Τα νετρόνια των οποίων η κινητική ενέργεια μειώνεται μέσω σκεδάσεων τόσο ώστε να γίνουν θερμικά, εύκολα απορροφώνται από τους πυρήνες του υλικού.

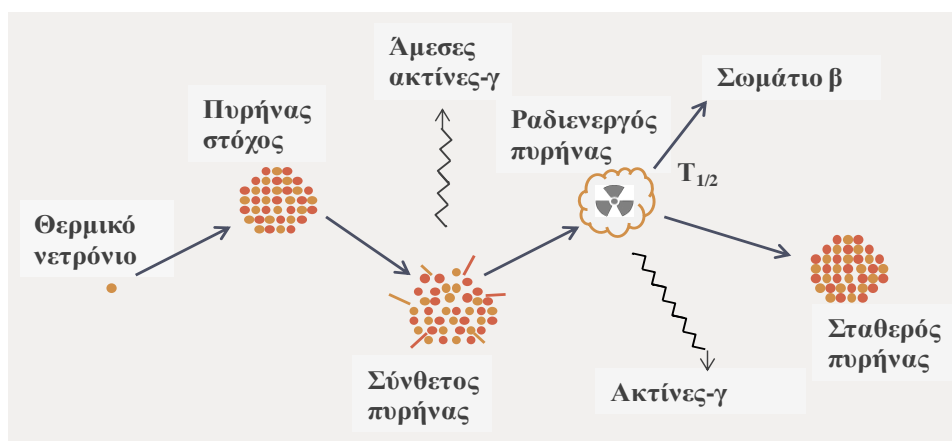
Για υλικά με στοιχεία χαμηλού ατομικού αριθμού, Z, (π.χ. O, C, H, N) τα νετρόνια με ενέργεια στη θερμική περιοχή αλληλεπιδρούν κυρίως με αντιδράσεις σύλληψης, ενώ για νετρόνια μεγαλύτερης ενέργειας και μέχρι την ενέργεια των 3 MeV περισσότερο σημαντικές είναι συνήθως οι ελαστικές σκεδάσεις. Για νετρόνια ακόμη μεγαλύτερης ενέργειας (10 – 14 MeV) η ανελαστική σκέδαση γίνεται αρκετά σημαντική.

2.2.2 Φυσική αρχή της ANE

Κατά την ακτινοβόληση ενός υλικού με νετρόνια, αυτά αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες τους υλικού και με συνεχείς ελαστικές και ανελαστικές σκεδάσεις μειώνεται η ενέργειά τους μέχρι τη θερμική περιοχή ενεργειών των νετρονίων. Ένα θερμικό νετρόνιο έχει πολύ μεγάλη πιθανότητα να απορροφηθεί από έναν πυρήνα - στόχο. Η πυρηνική αντίδραση που αξιοποιείται στην ANE είναι η σύλληψη θερμικών νετρονίων:



Η αλληλουχία γεγονότων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια αυτής της πυρηνικής αντίδρασης φαίνεται στο σχέδιο της Εικόνας 2-2. Ο πυρήνας που σχηματίζεται με τη σύλληψη νετρονίου, έχει ενέργεια διέγερσης ίση με την ενέργεια σύνδεσης του προστιθέμενου νετρονίου. Η επιπλέον ενέργεια του πυρήνα αποβάλλεται με την εκπομπή μιας ή περισσότερων άμεσων ακτίνων-γ (prompt gamma rays), σε χρόνο εκπομπής μικρότερο από 10^{-14} s. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο πυρήνας που προκύπτει είναι ραδιενεργός και εκπέμπει, σε καθυστερημένο χρόνο, β^- σωμάτια και χαρακτηριστικές ακτίνες-γ. Ο χρόνος εκπομπής τους κυμαίνεται συνήθως από κλάσματα του δευτερολέπτου μέχρι αρκετά χρόνια (delayed gamma rays). Οι άμεσες και καθυστερημένες ακτίνες-γ είναι χαρακτηριστικές για τον πυρήνα – στόχο, ανιχνεύονται με ειδικές διατάξεις και δίνουν πληροφορίες για τους πυρήνες των στοιχείων από όπου προήλθαν.



Εικόνα 2-2 Σχηματική αναπαράσταση εκπομπής άμεσων και καθυστερημένων ακτίνων γ από τη σύλληψη νετρονίου από πυρήνα – στόχο.

Βασιζόμενοι στο χρόνο εκπομπής των μετρούμενων ακτίνων-γ, διακρίνουμε δύο ανεξάρτητες τεχνικές ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση. Η πρώτη τεχνική χρησιμοποιεί τις άμεσα εκπεμπόμενες ακτίνες-γ (άμεση ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση AANE, prompt gamma neutron activation analysis, ή PGNAA) και η ανίχνευση γίνεται ταυτόχρονα με την ακτινοβολήση. Η δεύτερη τεχνική χρησιμοποιεί τις καθυστερημένες ακτίνες-γ (ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση με καθυστερημένες ακτίνες-γ, delayed gamma neutron activation analysis, DGNAA) και η ανίχνευση γίνεται μετά το τέλος της ακτινοβολήσης.

Η Ανάλυση με Νετρονική Ενεργοποίηση (ANE) είναι μια αναλυτική πυρηνική τεχνική για πολύ-στοιχειακή ανάλυση δειγμάτων διαφορετικού όγκου και σύστασης. Η τεχνική μέτρησης είναι μη-επεμβατική για τον άνθρωπο και μη-καταστροφική για τα δείγματα, παρέχοντας τη δυνατότητα διαδοχικών μετρήσεων του ίδιου δείγματος σε αντίθεση με χημικές μεθόδους οι οποίες απαιτούν επεξεργασία (καύση, πολτοποίηση) του δείγματος και κατ' επέκταση καταστροφή του. Έχει υψηλή ευαισθησία μέτρησης, καλή ακρίβεια και στο σύνολό της είναι απλή. Χρησιμοποιείται για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό στοιχείων τόσο σε βιολογικά δείγματα, όπως σε ανθρώπους, ζώα, βιολογικούς ιστούς και βιολογικά υγρά, όσο και σε βιομηχανικά ή βιομηχανοποιημένα δείγματα διαφόρου σύστασης, όπως γεωλογικά, περιβαλλοντικά κλπ. Η ANE γενικά αναγνωρίζεται ως 'μέθοδος αναφοράς' όταν αναπτύσσονται καινούριες μέθοδοι ανάλυσης ή όταν αποτελέσματα άλλων μεθόδων ανάλυσης διαφέρουν μεταξύ τους.

2.3 ΑΜΕΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ (AANE)

2.3.1 Η μέθοδος της AANE

Η μέθοδος της AANE (PGAA) βασίζεται στην ανίχνευση των άμεσων ακτίνων-γ (prompt gamma rays) που εκπέμπονται από τον πυρήνα μετά τη σύλληψη θερμικού νετρονίου από αυτόν. Οι πυρήνες που σχηματίζονται με τη σύλληψη νετρονίου έχουν ενέργεια διέγερσης ίση με την ενέργεια σύνδεσης του προστιθέμενου νετρονίου και αποδιεγείρονται με την εκπομπή άμεσων ακτίνων-γ. Οι ενέργειες των ακτίνων-γ που εκπέμπονται κυμαίνονται από 100 keV μέχρι 11 MeV περίπου και είναι χαρακτηριστικές του στοιχείου που τις εξέπεμψε. Με την ανίχνευσή τους γίνεται ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των χημικών στοιχείων του ακτινοβολούμενου δείγματος.

Τα βασικά στοιχεία μιας διάταξης άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση είναι μία πηγή νετρονίων για την ακτινοβόληση του δείγματος και ένα σύστημα ανίχνευσης ακτίνων-γ.

2.3.1.1 Πηγές νετρονίων

Για την άμεση ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση (AANE) χρησιμοποιούνται νετρόνια που προέρχονται από πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης, γεννήτριες νετρονίων ή ισοτοπικές πηγές.

Το πλεονέκτημα της χρήσης αντιδραστήρων σχάσης είναι η μεγάλη ροή θερμικών νετρονίων σε σύγκριση με τις ισοτοπικές πηγές νετρονίων και κατά συνέπεια η υψηλή ευαισθησία μέτρησης για τα περισσότερα στοιχεία. Επιπλέον, διαφορετικές θέσεις στον πυρήνα του αντιδραστήρα με διαφορετικούς θερμοποιητές παρέχουν τη δυνατότητα διαφορετικής ενεργειακής κατανομής και ροής νετρονίων στην έξοδο δέσμης. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα είναι η διαθεσιμότητα αντιδραστήρα σχάσης, κυρίως εξαιτίας του υψηλού κόστους εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας. Επιπρόσθετος περιορισμός υπάρχει για την περίπτωση ακτινοβόλησης σε αντιδραστήρα δειγμάτων επικίνδυνων να εκραγούν ή δειγμάτων ευαίσθητων στο ενδεχόμενο υπερέκθεσης στην ακτινοβολία.

Στις γεννήτριες νετρονίων, η παραγωγή νετρονίων βασίζεται στην επιτάχυνση πρωτονίων ή δευτερονίων και την πρόσπτωσή τους σε στόχο από υλικό χαμηλού ατομικού αριθμού Z. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες γεννήτριες βασίζονται στις αντιδράσεις:

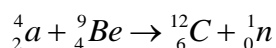


Με τις γεννήτριες D-D επιτυγχάνεται συνήθως ικανοποιητική ροή νετρονίων της τάξης του 10^9 n/s και 10^{11} n/s για τη γεννήτρια D-T [Knoll G.F. 1999]. Επιπλέον, ο χρόνος ακτινοβόλησης είναι μικρός σε σύγκριση με τους χρόνους που απαιτούνται με τη χρήση ισοτοπικών πηγών και η δέσμη νετρονίων είναι σχεδόν μονοενεργειακή και μεγάλης ενέργειας (3 MeV, 14 MeV αντίστοιχα για τις δύο γεννήτριες) ώστε να είναι διεισδυτική σε δείγματα μεγάλου όγκου (της τάξης των μερικών λίτρων). Το κόστος των γεννητριών νετρονίων έχει μειωθεί σε σύγκριση με παλαιότερα κι ένας αυξανόμενος αριθμός εργαστηρίων τις χρησιμοποιεί κυρίως λόγω: (α) της υψηλότερης ενέργειας νετρονίων,

γεγονός που επιτρέπει ανάλυση μέσω ανελαστικών σκεδάσεων π.χ. C, O, (β) της μη συνεχούς εκπομπής ακτινοβολίας, άρα εύκολη μεταφορά, χρήση και εύκολου παροπλισμού της διάταξης δεδομένου ότι συνήθως το μόνο κατάλοιπο που δημιουργείται είναι το τρίτιο στο στόχο.

Μια διάταξη AANE που χρησιμοποιεί κύκλοτρο στην παραγωγή νετρονίων για τη μέτρηση αζώτου σε ανθρώπους, είχε αναπτυχθεί από τους Biggin και συν. στο Πανεπιστήμιο του Birmingham [Biggin H.C. 1972]. Βασική αρχή είναι η επιτάχυνση πρωτονίων σε ενέργεια ~ 10 MeV και ο βομβαρδισμός στόχου λιθίου. Τα νετρόνια που παράγονται σε γωνία 90° έχουν κινητική ενέργεια μέχρι 6 MeV και κατευθύνονται με συνδιασμό κατευθυντήρων προς το ακτινοβολούμενο δείγμα.

Στην πράξη οι πηγές νετρονίων που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι η ισοτοπική πηγή αυθόρμητης σχάσης ^{252}Cf και οι ισοτοπικές πηγές τύπου (α, n), όπως $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$, $^{239}\text{Pu}-^9\text{Be}$, $^{226}\text{Ra}-^9\text{Be}$, $^{210}\text{Po}-^9\text{Be}$, $^{242}\text{Cm}-^9\text{Be}$. Οι πηγές αυθόρμητης σχάσης εκπέμπουν ικανοποιητικό αριθμό ταχέων νετρονίων, αλλά και ένα πλήθος ακτίνων-γ που προέρχονται από τη σχάση των βαρέων πυρήνων κι από την αποδιέγερση των προϊόντων σχάσης. Η πλέον χρησιμοποιούμενη πηγή είναι το ^{252}Cf [Ryde S.J.S. 1987, Allen B.J., Krishnan S.S. 1990, Baur L.A. 1991] και το ποσοστό των νετρονίων που εκπέμπονται είναι 0.116 n/s/Bq. Ο χρόνος ημιζωής του ^{252}Cf είναι σχετικά μικρός (2.65 y) και η πηγή, που είναι υψηλού κόστους, χρειάζεται αντικατάσταση μετά από μερικά έτη. Ως εκ τούτου, ως πηγές νετρονίων χρησιμοποιούνται πολύ συχνά οι ραδιοϊσοτοπικές πηγές τύπου (α, n). Πρόκειται για μια ανάμιξη ενός ισοτόπου-εκπομπού σωματιδίων α με υλικό κατάλληλο για αντίδραση (α, n). Συνήθως χρησιμοποιείται ως στόχος ^9Be και η αντίδρασή του με τα σωματίδια α είναι η εξής:



Τα ισότοπα που χρησιμοποιούνται κυρίως σε τέτοιες πηγές είναι η σειρά των ακτινιδων στοιχείων όπως ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^{210}Po , ^{241}Am , ^{244}Cm και ^{242}Cm και η επιλογή τους εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα, το κόστος και το χρόνο ημιζωής. Τα ισότοπα που έχουν την υψηλότερη ροή νετρονίων είναι το ^{241}Am και το ^{238}Pu [Knoll G.F. 1999]. Αυτό, όμως, που έχει πολύ μεγάλο χρόνο ημιζωής (24000 y) είναι το ^{239}Pu , αλλά η χρήση του απαγορεύεται αυστηρά από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP ή IAEA) για λόγους ασφάλειας. Η

ισοτοπική πηγή που χρησιμοποιείται περισσότερο στις διατάξεις AANE είναι η πηγή ^{241}Am - ^9Be . Το κυριότερο πλεονέκτημα των εν λόγω ισοτοπικών πηγών είναι ότι είναι εύχρηστες, έχουν μεγάλο χρόνο ημιζωής και μηδενικό κόστος χρήσης, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν σε χώρους όπως νοσοκομεία και κλινικές. Μειονέκτημά τους αποτελεί το γεγονός ότι κατά τη διάσπαση-α παράγεται ήλιο και η σταδιακή πίεση εντός του κελύφους της πηγής μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του. Διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιούν ραδιοϊσοτοπικές πηγές νετρονίων τύπου (α,n) έχουν αναπτυχθεί σε πολλά εργαστήρια στον κόσμο για *in vivo* μετρήσεις σε ανθρώπους και πειραματόζωα [Mernagh J.R. 1977, Vartsky D. 1979b, Beddoe A.H. 1984a, b, Dilmanian F.A. 1998].

2.3.1.2 Διατάξεις ανίχνευσης άμεσων ακτίνων-γ

Βασικό πρόβλημα στις διατάξεις άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση είναι η επιλογή του κατάλληλου ανιχνευτή ακτινοβολίας-γ. Ως βασική αρχή, η επιλογή του ανιχνευτή είναι συνάρτηση των μετρούμενων στοιχείων σώματος και της γεωμετρίας πηγή-δείγμα-ανιχνευτής. Κατ' επέκταση, η επιλογή ανιχνευτή εξαρτάται από την εκπεμπόμενη ενέργεια, την απόδοση του ανιχνευτή σε αυτή την ενέργεια και το υπόβαθρο μέτρησης.

Η ανίχνευση των άμεσων ακτίνων-γ γίνεται ταυτόχρονα με την ακτινοβόληση του δείγματος, εξαιτίας του μικρού χρόνου εκπομπής τους, και ως επακόλουθο το υπόβαθρο μέτρησης είναι ιδιαιτέρως αυξημένο. Αυτό επιβάλλει προσεκτικό σχεδιασμό της διάταξης (π.χ. μεγάλη απόσταση δείγματος – ανιχνευτή, κατάλληλη θωράκιση πηγής και ανιχνευτή). Επιπλέον κριτήρια επιλογής ανιχνευτή είναι η χαμηλή ευαισθησία του ανιχνευτή στην ακτινοβόληση από νετρόνια, το κόστος αγοράς του και η διαθεσιμότητά του.

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στη πράξη για *in vivo* αναλύσεις σώματος είναι:

- ο ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe), ο οποίος έχει υψηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα και παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης πολύ-στοιχειακής ανάλυσης με μία μέτρηση, αλλά παρουσιάζει χαμηλή απόδοση, είναι ευαίσθητος στην ακτινοβόληση από νετρόνια. Ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου έχουν χρησιμοποιηθεί εκτός των άλλων για την ανίχνευση των ακτίνων-γ του ασβεστίου [Evans C.J. 1994], του χλωρίου [Beddoe A.H. 1987], του καδμίου [Vartsky D. 1976].

- ο σπινθηριστής ιωδιούχου νατρίου (NaI(Tl)), ο οποίος έχει υψηλή απόδοση ανίχνευσης και έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην ανίχνευση άμεσων ακτίνων-γ του αζώτου [Mernagh J.R. 1977, Ryde S.J.S. 1989, Baur L.A. 1991].
- ο σπινθηριστής BiGeO, ο οποίος έχει καλύτερη απόδοση από το NaI(Tl) στην ανίχνευση του αζώτου, όσον αφορά ανιχνευτές μικρών διαστάσεων, αλλά χειρότερη διακριτική ικανότητα. Ανιχνευτής BiGeO έχει χρησιμοποιηθεί π.χ. σε διάταξη AANE στην Αυστραλία για τη μέτρηση του χλωρίου του σώματος [Blagojevic N. 1990]. Ωστόσο, δεν κατέστη δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση αζώτου, λόγω παρασιτικής κορυφής στα 10.2 MeV που παρεμβάλεται στην κορυφή του αζώτου [Stamatelatos I.E. 1993].
- ο σπινθηριστής BaF₂, ο οποίος έχει καλύτερη απόδοση από το NaI(Tl) αλλά χειρότερη διακριτική ικανότητα και μεγαλύτερο κόστος αγοράς.

2.3.2 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές της μεθόδου της AANE

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ανάλυσης με την AANE είναι ότι πρόκειται για μια μη-καταστροφική τεχνική, η οποία επιτρέπει την ποιοτική και ποσοτική ταυτόχρονη πολύ-στοιχειακή ανάλυση δειγμάτων χωρίς ιδιαίτερη προετοιμασία τους και επομένως χωρίς τον κίνδυνο μόλυνσης του δείγματος. Η χρήση αυτής της μεθόδου επιβάλλεται σε περιπτώσεις όπου η ανάλυση με την κλασική μέθοδο της ANE είναι αδύνατη, για λόγους όπως:

- οι ραδιενεργοί πυρήνες αποδιεγείρονται σε πολύ μικρό χρόνο και γι' αυτό είναι δύσκολο να μετρηθούν με τη μέθοδο της DGNAΑ,
- στοιχεία των οποίων τα ισότοπα, μετά τη σύλληψη νετρονίων, μετατρέπονται σε σταθερά ή σε ισότοπα με μεγάλο χρόνο ημιζωής,
- στοιχεία των οποίων οι ενεργοποιημένοι πυρήνες εκπέμπουν ασθενούς έντασης 'καθυστερημένες' ακτίνες-γ.

Μερικά παραδείγματα εφαρμογών της τεχνικής είναι η μέτρηση των στοιχείων:

- B, Ca, Cd, Cl, Co, Cu, H, Hg, , In, K, Li, N, Na και P σε βιολογικά δείγματα
- σπάνιων γαιών (εκτός από τα Ce και Pm) σε ορυκτά και πετρώματα
- B, Cd, In, Hg, Mn, Fe, Co, Ni, S, και Cu σε γεωλογικά δείγματα και περιβαλλοντικά υλικά και σε φαρμακευτικά σκευάσματα
- Fe, Cr, Ni, Mn, και B σε δείγματα από ανοξείδωτο χάλυβα και σίδηρο-μεταλλεύματα

- Fe, Si, Al σε γαιάνθρακες και βράχους [Borsaru M. 2003]
- Ca, Si, Cl, Al and H σε ογκώδη τεμάχια σκυροδέματος για αρχιτεκτονικές κατασκευές [Stamatelatos I.E. 2007].

2.4 ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ MCNP4C2

Ο κώδικας MCNP4C2 είναι μια βελτιωμένη έκδοση του κώδικα MCNP. Πρόκειται για έναν γενικό κώδικα μεταφοράς νετρονίων, φωτονίων και ηλεκτρονίων, ο οποίος χρησιμοποιεί την τεχνική Monte Carlo [MCNP4C2 2001]. Ο κώδικας δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης τρισδιάστατων δομών με τη χρήση γεωμετρικών επιφανειών πρώτου και δευτέρου βαθμού που ορίζουν γεωμετρικές κυψέλες. Επιπλέον δίνει τη δυνατότητα ορισμού της ατομικής σύστασης και πυκνότητας για τα υλικά στις γεωμετρικές κυψέλες και την επιλογή της βάσης δεδομένων για τις ενεργές διατομές των αλληλεπιδράσεων. Για τα νετρόνια, λαμβάνονται υπόψη όλες οι πιθανές αλληλεπιδράσεις τους. Ειδικά για τα θερμικά νετρόνια λαμβάνεται υπόψη η ενέργεια σύνδεσης των ατόμων στο μόριο (S(α,b)). Για τα φωτόνια, ο κώδικας λαμβάνει υπόψη τις ελαστικές και ανελαστικές σκεδάσεις, την πιθανότητα φθορισμού που ακολουθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, τα κβάντα φωτονίων που ακολουθούν την απορρόφηση στη δίδυμη γένεση και την ακτινοβολία πέδησης. Οι βάσεις δεδομένων για τα νετρόνια καλύπτουν ένα εύρος ενεργειών 0 – 20 MeV και για τα φωτόνια και ηλεκτρόνια ενέργειες 1 keV - 1 GeV. Οι τιμές ενεργών διατομών αλληλεπίδρασης είναι σημειακές. Τέλος, δίνει τη δυνατότητα επιλογής των χαρακτηριστικών σημειακής ή επιφανειακής πηγής ακτινοβολίας και το είδος του εικονικού ανιχνευτή (tally), με δυνατότητα μείωσης της στατιστικής διακύμανσης των αποτελεσμάτων.

2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η ιδέα της *in vivo* ανάλυσης της σύστασης του σώματος με νετρονική ενεργοποίηση θεωρείται ότι ξεκίνησε το 1964 από τους Anderson και συν. [Anderson J. 1964] στο King's College Hospital του Λονδίνου. Τα κύρια στοιχεία του σώματος όπως Ca, N, Na, Cl, και P μετρήθηκαν για πρώτη φορά με μέτρηση της εκπεμπόμενης δευτερογενούς ακτινοβολίας έπειτα από ακτινοβόληση του σώματος με γεννήτρια νετρονίων τύπου D-T.

Οι Rundo και Bunce, το 1966, εφάρμοσαν μια τεχνική μέτρησης του συνολικού υδρογόνου του σώματος ανιχνεύοντας τις άμεσες ακτίνες-γ του υδρογόνου, μετά από ακτινοβόληση με

νετρόνια προερχόμενα από κοσμική ακτινοβολία. Ο Comar και οι συνεργάτες του, το 1968, ανέδειξαν τη δυνατότητα μέτρησης του χλωρίου και ασβεστίου στο ανθρώπινο πόδι από τις άμεσες ακτίνες-γ σύλληψης θερμικών νετρονίων χρησιμοποιώντας νετρόνια από πυρηνικό αντιδραστήρα σχάσης.

Από τους πρώτους που εφάρμοσε την τεχνική της ANE στο Πανεπιστήμιο του Birmingham, το 1968, ήταν ο M.J. Chamberlain καθώς μέτρησε *in vivo* τη συνολική ποσότητα ασβεστίου και νατρίου στο σώμα ανθρώπων [Chamberlain M.J. 1968a, 1968b, 1968c]. Η τεχνική αναπτύχθηκε και εξελίχθηκε από ομάδα ερευνητών: Harvey, Fremlin, Biggin, Morgan και Vartsky. Εφαρμόστηκε για την *in vivo* μέτρηση του αζώτου στο σώμα ανθρώπων [Harvey T.C. 1973], τη μέτρηση του καδμίου στο ήπαρ και τα νεφρά [Harvey T.C. 1975, Al-Haddad I.K. 1981], του υδραργύρου στα νεφρά [Smith J.R.H. 1982] και τη μέτρηση του ασβεστίου στα οστά [Ozbas E. 1976].

Η Ανάλυση με Νετρονική Ενεργοποίηση εφαρμόστηκε στο Πανεπιστήμιο της Γλασκόβης, στη Μεγάλη Βρετανία, για πρώτη φορά το 1968 από τους Boddy και συν. για την *in vivo* μέτρηση του ιωδίου στο θυρεοειδή αδένα [Boddy K. 1968]. Η τεχνική εξελίχθηκε για τη μέτρηση του φώσφορου στα οστά ανθρώπου και αργότερα με τη μέτρηση του ασβεστίου σε ολόκληρο το σκελετό [Boddy K. 1973, 1975]. Το 1978 η ομάδα του Boddy εφάρμοσαν την τεχνική ταυτόχρονης *in vivo* μέτρησης του ασβεστίου, του φωσφόρου, του νατρίου, του χλωρίου και του αζώτου σε ασθενείς, χρησιμοποιώντας ταχέα νετρόνια 14 MeV και μέτρησαν *in vivo* για πρώτη φορά σε ανθρώπους το συνολικό οξυγόνο του σώματος [Boddy K. 1978, Williams E.D. 1978].

Για πρώτη φορά η μέτρηση του ασβεστίου σε ανθρώπους έγινε από τους Cohn και Dombrowski το 1970 και την επόμενη χρονιά έδειξαν τη δυνατότητα της *in vivo* μέτρησης του νατρίου, του χλωρίου, του αζώτου και του φωσφόρου με νετρονική ενεργοποίηση [Cohn S.H. 1970, 1971]. Αργότερα παρουσίασαν τη δυνατότητα μέτρησης του μαγνησίου [Dombrowski C.S. 1973].

Στο Πανεπιστήμιο του McMaster, στο Οντάριο του Καναδά, ο D.R. Chettle και η ομάδα του ανέπτυξαν μια διάταξη άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση βασισμένη σε πηγή $^{238}\text{Pu-Be}$ [Fedorowicz R.P. 1993]. Το 1998 μαζί με την McNeill μέτρησαν το κάδμιο στα νεφρά [McNeill F.E. 1998] και αργότερα, το 2005, βελτίωσαν την τεχνική τους μειώνοντας το όριο ανίχνευσης του καδμίου στα νεφρά και το ήπαρ [Grinyer J. 2005]. Παράλληλα,

ανέπτυξαν τεχνική με τη διάταξη ανάλυσης ‘καθυστερημένων’ ακτίνων με νετρονική ενεργοποίηση για τη μέτρηση του μαγγανίου στο ήπαρ και στα οστά άνω άκρων ανθρώπων χρησιμοποιώντας δέσμη νετρονίων από επιταχυντή [Arnold M.L. 1999, 2002, Grafe J.L. 2011].

2.5.1 *In vivo* μετρήσεις αζώτου με την τεχνική της PGNA

Η *in vivo* μέτρηση του συνολικού αζώτου στο ανθρώπινο σώμα είναι εξαιρετικά σημαντική για διατροφικές, μεταβολικές και ιατρικές μελέτες σε άτομα υποσιτισμένα, με μεταβολικές διαταραχές ή καρκίνο. Σύμφωνα με την αναφορά 26 της ICRP (1973), στον μέσο άνθρωπο μάζας σώματος 70000 g, αντιστοιχούν 1800 g αζώτου, από τα οποία περίπου 770 g βρίσκονται σε σκελετικούς μυς, 300 g στον σκελετό, 190 g στους συνδετικούς ιστούς, 180 g στον εγκέφαλο, 160 g στο αίμα, 150 g στον λιπώδη ιστό, 120 g στο δέρμα, 51 g στο ήπαρ και μικρότερες ποσότητες σε άλλα όργανα ή ιστούς. Η μέτρηση αζώτου με τη μέθοδο της Ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση και καθυστερημένη μέτρηση των ακτίνων-γ αποδείχτηκε μή-ικανή, κυρίως εξαιτίας του υψηλού υποβάθρου μέτρησης και της ανομοιογενούς κατανομής των ταχέων νετρονίων στο σώμα.

Η ομάδα του Πανεπιστημίου του Birmingham έδειξε ότι το άζωτο μπορεί να μετρηθεί με τη μέθοδο της άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση (AANE) μέσω της αντίδρασης $^{14}N(n, \gamma)^{15}N^*$ και χρησιμοποίησαν δέσμη νετρονίων από κύκλοτρο [Biggin H.C. 1972b, Ettinger K.V. 1975, Chettle D.R. 1982]. Το κύριο πρόβλημα ήταν το υψηλό υπόβαθρο μέτρησης, αλλά λύθηκε κατά ένα μέρος με χρήση παλμικής δέσμης νετρονίων και κατάλληλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων [Harvey T.C. 1973] και σχεδιάζοντας μεγαλύτερη θωράκιση τόσο της πηγής όσο και των ανιχνευτών. Μια άλλη διάταξη σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τους Stamatelatos και συν. χρησιμοποιώντας ισοτοπική πηγή νετρονίων με σκοπό τη μέτρηση του συνολικού αζώτου σώματος με μια διάταξη εύκολα μετακινούμενη και περισσότερο προσβάσιμη σε ασθενείς [Stamatelatos I.E. 1992].

Η τεχνική της AANE εφαρμόστηκε στο Πανεπιστήμιο του Toronto από τους Mernagh και συν. για τη μέτρηση του συνολικού αζώτου σε ανθρώπους [Mernagh J.R. 1977]. Οι ερευνητές απέδειξαν ότι ο λόγος ‘σήμα/υπόβαθρο’ μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας ‘βαριά’ θωράκιση σε πηγές και ανιχνευτές. Η διάταξη του Toronto βελτιώθηκε από τους Krishnan και συν. το 1990 οι οποίοι και πραγματοποίησαν μετρήσεις σε ανθρώπους [Krishnan S.S. 1990].

Η εφαρμογή της μεθόδου της AANE στο Εθνικό Εργαστήριο του Brookhaven των ΗΠΑ (Brookhaven National Laboratory) ξεκίνησε από τους Vartsky και συν. με σκοπό την *in vivo* μέτρηση του καδμίου στο ήπαρ και στα νεφρά ανθρώπων. Στη διάταξη χρησιμοποιήθηκε πηγή $^{238}\text{Pu-Be}$ και δύο ανιχνευτές γερμανίου. Τροποποίηση της διάταξης, με αλλαγή των ανιχνευτών και του κατευθυντήρα, έδωσε τη δυνατότητα μέτρησης του συνολικού αζώτου σε ανθρώπους. Η ακρίβεια μέτρησης, υπολογισμένη σε ομοίωμα Alderson, βρέθηκε $\pm 2\%$ και η επαναληψιμότητα $\pm 1.3\%$. Η συνολική δόση για δύο εκατέρωθεν ακτινοβολήσεις ήταν 45mrem [Vartsky D. 1976]. Η μέθοδος βαθμονόμησης αυτής της διάταξης και η διαδικασία μέτρησης δίνεται από τους Ellis και συν. [Ellis K.J. 1978]. Το 1979 οι Vartsky και συν. υπέδειξαν το υδρογόνο του σώματος ως στοιχείο αναφοράς για την *in vivo* μέτρηση του αζώτου με την τεχνική AANE τεχνική ώστε να συνυπολογιστεί η εξάρτηση από τις διαστάσεις σώματος [Vartsky D. 1979a]. Η ομάδα του Brookhaven ανέφερε μέτρηση του συνολικού αζώτου στο σώμα ανθρώπων *in vivo* με βραχύχρονη επαναληψιμότητα $\pm 3\%$ και δόση 26mrem [Vartsky D. 1979b]. Αργότερα μάλιστα βελτίωσαν την τεχνική μέτρησης του αζώτου, του υδρογόνου και του λίπους στο σώμα ανθρώπων, αυξάνοντας την ακρίβεια μέτρησης [Vartsky D. 1984], αναδεικνύοντας τη δυνατότητα εφαρμογής της τεχνικής σε ανθρώπους με διαταραγμένη μεταβολική δραστηριότητα. Τη δεκαετία του '90, η διάταξη επανασχεδιάστηκε και βαθμονομήθηκε από τους Stamatelatos και Dilmanian ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα μέτρησης αζώτου για διαφορετικές διαστάσεις σώματος και εισάγοντας D_2O ως επιβραδυντή-θερμοποιητή νετρονίων [Stamatelatos I.E. 1993, Dilmanian F.A. 1996].

Στο Πανεπιστήμιο του Auckland στη Νέα Ζηλανδία, η ομάδα του Beddoe εφάρμοσε την τεχνική της AANE για τη μέτρηση του αζώτου και του χλωρίου στο σώμα ασθενών [Beddoe A.H. 1984a, 1984b, 1987].

Στο Πανεπιστήμιο του Swansea, οι Ryde και Morgan σχεδίασαν και βαθμονόμησαν διάταξη ANE χρησιμοποιώντας ραδιοϊσοτοπική πηγή ^{252}Cf με σκοπό τη μέτρηση του συνολικού ασβεστίου, του καδμίου και του συνολικού αζώτου στο ανθρώπινο σώμα [Ryde S.J.S. 1987a, 1987b].

Άλλες ερευνητικές ομάδες που εφάρμοσαν την τεχνική της ANE είναι οι Allen B.J. και Blagojevic N. στην Αυστραλία [Pollock C.A. 1990], οι οποίοι μέτρησαν το άζωτο σε υγιείς

και ασθενείς ενήλικες, και οι Baur και Borovnicar, οι οποίοι διερεύνησαν τη δυνατότητα μέτρησης του αζώτου σε παιδιά [Baur L.A. 1991] και νεογέννητα [Borovnicar D.J. 1995].

2.5.2 Μετρήσεις *in vivo* σε μικρά ζώα

Συμπληρωματικά προς τις μετρήσεις σε ανθρώπους έχουν αναπτυχθεί και αντίστοιχες μέθοδοι *in vivo* ανάλυσης της σύστασης του σώματος πειραματόζωων. Τα μικρά πειραματόζωα προσφέρουν μεγάλους και ομογενείς πληθυσμούς δειγμάτων που επιτρέπουν την εξαγωγή στατιστικά σημαντικών πειραματικών συμπερασμάτων, σε αντίθεση με τον περιορισμένο αριθμό δειγμάτων ασθενών. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων, με αυτά επεμβατικών μεθόδων ανάλυσης όπως είναι οι χημικές μέθοδοι.

Η δυνατότητα μέτρησης αζώτου σε μικρά ζώα ξεκίνησε από τους Nagai και συν. το 1969 στο Εθνικό Ινστιτούτο Ραδιολογικών Επιστημών στην Ιαπωνία εφαρμόζοντας την τεχνική ‘ανίχνευσης ακτίνων-γ σε καθυστερημένο χρόνο’. Χρησιμοποίησαν νετρόνια 14 MeV από γεννήτρια τύπου D-T και μέτρησαν το συνολικό άζωτο και τη συνολική πρωτεΐνη στο σώμα μικρών ποντικών μέσω των φωτονίων ενέργειας 511 keV από την αντίδραση $^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$. [Nagai T. 1968].

Οι Biggin και Morgan χρησιμοποίησαν νετρόνια υψηλής ενέργειας (~ 0 - 37 MeV) από κύκλοτρο και μέτρησαν πρώτοι το συνολικό οξυγόνο και άνθρακα σε ποντίκια στο Πανεπιστήμιο του Birmingham. Ταυτόχρονα, με την ίδια ακτινοβολήση, μέτρησαν τη συνολική ποσότητα αζώτου, φωσφόρου και καλίου με αποτελέσματα συγκρίσιμα με αυτά της μεθόδου από νετρόνια ενέργειας 14 MeV και της χημικής μεθόδου Kjeldahl [Biggin H.C. 1971].

Το 1973 οι Shukla και Cohn [Shukla K.K. 1973] μέτρησαν το ασβέστιο σε μικρούς αρουραίους ακτινοβολώντας τους στον ερευνητικό αντιδραστήρα του Brookhaven. Οι αρουραίοι τοποθετούνταν σε κυλίνδρους από plexiglas και περιστρέφονταν τόσο κατά την ακτινοβολήση όσο και κατά τη διάρκεια της μέτρησης, με στόχο τη μείωση της επίδρασης της ανομοιογενούς κατανομής του ασβεστίου στη μέτρηση του ασβεστίου.

Το 1976 οι Boddy και συν. συνδύασαν δύο διαδοχικές ακτινοβολήσεις σε μικρούς αρουραίους [Boddy K. 1976]. Αρχικά ακτινοβόλησαν τους αρουραίους σε γεννήτρια νετρονίων 14 MeV και μέτρησαν το φώσφορο και το άζωτο. Στη συνέχεια, μέτρησαν το ασβέστιο και το νάτριο χρησιμοποιώντας νετρόνια από τον αντιδραστήρα σχάσης.

Μια διάταξη για ANE με την τεχνική ‘ανίχνευσης ακτίνων-γ σε καθυστερημένο χρόνο’ σχεδιάστηκε από τους Krishnan και συν. με σκοπό τη μέτρηση του ασβεστίου σε αρουραίους [Krishnan S.S. 1987].

Το συνολικό άζωτο σε αρουραίους μέτρησαν επίσης οι Preston και συν. το 1985 χρησιμοποιώντας γεννήτριες νετρονίων και νετρόνια 14.0 MeV με την κλασική μέθοδο της NAA [Preston T. 1985]. Το κύριο πρόβλημα της τεχνικής, όπως αναφέρεται, ήταν η παρεμβολή του οξυγόνου που περιέχεται κυρίως στο συνολικό νερό σώματος (TBW), στις πρωτεΐνες και στο λίπος, καθώς μετατρέπεται σε ^{13}N μέσω της αντίδρασης $^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$.

Η εφαρμογή της τεχνικής της άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση σε πειραματόζωα ξεκίνησε το 1987 με τους Wang και McNeill οι οποίοι επανασχεδίασαν τη διάταξη για ανθρώπους στο Τορόντο, ώστε να μετρήσουν το άζωτο σε ζώα μάζας 2-3 kg (π.χ. κουνέλια). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε δύο ισοτοπικές πηγές Pu-Be κάτω από το σώμα, παρέχοντας ροή νετρονίων $\sim 10^8$ n/s, μεγαλύτερη θωράκιση των ανιχνευτών (για μείωση του υποβάθρου, αφού το σήμα ήταν ασθενές) και έναν ανιχνευτή NaI(Tl) για την ανίχνευση των άμεσων ακτίνων-γ [Wang H. 1987]. Το στατιστικό σφάλμα μέτρησης του αζώτου ήταν 10% για ισοδύναμη δόση 0.3 mSv [McNeill K.G. 1988]. Επιπλέον, οι McNeill και συν. μέτρησαν το άζωτο *in vitro* σε βοδινό κρέας [McNeill K.G. 1987].

Ακολούθησαν το 1992 οι Ellis και συν. [Ellis K.J. 1992] με τη διάταξη Am-Be στο Houston του Τέξας, μετατρέποντας αντίστοιχη διάταξη άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση με σκοπό την *in vivo* μέτρηση αζώτου σε μικρούς χοίρους (μάζας 10-20 kg). Η μετατροπή της διάταξης περιλάμβανε απομάκρυνση της μιας από τις δύο πηγές Am-Be εκατέρωθεν του δείγματος και αφαίρεση μεγάλου μέρους της θωράκισής της. Με αυτόν τον τρόπο μείωσαν τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία προς τον ανιχνευτή με επακόλουθο τη μείωση του υποβάθρου μέτρησης στην ενεργειακή περιοχή του αζώτου.

Το 1995 οι Stamatelatos and Yasumura σχεδίασαν και κατασκεύασαν στο Εθνικό Εργαστήριο του Brookhaven μια διάταξη άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση για τη μέτρηση αζώτου στο σώμα μικρών ζώων. Η διάταξη περιλάμβανε πηγή ^{252}Cf , δύο ανιχνευτές NaI(Tl) και κατευθυντήρα από ‘βαρύ νερό’. Η διάταξη βαθμονομήθηκε για ζώα μάζας από 0.25 – 0.5 kg και χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση της επίδρασης χαμηλής σε λιπαρά διατροφής με αντίστοιχη υψηλής περιεκτικότητας σε λιπαρά στη συνολική πρωτεΐνη σώματος αρουραίων. Το στατιστικό σφάλμα μέτρησης ήταν 3.5% για ισοδύναμη δόση 50 mSv και το σφάλμα

μέτρησης αζώτου στο σώμα αρουραίων ήταν 6% [Stamatelatos I.E. 1995, 1996, Yasumura S. 1998].

Το πλήθος των εφαρμογών με την κλασική μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης και με την τεχνική ANE διαρκώς μεγαλώνει και η βελτιστοποίηση αντίστοιχων διατάξεων είναι επιτακτική και διαρκής ανάγκη. Προς αυτή την κατεύθυνση κινούνται και άλλα εργαστήρια σε όλο τον κόσμο και παρόμοιο σκοπό έχει και η παρούσα ερευνητική προσπάθεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

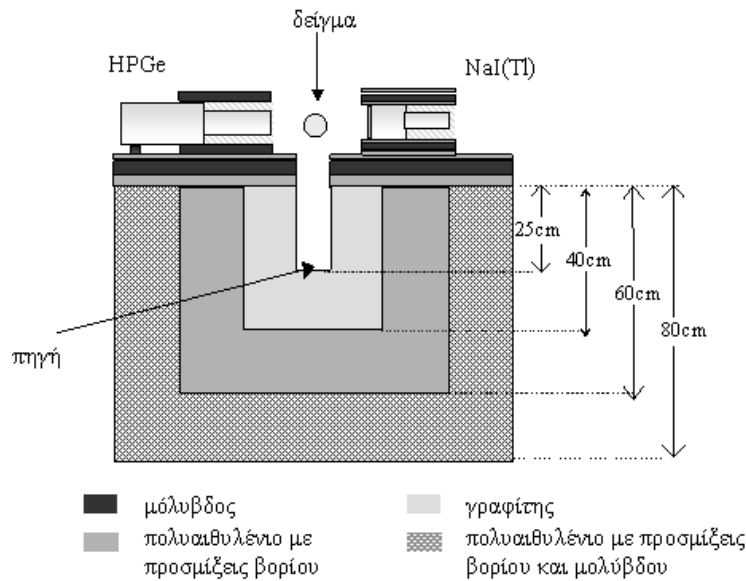
3.1 ΥΛΙΚΑ

3.1.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη για άμεση ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση (AANE) αποτελείται από μια πηγή νετρονίων, τη βιολογική της θωράκιση, έναν κατευθυντήρα δέσμης νετρονίων, δύο ανιχνευτές ακτινοβολίας γ με τη θωράκισή τους και ένα δειγματοφορέα. Φωτογραφία της διάταξης δίνεται στην Εικόνα 3-1. Σχηματική αναπαράσταση μιας κατακόρυφης τομής της διάταξης δίνεται στην Εικόνα 3-2.

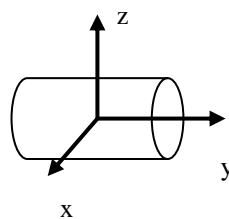


Εικόνα 3-1 Πειραματική διάταξη για άμεση ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση στο Εργαστήριο του Αντιδραστήρα, του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος».



Εικόνα 3-2 Κατακόρυφη τομή πειραματικής διάταξης για AANE στο επίπεδο z-x και στο σημείο y=0

Στην Εικόνα 3-3 δίνεται ο προσανατολισμός του δείγματος ως προς τους άξονες συντεταγμένων της διάταξης. Συγκεκριμένα, το κέντρο του δείγματος βρίσκεται στο σημείο (0,0,0), το επίπεδο x-y είναι παράλληλο με το άνοιγμα του κατευθυντήρα και ο άξονας z διέρχεται από το μέσον της πηγής. Επιπλέον, ο άξονας x είναι ταυτόχρονα ο κύριος άξονας του κυλινδρικού ανιχνευτή NaI(Tl).

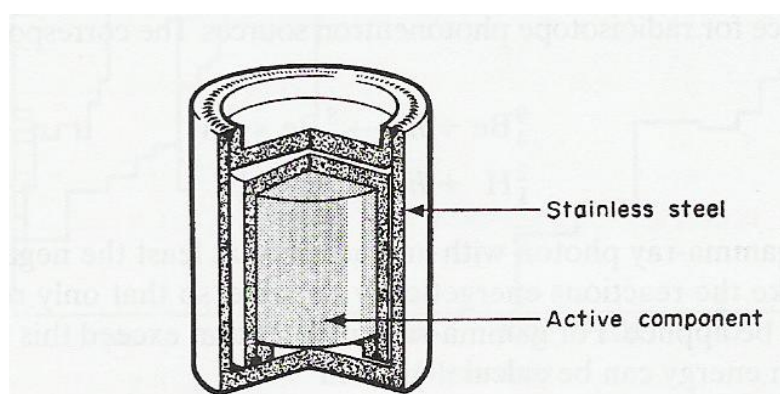


Εικόνα 3-3 Προσανατολισμός δείγματος ως προς τους άξονες συντεταγμένων της διάταξης

3.1.1.1 Πηγή ακτινοβολήσης

Η πηγή ακτινοβολήσης που χρησιμοποιείται στη διάταξη είναι μια ισοτοπική πηγή νετρονίων τύπου (α,n), ^{239}Pu -Be, με ενεργότητα του ^{239}Pu στις 01/07/1963 $1.85 \cdot 10^{11}$ Bq (5 Ci) και αριθμό εκπεμπόμενων νετρονίων ανά μονάδα χρόνου $9.46 \cdot 10^6$ n/s κατά την ημερομηνία

αναφοράς. Ο χρόνος ημιζωής του ^{239}Pu είναι 24131y και επιτρέπει τη θεώρηση του ρυθμού εκπομπής νετρονίων σταθερό κατά τη χρήση της πηγής. Η πηγή αποτελείται από μίγμα ^{239}Pu , Be, κλεισμένο σε διπλή κυλινδρική κάψουλα από ανοξείδωτο χάλυβα. Σχηματική αναπαράσταση της πηγής δίνεται στην Εικόνα 3-4. Οι εξωτερικές διαστάσεις της κάψουλας είναι: διάμετρος 44mm και μήκος 62mm.



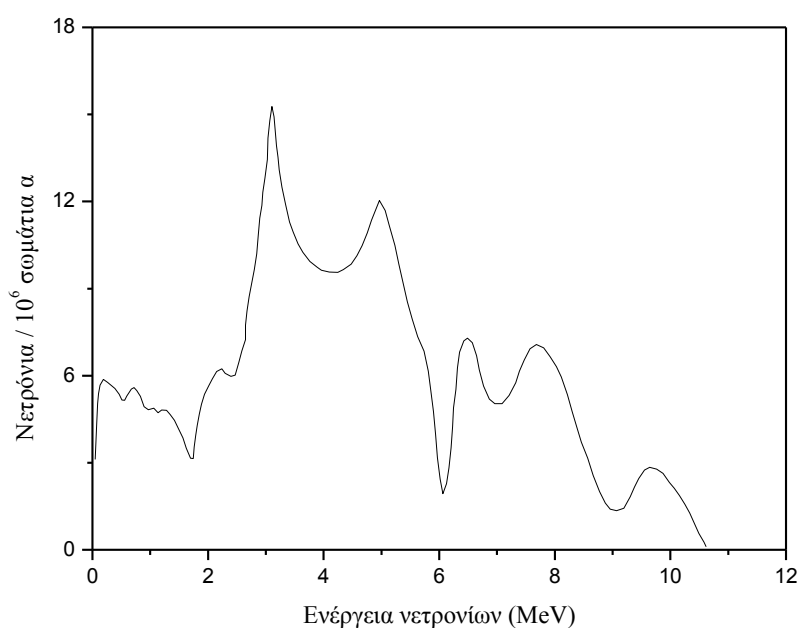
Εικόνα 3-4 Σχηματική αναπαράσταση κάψουλας εγκλεισμού πηγής $^{239}\text{Pu-Be}$

Το ^{239}Pu εκπέμπει σωμάτια α με πιθανότερη ενέργεια 5.155 MeV. Μέσω της αντίδρασης $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}^*$ εκπέμπονται νετρόνια με ενεργειακή κατανομή όπως δίνεται στο Σχήμα 3-1. Η μέση ενέργεια των νετρονίων που παράγονται είναι 4.6 MeV και το ποσοστό τους με ενέργεια μικρότερη των 1.5 MeV είναι περίπου 11% [Geiger K.W. 1980]. Η εκπομπή νετρονίων συνοδεύεται από εκπομπή γ ακτινοβολίας ενέργειας 4.4 MeV από την αποδιέγερση του $^{12}\text{C}^*$ (0.7 φωτόνια ανά νετρόνιο πηγής). Το ^{239}Pu εκπέμπει μια σειρά από ακτίνες-γ:

<i>keV</i>	<i>ποσοστό εκπομπής</i>
38.7	0.0105
51.6	0.0271
98.8	0.00122
116.3	0.000597
129.3	0.00631
203.5	0.000569

345.0	0.000556
375.0	0.00155
413.7	0.00147
645.9	0.0000152
658.9	0.0000097

και τις χαρακτηριστικές $K_{\alpha 1}$ (99keV, 103.5keV) [Handbook of Radioactivity Analysis 2012].



Σχήμα 3-1 Ενεργειακό φάσμα νετρονίων πηγής $^{239}\text{Pu-Be}$ [Knoll G.F. 1999]

3.1.1.2 Κατευθυντήρας δέσμης νετρονίων

Ο κατευθυντήρας νετρονίων έχει σκοπό την ανάκλαση της δέσμης νετρονίων προς το δείγμα. Είναι ορθογώνιος παραλληλεπίπεδος με εσωτερικό άνοιγμα 20 cm x 10 cm και επιλέχθηκε με στόχο την ακτινοβολήση δειγμάτων με μέγιστες διαστάσεις 20 cm x 10 cm. Το πάχος των φύλλων του είναι 10 cm, το μήκος του είναι 25.0 cm και το υλικό κατασκευής του είναι ο γραφίτης. Κάτω από την πηγή τοποθετήθηκε ορθογώνια παραλληλεπίπεδη πλάκα από γραφίτη, διαστάσεων 20 cm x 10 cm x 10 cm. Η τελική επιλογή του υλικού και διαστάσεων του κατευθυντήρα, καθώς και το πάχος της πλάκας του γραφίτη κάτω από την πηγή διαπραγματεύονται στην παράγραφο 4.1.3.

3.1.1.3 Βιολογική θωράκιση πηγής ακτινοβολήσης

Η θωράκιση της πηγής ακτινοβολήσης αποτελείται από πλάκες βοριομένου πολυαιθυλενίου, με ποσοστό βορίωσης 5%, πάχους 20 cm, σε ορθογώνια διάταξη γύρω από τον κατευθυντήρα δέσμης και κάτω από την πηγή. Επιπλέον πλάκες βοριομένου πολυαιθυλενίου, πάχους 20 cm, με προσθήκη διάσπαρτων σκαγιών μολύβδου έχουν τοποθετηθεί γύρω από το πρώτο επίπεδο θωράκισης. Πάνω από τη θωράκιση και στα όρια του ανοίγματος του κατευθυντήρα τοποθετήθηκαν ορθογώνιες παραλληλεπίπεδες πλάκες μολύβδου πάχους 5 cm και πλάκες βοριομένου πολυαιθυλενίου πάχους 20 cm, με σκοπό την εξασθένηση και απορρόφηση των νετρονίων και φωτονίων που κατευθύνονται προς τους ανιχνευτές. Οι εξωτερικές διαστάσεις της θωράκισης είναι: μήκος 120 cm, πλάτος 110 cm και ύψος 100 cm.

3.1.1.4 Ανιχνευτές γ ακτινοβολίας

Το σύστημα ανίχνευσης των άμεσων ακτίνων- γ αποτελείται από έναν σπινθηριστή NaI(Tl) (SCIONIX 102 B 102 / 3 – E2, Bunnik, Ολλανδίας) και έναν ανιχνευτή υπέρ-καθαρού γερμανίου ομοαξονικό p-τύπου (CANBERRA GC1020). Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών δίνονται στον Πίνακα 3-1. Ο ανιχνευτής NaI(Tl) θα χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση των άμεσων ακτίνων- γ από τη θερμική σύλληψη του αζώτου (10.828 MeV) και ο ανιχνευτής HPGe, σε πιθανή μελλοντική χρήση, για τη μέτρηση του χλωρίου (6.111 MeV) και του υδρογόνου (2.223 MeV). Ανεξάρτητα ηλεκτρονικά κυκλώματα χρησιμοποιήθηκαν για τους δύο ανιχνευτές. Ο ανιχνευτής NaI(Tl) έχει ενσωματωμένο διαιρέτη τάσης και προενισχυτή, η εφαρμογή υψηλής τάσης έγινε με τον TENNELEC TC 945 και η ενίσχυση με τον ενισχυτή CANBERRA Model 2020. Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε με την κάρτα GAMMAFAST και το πρόγραμμα φασματοσκοπίας InterWinner (έκδοση 4.0) της εταιρίας EURISIS MEASURES (St. Quentin Yvalines, Γαλλία) και για τον ανιχνευτή γερμανίου με το πρόγραμμα GammaVission.

Πίνακας 3-1 Ονομαστικά χαρακτηριστικά ανιχνευτών

Παράμετροι ανιχνευτών	<i>NaI(Tl)</i>	<i>HPGe</i>
Διάμετρος κρυστάλλου	102 mm	41.9 mm
Μήκος κρυστάλλου	102 mm	40 mm
Φωτοπολλαπλασιαστής	76 mm με άμεση σύνδεση με τον σπινθηριστή, ενσωματωμένος διαιρέτης τάσης και προενισχυτής	
Ενεργειακή διακριτική ικανότητα	7.0% (662 keV)	2 keV (1.33 MeV)
Φωτοκορυφή : Compton	--	37.1 : 1
Σχετική απόδοση	--	10%

3.1.1.5 Θωράκιση ανιχνευτών

Σε μια διάταξη άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση, η ανίχνευση ακτίνων- γ γίνεται ταυτόχρονα με την ακτινοβολήση του δείγματος. Το υπόβαθρο του φάσματος σε αυτή την περίπτωση είναι αυξημένο εξαιτίας της άμεσης ακτινοβολήσης των ανιχνευτών με νετρόνια και φωτόνια προερχόμενα από την πηγή και έμμεσα από το δείγμα και τη θωράκιση μετά από αλληλεπίδραση με αυτά. Αποτέλεσμα είναι η ύπαρξη μεγάλων στατιστικών σφαλμάτων και η φθορά των ανιχνευτών. Για το λόγο αυτό οι ανιχνευτές χρειάζονται θωράκιση έναντι των νετρονίων και των φωτονίων. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κομμάτια μολύβδου διαστάσεων 10 cm x 10 cm x 5 cm κάτω από τον ανιχνευτή
- κυλινδρικός μολύβδινος δακτύλιος πάχους 2.5 cm που καλύπτει περιμετρικά τον ανιχνευτή
- φύλλα παραφίνης πάχους 1.0 cm περιμετρικά του ανιχνευτή
- φύλλα boroflexTM πάχους 1.5 cm περιμετρικά και 1.0 cm μπροστά από τον ανιχνευτή.

3.1.2 Ομοιώματα

3.1.2.1 Υγρά διαλύματα αζώτου

Για τη μελέτη του σχεδιασμού της διάταξης παρασκευάστηκαν τρία υδατικά διαλύματα νιτρικού οξέος. Η περιεκτικότητά τους σε άζωτο είναι 3.6%, 7.2% και 14.4% κατά βάρος αντίστοιχα. Τα διαλύματα τοποθετήθηκαν σε πλαστικές κυλινδρικές φιάλες όγκου 0.25, 0.50 και 1.00 L και φαίνονται στην Εικόνα 3-5. Το σχήμα και το μέγεθος των φιάλων προσομοιάζουν το σώμα ενός μικρού ζώου αντίστοιχου όγκου. Η κυλινδρική φιάλη όγκου 1.00 L (διαστάσεις: ύψος = 20 cm, διάμετρος = 9 cm) με υδατικό διάλυμα περιεκτικότητας σε άζωτο 3.6% κατά βάρος, θεωρήθηκε ως το ‘πρότυπο ομοίωμα’ για τη συγκεκριμένη μελέτη.



Εικόνα 3-5 Ομοιώματα αποτελούμενα από υδατικό διάλυμα νιτρικού οξέος σε πλαστικά μπουκάλια, για τη μελέτη σχεδιασμού της διάταξης PGNAA.

3.1.2.2 Υγρό ομοίωμα ‘ισοδύναμο ιστού’, TEQ

Για τη βαθμονόμηση της διάταξης και τη μελέτη της ‘σύνθετης ευαισθησίας μέτρησης’ παρασκευάστηκαν διαλύματα χημικών ουσιών με αναλογία τέτοια, ώστε η σύσταση να μοιάζει με τη σύσταση ζωικού ιστού. Τα διαλύματα τοποθετήθηκαν σε πλαστικές φιάλες παρόμοιες με τις φιάλες της παραγράφου 3.1.2.1. Η επί τοις εκατό σύσταση των ουσιών του διαλύματος δίνεται στον Πίνακα 3-2. Η εκατοστιαία σύσταση των χημικών στοιχείων του διαλύματος ‘ισοδύναμου ιστού’ (tissue equivalent material - TEQ) και τα ποσοστά για τα αντίστοιχα στοιχεία του ανθρώπινου σώματος και του σκελετικού μύ [ICRP 1973] δίνονται στον Πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-2 Σύσταση υλικού που θεωρήθηκε ‘ισοδύναμο μαλακού ιστού’ (tissue equivalent material).

<i>Χημικές ουσίες</i>	<i>% σύσταση</i>
νερό (H ₂ O)	47.33
γλυκερίνη (C ₃ H ₈ O ₃)	46.20
ουρία (CH ₄ ON ₂)	5.79
χλωριούχο νάτριο (NaCl)	0.22
θειικό κάλιο (K ₂ SO ₄)	0.45

Πίνακας 3-3 Η επί τοις εκατό σύσταση των διαλυμάτων ‘ισοδύναμου ιστού’ (TEQ) και σύγκριση με τα αντίστοιχα στοιχεία του ανθρώπου αναφοράς.

<i>Στοιχεία</i>	<i>% σύσταση</i>		
	<i>Total body</i> * ¹	<i>Σκελετικός μυς</i> * ¹	<i>TEQ material</i>
H	10.00	10.00	9.73
C	22.86	10.71	19.23
O	61.43	75.00	67.83
N	2.57	2.75	2.70
Na	0.14	0.08	0.086
Cl	0.14	0.08	0.133
K	0.20	0.30	0.204
S	0.20	0.24	0.084

*¹ Τιμές για τον άνθρωπο αναφοράς [ICRP 1973]

3.1.2.3 Ομοιώματα για τη μελέτη των ανομοιογενειών στο δείγμα

Για τη μελέτη ανομοιογενειών στο σώμα μικρού ζώου κατασκευάστηκαν κυλινδρικά ομοιώματα, με τοιχώματα από Poly(methyl methacrylate) (PMMA), με τη δυνατότητα να γεμίσουν με υγρό προσομοίωσης ζωικού ιστού της παραγράφου 3.1.2.2. Ο συνολικός όγκος των κυλίνδρων είναι 0.25, 0.50 και 1.00 L. Στο εσωτερικό του κάθε ομοιώματος τοποθετήθηκε δεύτερος κύλινδρος από πλεξιγκλάς, ομοαξονικός με τον πρώτο, προκειμένου να προσομοιάσει ανομοιογένειες σύστασης στο εσωτερικό του σώματος. Η τοποθέτηση

διαφορετικών υγρών στον κάθε κύλινδρο δίνει τη δυνατότητα μελέτης ανομοιογενειών διαφορετικής σύστασης στο εσωτερικό του σώματος των ζώων. Στον Πίνακα 3-4 δίνονται οι διαστάσεις των κυλίνδρων. Στην Εικόνα 3-6 δίνεται μια φωτογραφία των κυλινδρικών ομοιωμάτων.

Πίνακας 3-4 Διαστάσεις ομοιωμάτων για τη μελέτη ανομοιογενειών

<i>Όγκος ομοιώματος (L)</i>	1.0	0.5	0.25
<i>Εσωτερική διάμετρος κυλίνδρου (mm)</i>	86	68	58
<i>Εσωτερικό ύψος κυλίνδρου (mm)</i>	172	140	95
<i>Εσωτερική διάμετρος ανομοιογένειας (mm)</i>	18	12	8
<i>Εσωτερικό ύψος ανομοιογένειας (mm)</i>	172	140	95
<i>Πάχος πλευρικών τοιχωμάτων (mm)</i>	5	5	5



Εικόνα 3-6 Ομοιώματα πλεξιγκλάς για τη μελέτη αξονικών ανομοιογενειών στο δείγμα

3.1.3 Υπολογιστικό μοντέλο διάταξης AANE

Για την παρούσα μελέτη κατασκευάστηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης της διάταξης με χρήση του κώδικα MCNP4C2. Το μοντέλο περιλαμβάνει την πηγή νετρονίων, τη βιολογική θωράκισή της, τον κατευθυντήρα νετρονίων, τον ανιχνευτή με τη θωράκισή του και το δείγμα. Οι διαστάσεις και η σύσταση των υλικών της διάταξης και των δειγμάτων ακτινοβολήσης είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά στη μελέτη.

Η πηγή ακτινοβολήσης αποδόθηκε με το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων πηγής $^{241}\text{Am-Be}$. Το $^{241}\text{Am-Be}$ έχει παρόμοιο ενεργειακό φάσμα νετρονίων με το $^{239}\text{Pu-Be}$ για ενέργειες μεγαλύτερες των 1.5 MeV, ενώ για τις χαμηλότερες ενέργειες, όπου η ταύτιση αυτή αποτυγχάνει, χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό φάσμα με κορυφή στα 0.4 MeV που περιέχει το 23% του συνολικού φάσματος του $^{241}\text{Am-Be}$ [Geiger K.W. 1975]. Για ενέργειες νετρονίων μεγαλύτερες των 1.5 MeV χρησιμοποιήθηκε φάσμα νετρονίων το οποίο προσδιορίστηκε πειραματικά [Green S. 2001]. Επιπλέον, ελήφθησαν υπ' όψιν οι ακτίνες- γ ενέργειας 4.4 MeV του $^{12}\text{C}^*$, ενώ οι ακτίνες $-\gamma$ και $-X$ των θυγατρικών του ^{239}Pu δεν ελήφθησαν υπόψη. Το ενεργειακό φάσμα νετρονίων της πηγής ^{252}Cf θεωρήθηκε κατανομή Maxwell με παράμετρο $T = 1.42$ [Blinov M.V. 1980].

Τα δεδομένα για τις ενεργές διατομές στοιχείων για τα νετρόνια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από τη βιβλιοθήκη δεδομένων ENDF/B-VI του πακέτου DLC-200/MCNPDATA, λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες τις πιθανές αλληλεπιδράσεις νετρονίων του πακέτου.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ

3.2.1 Προέλευση υποβάθρου μέτρησης με ανιχνευτή NaI(Tl)

Η ταυτόχρονη ακτινοβόληση του δείγματος και η φασματοσκοπική ανάλυση ακτίνων-γ, έχει ως αποτέλεσμα το φάσμα συλλογής ακτίνων-γ με ανιχνευτή NaI(Tl) να έχει αυξημένο υπόβαθρο. Αυτό οφείλεται στις:

- ακτίνες-γ που προέρχονται από τις πυρηνικές αντιδράσεις των νετρονίων με τα στοιχεία του δείγματος και της θωράκισης,
- ακτίνες-γ που προέρχονται από την ενεργοποίηση του κρυστάλλου του ανιχνευτή από νετρόνια της πηγής,
- ακτίνες-γ από την αποδιέγερση του $^{12}\text{C}^*$ της πηγής νετρονίων, που παράγεται από την αντίδραση $^9\text{Be}(\alpha, n)$,
- ακτίνες-γ και -X από το ^{239}Pu της πηγής ακτινοβόλησης,
- ακτίνες-γ μονής και διπλής απόδρασης (single and double escape peak),
- αθροιζόμενες κορυφές μικρότερων ενεργειών.

Μέρος αυτού του υποβάθρου ενδέχεται να προσθέτει παλμούς στην περιοχή μέτρησης των μετρούμενων στοιχείων. Για παράδειγμα, στην περιοχή μέτρησης του αζώτου (9.50 – 11.10 MeV), το υπόβαθρο οφείλεται κυρίως στην άθροιση φωτονίων μικρότερων ενεργειών τα οποία «συμπίπτουν» χρονικά στον ανιχνευτή, δεδομένου ότι πρόκειται για σχετικά «αργό» ανιχνευτή (π.χ. αργή μείωση της έντασης του φωτός 0.23μs), με αποτέλεσμα να καταγράφονται σαν ένας παλμός.

3.2.2 Μέθοδος πειραματικών μετρήσεων

Για την ακτινοβόληση ενός κυλινδρικού δείγματος, όγκου από 0.25 L έως 1.00 L, το δείγμα τοποθετείται με τον κύριο άξονά του κάθετο στην επιφάνεια ανοίγματος του κατευθυντήρα (κάθετο στη δέσμη νετρονίων) και κάθετο με τον κύριο άξονα του κυλινδρικού ανιχνευτή NaI(Tl). Η τοποθέτησή του γίνεται σε έναν δειγματοφορέα και πάνω σε αριθμημένη κλίμακα ώστε να επικεντρώνεται με το 'άνοιγμα' του κατευθυντήρα και τη δέσμη νετρονίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται επαναληψιμότητα στην τοποθέτηση του δείγματος. Ταυτόχρονα με την ακτινοβόληση συλλέγεται το φάσμα ακτίνων-γ (φάσμα μικτών παλμών) με τον ανιχνευτή NaI(Tl). Ακολούθως, απομακρύνεται το δείγμα από τη θέση ακτινοβόλησης και στην ίδια θέση τοποθετείται ομοίωμα του δείγματος, όμοιων διαστάσεων και ελεύθερο

αζώτου, για να ολοκληρωθεί η μέτρηση με τη συλλογή του φάσματος ακτίνων-γ υποβάθρου για τον ίδιο χρόνο ακτινοβολήσης.

Κατά την ανάλυση του φάσματος μικτών παλμών μετρώνται οι παλμοί που αντιστοιχούν στην περιοχή του αζώτου (9.50 – 11.10) MeV (μικτοί παλμοί, G). Με ολοκλήρωση της περιοχής του αζώτου, στο φάσμα υποβάθρου, προκύπτουν οι παλμοί υποβάθρου (B). Οι ‘καθαροί’ παλμοί (N) του μετρούμενου στοιχείου προκύπτουν με αφαίρεση των παλμών υποβάθρου από τους μικτούς παλμούς. Αναλυτικά οι εξισώσεις υπολογισμού των καθαρών παλμών και των σχετικών σφαλμάτων δίνονται στο Παράρτημα Β.

3.2.3 Υπολογιστική μέθοδος με τον κώδικα MCNP4C2

Για τον υπολογισμό της ροής νετρονίων και φωτονίων στο ομοίωμα και στον ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκαν οι εικονικοί ανιχνευτές f4 σε όλο τον όγκο του ομοιώματος και τον όγκο του ανιχνευτή. Οι tallies f4 υπολογίζουν τη μέση ροή σωματιδίων σε έναν όγκο (particles cm⁻²) ανά νετρόνιο πηγής.

Για τη μελέτη της κατανομής της ροής νετρονίων στο ομοίωμα χρησιμοποιήθηκαν οι tallies f4 σε μαθηματικούς ανιχνευτές κυλινδρικού όγκου, ακτίνας 0.5cm και ύψους 1.0cm. Οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν εσωτερικά του μοντέλου του δείγματος κατά μήκος της κεντρικής διαμέτρου του δείγματος (κατά μήκος του άξονα z) και ανά διάστημα 1cm. Για όποιο πείραμα θεωρήθηκε απαραίτητη μεταβολή, η ακτίνα των κυλινδρικών ανιχνευτών αυξήθηκε στο 1.0cm. Αυτή η αλλαγή δεν επηρεάζει σημαντικά την τιμή του υπολογιζόμενου μεγέθους, παρά μόνο το σφάλμα μέτρησης, αφού η tally f4 υπολογίζει τη μέση τιμή στον όγκο των κυλινδρικών ανιχνευτών.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού ισοδύναμης δόσης στο δείγμα χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση υπολογισμού f5 (ροή σωματιδίων / αρχικό σωματίο) πολλαπλασιασμένη με το συντελεστή μετατροπής της ροής νετρονίων και φωτονίων σε ισοδύναμη δόση από το ICRP-60 και το ANSI/ANS-6.1.1-1977 αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό του air Kerma free-in-air χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση υπολογισμού (tally f5) στην είσοδο και στο κέντρο της θέσης του δείγματος, απουσία του δείγματος, πολλαπλασιασμένη με τον παράγοντα Kerma ($K_{\text{factor}}^{\text{free-in-air}}$). Οι τιμές του $K_{\text{factor}}^{\text{free-in-air}}$ που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το ICRU-26 για τα νετρόνια και από το ICRP-74 για τα φωτόνια.

Οι τιμές, οι οποίες εξάγονται από το υπολογιστικό μοντέλο, αφορούν ανά νετρόνιο πηγής. Για τη σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις απαιτείται η διόρθωση με το ρυθμό εκπομπής νετρονίων της πηγής $^{239}\text{Pu-Be}$ (9.46×10^6 n/s).

3.2.4 Σχεδιασμός διάταξης

Η τελική κατασκευή της διάταξης απαιτεί κατάλληλη επιλογή της πηγής ακτινοβολήσης, του κατευθυντήρα της δέσμης νετρονίων, του ανιχνευτή της ακτινοβολίας-γ και των υλικών θωράκισης. Η μελέτη για το συνολικό σχεδιασμό έγινε με το υπολογιστικό μοντέλο της διάταξης μέσω του κώδικα MCNP4C2 και με χρήση των ομοιωμάτων της παραγράφου 3.1.2.2. Η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων έγινε με πειραματικές μετρήσεις, όπου υπήρχαν διαθέσιμα υλικά.

3.2.4.1 Δείκτης ομοιογένειας και δείκτης ποιότητας σχεδίασης

Στόχος του σχεδιασμού ήταν η μέγιστη απόδοση του ανιχνευτή στην ενεργειακή περιοχή του αζώτου με ταυτόχρονη μείωση του υποβάθρου μέτρησης και της φθοράς του ανιχνευτή. Ο στόχος προσεγγίζεται βρίσκοντας τον κατάλληλο συνδιασμό υλικών και γεωμετρίας ώστε να μεγιστοποιηθεί η ροή θερμικών νετρονίων στο δείγμα και να γίνει ελάχιστη η ροή νετρονίων στον ενεργό όγκο του ανιχνευτή. Επιπλέον απαιτούμενη είναι η καλύτερη ομοιογένεια στην κατανομή της ροής θερμικών νετρονίων στο δείγμα και η μείωση της απορροφούμενης δόσης στο ακτινοβολούμενο δείγμα.

Η ομοιογένεια κατανομής της ροής θερμικών νετρονίων στο δείγμα αντιπροσωπεύεται στην παρούσα μελέτη από την τυπική απόκλιση των τιμών θερμικής ροής νετρονίων από τη μέση τιμή τους (Εξίσωση 3-1).

$$UI = \sqrt{\frac{\sum_i (F_{th_i} - \langle F_{th_i} \rangle)^2}{n-1}} \quad \text{Εξίσωση 3-1}$$

όπου: UI είναι ο δείκτης ομοιογένειας

F_{th_i} είναι η ροή θερμικών νετρονίων σε στοιχειώδεις όγκους (i), όπως υπολογίστηκαν για την κατανομή θερμικής ροής νετρονίων με το βάθος του δείγματος

$\langle F_{th_i} \rangle$ είναι η μέση τιμή των προαναφερόμενων τιμών

n είναι το πλήθος τιμών.

Η Εξίσωση 3-2 ορίζει ένα δείκτη ποιότητας σχεδίασης Q , ο οποίος εξαρτάται από τον λόγο ‘σήμα προς υπόβαθρο’ και το δείκτη ομοιογένειας UI . Η επιλογή των υλικών και της γεωμετρίας της διάταξης πρέπει να μεγιστοποιεί αυτόν το δείκτη.

$$Q = \frac{N/B}{UI} \quad \text{Εξίσωση 3-2}$$

όπου: $\frac{N}{B}$ είναι ο λόγος ‘σήμα προς υπόβαθρο’

UI είναι ο δείκτης ομοιογένειας

Σημειώνεται ότι για τους υπολογισμούς με τον κώδικα Monte Carlo, ο λόγος ‘σήμα προς υπόβαθρο’ αποδίδεται με το λόγο της ροής θερμικών νετρονίων σε όλο τον όγκο του ομοιώματος προς τη συνολική ροή νετρονίων στον ενεργό όγκο του ανιχνευτή. Για τις πειραματικές μετρήσεις, ο αντίστοιχος λόγος αποδίδεται με το λόγο των ‘καθαρών’ παλμών αζώτου προς τους παλμούς του υποβάθρου στην ενεργειακή περιοχή του αζώτου από τα αντίστοιχα φάσματα ακτίνων-γ.

3.2.4.2 Υπολογισμός Ρυθμού Ισοδύναμης Δόσης με τον κώδικα MCNP4C2

Για τα διάφορα υλικά κατασκευής του κατευθυντήρα αντιστοιχούν διαφορετικοί ρυθμοί ισοδύναμης δόσης στο ακτινοβολούμενο δείγμα κυρίως λόγω διαφορών στον αριθμό και την κατανομή των νετρονίων. Αυτή η ποσότητα είναι σημαντική στις *in vivo* ακτινοβολήσεις πειραματόζωων και η ελάχιστη δυνατή τιμή της είναι ένα μέτρο σύγκρισης των υλικών κατευθυντήρα. Για το λόγο αυτό υπολογίστηκε ο λόγος του δείκτη ποιότητας Q των διαφόρων υλικών κατευθυντήρα προς το συνολικό ρυθμό ισοδύναμης δόσης D_{total} για κάθε υλικό:

$$\frac{Q}{D_{total}}$$

Ο υπολογισμός της ισοδύναμης δόσης από νετρόνια και φωτόνια έγινε με χρήση του κώδικα προσομοίωσης MCNP4C2. Η δόση υπολογίστηκε στην είσοδο του δείγματος, παρουσία του δείγματος, με τους συντελεστές που αναφέρονται στην παράγραφο 3.2.3.

3.2.4.3 Θέση και θωράκιση ανιχνευτή NaI(Tl)

Η θέση του ανιχνευτή και η θωράκισή του επηρεάζουν τον αριθμό των φωτονίων και νετρονίων που φτάνουν στον ενεργό όγκο του ανιχνευτή απευθείας από την πηγή, από το ακτινοβολουμένο δείγμα, και τα υλικά σκέδασης. Κατ' επέκταση επηρεάζουν το λόγο 'σήμα προς υπόβαθρο' και το στατιστικό σφάλμα μέτρησης. Για την επιλογή της θέσης του ανιχνευτή έγιναν μετρήσεις των παλμών υποβάθρου και των 'καθαρών' παλμών στην 'ενεργειακή περιοχή' του αζώτου, με τα ομοιώματα υγρών διαλυμάτων αζώτου (παράγραφος 3.1.2.2), για διαφορετικές αποστάσεις του ανιχνευτή από το δείγμα. Σύγκριση των αποτελεσμάτων έδωσε τη σχετική βέλτιστη θέση του ανιχνευτή.

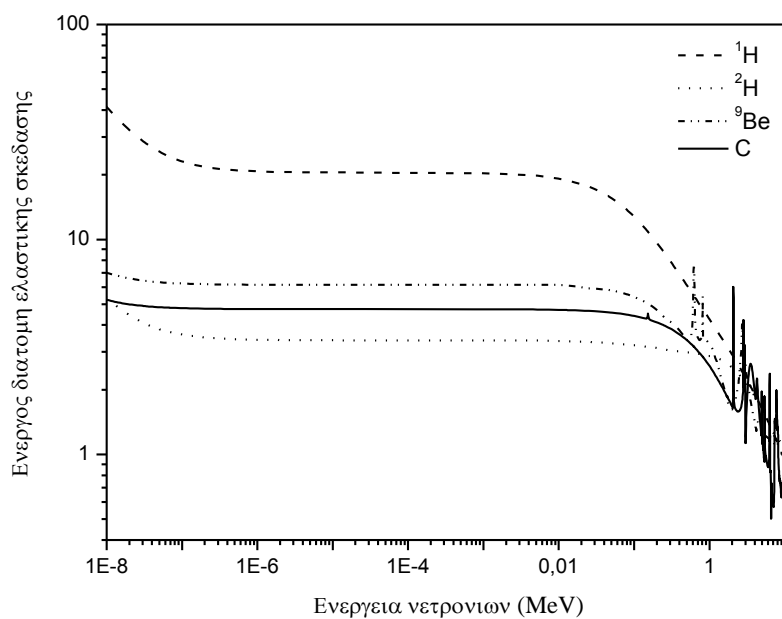
Η θωράκιση του ανιχνευτή μελετήθηκε επίσης πειραματικά για μια σειρά συνδυασμών υλικών γύρω από τον ανιχνευτή. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο μόλυβδος κάτω και γύρω από τον ανιχνευτή, καθώς και φύλλα παραφίνης και boroflexTM. Η σύσταση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη δίνεται στο Παράρτημα Γ. Ο μόλυβδος χρησιμοποιήθηκε ώστε να απορροφήσει τα φωτόνια που προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις νετρονίων και φωτονίων στα υλικά της θωράκισης και τα φωτόνια που προέρχονται από την πηγή. Η παραφίνη και το boroflexTM θερμοποιούν και απορροφούν τα νετρόνια που κατευθύνονται προς τον ανιχνευτή, είτε αυτά προέρχονται απευθείας από την πηγή είτε μετά από σκέδαση από τα υλικά της βιολογικής θωράκισης της πηγής.

3.2.4.4 Σχεδιασμός διάταξης μέσω του Monte Carlo κώδικα MCNP4C2

Αρχικά μελετήθηκε η εναλλακτική δυνατότητα χρήσης πηγής ²⁵²Cf ή ²⁴¹Am-Be αντί πηγής ²³⁹Pu-Be βάσει των χαρακτηριστικών των πηγών, της ενεργειακής κατανομής των νετρονίων τους και της ροής νετρονίων που προσδίδουν στο ομοίωμα και τον ανιχνευτή.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση του υλικού του κατευθυντήρα στο δείκτη ποιότητας Q. Το υλικό του κατευθυντήρα θα πρέπει να σκεδάζει έντονα τα νετρόνια με ενέργεια εντός της ενεργειακής περιοχής νετρονίων της πηγής. Τα στοιχεία που περιέχει πρέπει να έχουν υψηλή ενεργό διατομή ελαστικής και ανελαστικής σκέδασης νετρονίων, ώστε η ροή νετρονίων, στην περιοχή του δείγματος, να είναι αυξημένη. Στο Σχήμα 3-2 δίνονται οι καμπύλες ενεργού διατομής ελαστικής σκέδασης για τα στοιχεία ¹H, ²H, C, ⁹Be σε συνάρτηση με την ενέργεια των νετρονίων, για ενέργειες μέχρι 11.0 MeV. Το υδρογόνο έχει τη μεγαλύτερη τιμή ενεργού διατομής σκέδασης νετρονίων σχεδόν σε όλη την περιοχή ενεργειών, απορροφά όμως έντονα

τα θεμικά νετρόνια. Στην τιμή όμως των 4.6 MeV, που είναι η μέση τιμή της ενέργειας των νετρονίων της πηγής, μεγαλύτερη τιμή ενεργού διατομής σκέδασης νετρονίων έχει ο άνθρακας. Ο άνθρακας σκεδάζει επιπλέον τα νετρόνια μέσω μη-ελαστικών σκεδάσεων. Υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κατευθυντήρες δέσμης νετρονίων είναι ο γραφίτης, το βηρύλλιο, το πολυαιθυλένιο ή το βαρύ νερό. Τα υλικά που μελετήθηκαν είναι ο γραφίτης, το πολυαιθυλένιο, το πολυαιθυλένιο με προσμίξεις 5% βορίου, το ‘βαρύ νερό’ και το βηρύλλιο.



Σχήμα 3-2 Καμπύλες ενεργού διατομής ελαστικής σκέδασης σε συνάρτηση με την ενέργεια νετρονίων [ENDF/B-6].

Σε επόμενο βήμα βρέθηκε πώς επιδρά το υλικό του κατευθυντήρα σε συνδυασμό με διαφορετικές διαστάσεις του. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση του μήκους L του κατευθυντήρα στο σχετικό σφάλμα μέτρησης και στην απορροφούμενη δόση στο δείγμα. Μικρότερο μήκος κατευθυντήρα αντιστοιχεί σε μικρότερη απόσταση πηγής-δείγματος.

Τέλος, για ορισμένα υλικά χρησιμοποιήθηκε ο γραφίτης ως υλικό ανάκλασης κάτω από την πηγή και μελετήθηκε η επίδρασή του στη ροή νετρονίων στο ομοίωμα και στον ανιχνευτή, όπως και στην κατανομή νετρονίων στο ομοίωμα.

3.2.4.5 Πειραματική επιβεβαίωση του υπολογιστικού μοντέλου

Για την επιλογή του κατευθυντήρα κατασκευάστηκαν δύο ορθογώνιοι παραλληλεπίπεδοι κατευθυντήρες από διαφορετικό υλικό, ένας από γραφίτη και ένας από πολυαιθυλένιο. Και στις δυο περιπτώσεις τοποθετήθηκε γραφίτης κάτω από την πηγή, ως ανακλαστήρας νετρονίων, με σκοπό την αύξηση της ροής των επιθερμικών νετρονίων στο δείγμα. Επιπλέον μεταβλήθηκε το μήκος L του κατευθυντήρα από 17.0 cm έως 37.0 cm και εκτελέστηκαν διαδοχικές μετρήσεις του αζώτου στο πρότυπο ομοίωμα.

3.2.5 Air Kerma free-in-air

Ο υπολογισμός $K_{\text{air, free-in-air}}$ από νετρόνια και φωτόνια έγινε με χρήση του κώδικα προσομοίωσης MCNP4C2. Η τιμή του υπολογίστηκε στο κέντρο του πεδίου και στο επίπεδο του δείγματος, απουσία του δείγματος, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση υπολογισμού f5 (ροή σωματιδίων / αρχικό σωματίο) πολλαπλασιασμένη με τον Kerma factor από το ICRU-26 για τα νετρόνια και το ICRP-74 για τα φωτόνια. Αναλυτικότερα, το αποτέλεσμα της tally f5 δίνει τη ροή των αντίστοιχων σωματιδίων στον αέρα σε μονάδες σωματίδια*cm⁻² ανά νετρόνιο πηγής, το οποίο πολλαπλασιασμένο με το $K_{\text{factor}}^{\text{free-in-air}}$ (cGy cm²) και με το ρυθμό εκπομπής νετρονίων της πηγής ($9.46 \times 10^6 \text{ n s}^{-1}$) δίνει το ρυθμό του $K_{\text{air, free-in-air}}$ σε μονάδες cGy h⁻¹. Για τα φωτόνια ενέργειας 4.4 MeV, το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με το μέγεθος 0.7 φωτόνια / νετρόνιο πηγής.

3.2.6 Σύνθετη ευαισθησία ενεργοποίησης και ανίχνευσης

3.2.6.1 Ορισμός

Η ενεργοποίηση του δείγματος διαφέρει σημαντικά από σημείο σε σημείο μέσα στον όγκο του, κυρίως εξ' αιτίας της ανομοιογενούς κατανομής της ροής θερμικών νετρονίων στο δείγμα. Επιπλέον η απόδοση του ανιχνευτή στη συλλογή των ακτίνων-γ εξαρτάται από τη στερεά γωνία υπό την οποία ο ανιχνευτής 'βλέπει' τον ενεργοποιημένο όγκο, καθώς και από το ποσοστό σκέδασης και αυτοαπορρόφησής τους στο δείγμα. Αποτέλεσμα αυτών είναι η ευαισθησία μέτρησης αζώτου να μην είναι ομοιογενής στον όγκο του δείγματος και η μέτρησή του να εξαρτάται από τη χωρική κατανομή του μέσα στο δείγμα.

Για τη μελέτη της χωρικής κατανομής της ευαισθησίας μέτρησης αζώτου ορίζεται η «σύνθετη ευαισθησία ενεργοποίησης και ανίχνευσης» (CS, combined sensitivity of activation

and detection) και υπολογίζεται η χωρική κατανομή της στον όγκο ομοιώματος. Η CS ορίζεται ως το γινόμενο του αριθμού των φωτονίων ενέργειας 10.83 MeV που εκπέμπονται από το ομοίωμα ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα χρόνου επί την πιθανότητα ανίχνευσης των ακτίνων-γ από τον ανιχνευτή (Εξίσωση 3-3).

$$CS = \frac{\Delta N_{\gamma}}{\Delta t \cdot \Delta V} \cdot P \quad \text{Εξίσωση 3-3}$$

όπου: ΔN_{γ} , είναι ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων ενέργειας 10.83 MeV

3.2.6.2 Υπολογισμός της ποσότητας CS μέσω του κώδικα MCNP4C2

Για τον υπολογισμό της ποσότητας CS διακρίνουμε δύο στάδια: πρώτον, τον υπολογισμό του ρυθμού παραγωγής των ακτίνων-γ του αζώτου ανά μονάδα όγκου στον όγκο του ομοιώματος και δεύτερον, τον υπολογισμό της πιθανότητας ανίχνευσης αυτών των ακτίνων.

Για το πρώτο στάδιο, κατασκευάστηκε ένα κυλινδρικό υπολογιστικό ομοίωμα το οποίο διαιρέθηκε σε κυβικά στοιχεία όγκου 1cm^3 (voxels). Αυτά τα στοιχεία όγκου καθορίζουν τη χωρική διακριτική ικανότητα της σύνθετης ευαισθησίας και οι διαστάσεις τους επιλέχθηκαν με στόχο τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Υπολογίστηκε σε κάθε στοιχείο όγκου του δείγματος ο αριθμός των πυρήνων $^{15}\text{N}^*$ ανά μονάδα όγκου που παράγονται ως αποτέλεσμα της σύλληψης νετρονίου από τους πυρήνες ^{14}N (Εξίσωση 3-4).

$$f = \int_V \int_t \int_E n \cdot \sigma_c(E) \cdot \Phi(\vec{r}, E, t) dE dt \frac{dV}{V} \quad \text{Εξίσωση 3-4}$$

Η Εξίσωση 3-12 χρησιμοποιεί τη συνάρτηση υπολογισμού f4 του κώδικα MCNP4C2 σε συνδυασμό με την κάρτα fm. Η ποσότητα f σταθμίζει τη ροή θερμικών νετρονίων $\Phi(\vec{r}, E, t)$ με την ενεργό διατομή σύλληψης $\sigma_c(E)$ του ^{14}N , σε συνάρτηση με την ενέργεια των νετρονίων, και χρησιμοποιεί τον πολλαπλασιαστικό παράγοντα ατομικής πυκνότητας του αζώτου του ομοιώματος $n = \frac{\rho \cdot N_A}{A}$.

όπου : n είναι η ατομική πυκνότητα (atoms/barn/cm)

ρ είναι η πυκνότητα του υλικού (g/cm^3)

N_A είναι ο αριθμός Avogadro (6.022×10^{23} atoms/mole)

A είναι η ατομική μάζα του αζώτου (g/mole)

Από την Εξίσωση 3-5 προκύπτει ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων 10.83 MeV ανά μονάδα όγκου του στοιχειώδους όγκου.

$$\left(\frac{\Delta N_\gamma}{\Delta t \cdot \Delta V} \right)_i = f \cdot \frac{\Delta N_n}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta N_\gamma}{\text{αλληλεπίδραση}} \quad \text{Εξίσωση 3-5}$$

όπου : $\left(\frac{\Delta N_\gamma}{\Delta t \cdot \Delta V} \right)_i$ είναι ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων 10.83 MeV ανά μονάδα όγκου για τον στοιχειώδη όγκο i

f είναι ο αριθμός των πυρήνων $^{15}\text{N}^*$ ανά μονάδα όγκου που παράγονται μέσω των (n,γ) πυρηνικών αντιδράσεων και ανά αρχικό νετρόνιο πηγής

$\frac{\Delta N_n}{\Delta t}$ είναι ο ρυθμός εκπομπής νετρονίων της πηγής

$\frac{\Delta N_\gamma}{\text{αλληλεπίδραση}}$ είναι ο αριθμός εκπομπής φωτονίων 10.83 MeV ανά αλληλεπίδραση

Στο δεύτερο στάδιο κάθε στοιχειώδους όγκος θεωρήθηκε πηγή εκπομπής φωτονίων 10.83 MeV. Η απόδοση του ανιχνευτή, P_i , υπολογίστηκε σε συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση υπολογισμού f8 του κώδικα MCNP4C2. Ο κώδικας λαμβάνει υπ' όψιν τις πολλαπλές σκεδάσεις και την διαφυγή ακτίνων-γ από τον όγκο του ανιχνευτή, καθώς και τα δευτερογενή φορτισμένα σωματίδια και την ακτινοβολία πέδησης.

Η σύνθετη ευαισθησία, CS_i , κάθε στοιχειώδους όγκου προκύπτει από την Εξίσωση 3-6.

$$CS_i = \left(\frac{\Delta N_\gamma}{\Delta t \cdot \Delta V} \right)_i \cdot V_i \cdot P_i \quad \text{Εξίσωση 3-6}$$

όπου V_i είναι ο όγκος του στοιχείου i.

Η απόκριση του ανιχνευτή για το συνολικό όγκο του ομοιώματος προκύπτει με άθροιση της σύνθετης ευαισθησίας όλων των στοιχειωδών όγκων (Εξίσωση 3-7).

$$CS = \sum_i CS_i \quad \text{Εξίσωση 3-7}$$

3.2.7 Επίδραση των ανομοιογενειών στη μέτρηση του αζώτου

Οι περισσότερες μελέτες για τη σύσταση μικρών ζώων θεωρούν ομοιογενή κατανομή της πυκνότητας και της συγκέντρωσης των διαφόρων στοιχείων μέσα στο σώμα. Παρόλα αυτά, για ιστούς με σχετικά μεγάλη απόκλιση στην εκατοστιαία σύσταση και στην περιεκτικότητα σε άζωτο (όπως πνεύμονες) απαιτείται επιπλέον μελέτη της ανομοιογένειας που εισάγουν, τόσο στη θερμική ροή νετρονίων όσο και στη χωρική κατανομή της σύνθετης ευαισθησίας.

Για τη μελέτη αυτών των ανομοιογενειών χρησιμοποιήθηκε το διάλυμα 'ισοδύναμου ιστού', όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.1.2.2, μέσα στις φιάλες από πλεξιγκλάς (παράγραφος 3.1.2.3). Επιπλέον, παρασκευάστηκαν μίγματα με διαφορετική περιεκτικότητα σε άζωτο, ώστε να μελετηθούν οι ακραίες περιπτώσεις συγκέντρωσης αζώτου σε μια περιοχή του δείγματος. Στον Πίνακα 3-5 δίνεται η κατά βάρος σύσταση των μιγμάτων. Στον Πίνακα 3-6 δίνεται η ατομική σύσταση των μιγμάτων σε σύγκριση με την ατομική σύσταση του ανθρώπου αναφοράς και του σκελετικού μυ. Το μίγμα μηδενικής συγκέντρωσης αζώτου (TEQ 4) χρησιμοποιείται είτε για την προσομοίωση υλικού με μηδενική περιεκτικότητα σε άζωτο, είτε για την αφαίρεση του υποστρώματος σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2.2. Αξονικές ανομοιογένειες παράγονται γεμίζοντας τον εσωτερικό κύλινδρο του μπουκαλιού με διαφορετικό υλικό από ότι τον εξωτερικό κύλινδρο.

Πίνακας 3-5 Η ποσοστιαία (κατά βάρος) σύσταση των μιγμάτων για τη μελέτη ανομοιογενειών.

	% σύσταση			
	TEQ 1	TEQ 2	TEQ 3	TEQ 4
υλικά				
νερό (H_2O)	47.33	47.57	47.57	47.57
γλυκερίνη ($C_3H_8O_3$)	46.20	39.94	28.35	51.76
ουρία (CH_4ON_2)	5.79	11.82	23.40	0.0
χλωριούχο νάτριο ($NaCl$)	0.22	0.22	0.22	0.22
θεικό κάλιο (K_2SO_4)	0.45	0.46	0.46	0.46

Πίνακας 3-6 Ατομική σύσταση των μιγμάτων για τη μελέτη ανομοιογενειών σε σύγκριση με την ατομική σύσταση του ανθρώπου αναφοράς και του σκελετικού μύ.

Στοιχεία	% σύσταση					
	Άνθρωπος αναφοράς	Σκελετικός μυς	TEQ 1	TEQ 2	TEQ 3	TEQ 4
H	10.0	10.0	9.73	9.61	9.38	9.85
C	23.0	10.714	19.23	17.99	15.77	20.25
O	61.0	75.0	67.83	66.38	63.42	69.39
N	2.6	2.75	2.70	5.51	10.92	0.0
Na	0.14	0.075	0.086	0.087	0.087	0.087
Cl	0.12	0.079	0.133	0.134	0.134	0.134
K	0.20	0.300	0.204	0.205	0.205	0.205
S	0.20	0.239	0.084	0.084	0.084	0.084

3.2.8 Μέθοδος βαθμονόμησης διάταξης για τη μέτρηση του αζώτου

3.2.8.1 *Εξαγωγή παράγοντα βαθμονόμησης με την τεχνική ‘ενός πρότυπου ομοιώματος’*

Η βαθμονόμηση της διάταξης βασίζεται στην εξαγωγή ενός παράγοντα βαθμονόμησης, F_{st} , ο οποίος συσχετίζει τους μετρούμενους παλμούς του δείγματος σε μάζα αζώτου στο δείγμα.

Ο παράγοντας F_{st} εξάγεται για ένα πρότυπο ομοίωμα γνωστού όγκου και γνωστής συγκέντρωσης αζώτου και ορίζεται από το ρυθμό ανίχνευσης ‘καθαρών’ παλμών στο ‘πρότυπο ομοίωμα’ ανά μονάδα μάζας αζώτου του ‘πρότυπου ομοιώματος’ (Εξίσωση 3-8). Το ‘πρότυπο ομοίωμα’ που χρησιμοποιείται είναι το διάλυμα ‘ισοδύναμου ιστού’ (παράγραφος 3.1.2.2) σε πλαστικό κυλινδρικό μπουκάλι όγκου 1.0 L.

$$F_{st} = \frac{R_{st}}{m_{st}} \quad \text{Εξίσωση 3-8}$$

όπου : R_{st} είναι ο αριθμός των ‘καθαρών’ παλμών στην περιοχή του αζώτου ανά μονάδα μέτρησης χρόνου (c/s)

m_{st} είναι η μάζα του αζώτου στο πρότυπο δείγμα (g).

3.2.8.2 Μέθοδος διόρθωσης για δείγματα διαφορετικού όγκου

Η μέτρηση αζώτου σε δείγμα διαφορετικού όγκου και διαστάσεων από το ‘πρότυπο ομοίωμα’ απαιτεί διόρθωση για την εξασθένηση της δέσμης νετρονίων λόγω των αλληλεπιδράσεων με τα στοιχεία του δείγματος και για την αυτοαπορρόφηση των ακτίνων-γ στον όγκο του δείγματος. Ο διορθωτικός συντελεστής, $f_{correction}$ εξάγεται με χρήση του κώδικα MCNP4C2 και με υπολογισμό της συνολικής σύνθετης ευαισθησίας CS σε ομοιώματα ‘ισοδύναμου ιστού’, για όγκους από 0.25 L έως 1.00 L.

3.2.8.3 Υπολογισμός αζώτου σε άγνωστο δείγμα

Ένα δείγμα άγνωστης περιεκτικότητας σε άζωτο τοποθετείται σε φιάλη όγκου 0.25, 0.50 ή 1.00 L. Το δείγμα ζυγίζεται και ακτινοβολείται στη διάταξη AANE. Ο ρυθμός ανίχνευσης ‘καθαρών’ παλμών, R_N , στην περιοχή του αζώτου (9.50 MeV – 11.10 MeV) διορθώνεται για τον όγκο με τον παράγοντα $f_{correction}$. Χρησιμοποιώντας τον παράγοντα βαθμονόμησης F_{st} , υπολογίζεται η ποσότητα αζώτου που υπάρχει στο δείγμα (Εξίσωση 3-9).

$$m_N = \frac{R_N \cdot f_{correction}}{F_{st}} \quad \text{Εξίσωση 3-9}$$

όπου : R_N είναι ο αριθμός των ‘καθαρών’ παλμών στην ενεργειακή περιοχή του αζώτου ανά μονάδα μέτρησης χρόνου (c/s)

m_N είναι η μάζα του αζώτου στο άγνωστο δείγμα (g).

Η % κατά βάρος συγκέντρωση του αζώτου στο δείγμα υπολογίζεται από την Εξίσωση 3-10.

$$C_N = \frac{m_N}{m_{tot}} \cdot 100\% \quad \text{Εξίσωση 3-10}$$

όπου : C_N είναι η % κατά βάρος συγκέντρωση του αζώτου στο άγνωστο δείγμα

m_{tot} είναι η μάζα του άγνωστου δείγματος (g).

3.2.9 Προσδιορισμός ακρίβειας μέτρησης αζώτου

Η ακρίβεια της διάταξης προσδιορίστηκε με τη μέτρηση του αζώτου σε δείγματα, διαλύματος αζώτου, γνωστής περιεκτικότητας σε άζωτο και σε δείγματα ομογενοποιημένου κρέατος.

3.2.9.1 Διαλύματα γνωστής συγκέντρωσης αζώτου

Τα ομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη είναι τα κυλινδρικά ομοιώματα της παραγράφου 3.1.2.1 με τα διαλύματα που αναφέρονται στον Πίνακα 3-6. Τα ομοιώματα αντιπροσωπεύουν ζωικό ιστό όγκου 0.25, 0.50 και 1.00 L και συγκέντρωση κατά βάρος αζώτου 2.7%, 5.5% και την ακραία τιμή 10.9%. Τα δείγματα, αφού ζυγίστηκαν, ακτινοβολήθηκαν στη διάταξη AANE. Ακολουθώντας τη διαδικασία της παραγράφου 3.2.8, υπολογίστηκε η περιεκτικότητά τους σε άζωτο. Οι υπολογιζόμενες τιμές συγκρίθηκαν με τις γνωστές τιμές συγκέντρωσης αζώτου των διαλυμάτων.

3.2.9.2 Δείγματα ομογενοποιημένου κρέατος

Η ακρίβεια της μεθόδου στην περίπτωση άγνωστου, ομοιογενούς δείγματος προσδιορίστηκε συγκριτικά με δύο ήδη εφαρμοζόμενες χημικές μεθόδους, την Kjeldahl και την Dumas. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τέσσερα είδη κρέατος, διαφορετικής σύστασης, τα οποία ήταν:

- γλουτός βοδινού κρέατος
- σπάλα βοδινού κρέατος
- λαιμός βοδινού κρέατος
- γλουτός και μπούτι χοιρινού κρέατος.

Το κάθε είδος ομογενοποιήθηκε και δειγματοληπτικά το δείγμα χωρίστηκε σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος τοποθετήθηκε σε πλαστική κυλινδρική φιάλη διαστάσεων: ύψος $H=20\text{cm}$, διάμετρος $D=9\text{cm}$ και καταψύχθηκε στους -40°C . Αυτό το δείγμα ορίστηκε ως το δείγμα μέτρησης με την τεχνική της AANE. Τα άλλα δύο εστάλησαν στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας Γεωργικών Προϊόντων στο ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. και στο Ινστιτούτο Φυσικοχημείας στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», αντίστοιχα, για τον προσδιορισμό του συνολικού αζώτου με δύο ανεξάρτητες χημικές μεθόδους, αντίστοιχα.

Μέτρηση αζώτου με την τεχνική της AANE

Τα δείγματα ακτινοβολήθηκαν με την ισοτοπική πηγή $^{239}\text{Pu-Be}$ χρησιμοποιώντας κατευθυντήρα από γραφίτη και εσωτερικών διαστάσεων 20cm x 10cm x 26.0cm. Επιλέχθηκε η ενεργειακή περιοχή μέτρησης από 9.5 έως 11.1 MeV που περιλαμβάνει τη φωτοκορυφή των 10.83 MeV, και τις κορυφές απλής και διπλής διαφυγής, όπως και στα ομοιώματα. Η ενεργειακή βαθμονόμηση των φασμάτων έγινε με βάση την κορυφή ενέργειας 0.481 MeV του $^{10}\text{Li}^*$, λόγω σύλληψης θερμικού νετρονίου στο ^{10}B της θωράκισης, και της κορυφής 6.88 MeV (βλέπε κορυφή 5 της παραγράφου 4.2) θεωρώντας γραμμική ενεργειακή απόκριση ως και την περιοχή των ~11 MeV. Η απόσταση πηγής - δείγματος ήταν 52.0 cm, ενώ η απόσταση κέντρο δείγματος – επιφάνεια ανιχνευτή ήταν 15.0 cm. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε φιάλες όγκου 1 L αντίστοιχες με τη φιάλη βαθμονόμησης της διάταξης. Η μάζα των τεσσάρων δειγμάτων ήταν 1002 g, 990 g, 970 g και 975 g αντίστοιχα προς τη σειρά που αναφέρονται.

Το στατιστικό σφάλμα υπολογισμού του ρυθμού των ‘καθαρών’ παλμών κυμαίνεται από 5.5% έως 6.3%, ανάλογα και με το χρόνο ακτινοβόλησης κάθε δείγματος. Για την επίτευξη τέτοιου σφάλματος απαιτήθηκαν περίπου 48 ώρες χρόνου ακτινοβόλησης για κάθε δείγμα λόγω χαμηλής ενεργότητας της πηγής. Προς αποφυγή της αποβολής των υγρών του κρέατος, ο χρόνος ακτινοβόλησης κλασματοποιήθηκε σε 6 ακτινοβολήσεις x 8 h η κάθε μια. Τον ενδιάμεσο χρόνο, το δείγμα ψύχονταν στους $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το υπόστρωμα υπολογίστηκε με ακτινοβόληση ομοιώματος ίσων διαστάσεων και παρόμοιας σύστασης με τα ακτινοβολούμενα δείγματα χωρίς την παρουσία αζώτου για περίπου τον ίδιο χρόνο ακτινοβόλησης. Ο ‘νεκρός’ χρόνος συλλογής φασμάτων για τη μέτρηση υποβάθρου και δειγμάτων ήταν 6% και 5.9% αντίστοιχα.

Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ο ρυθμός ανίχνευσης παλμών, ο οποίος προέκυψε διαιρώντας τους παλμούς με τον ενεργό χρόνο μέτρησης του ανιχνευτή. Ο ρυθμός των ‘καθαρών’ παλμών υπολογίστηκε από αφαίρεση του ρυθμού παλμών υποβάθρου από το ρυθμό μικτών παλμών (Εξίσωση B-6) και το στατιστικό σφάλμα του από την Εξίσωση B-9. Ο παράγοντας βαθμονόμησης F_{st} υπολογίστηκε για το πρότυπο ομοίωμα ‘ισοδύναμου ιστού’ όγκου 1.0 L, σύμφωνα με την Εξίσωση 3-8, και βρέθηκε να ήταν (0.00112 ± 0.00006) cps/gN. Ο δε διορθωτικός παράγοντας για τον όγκο, $f_{\text{correction}}$, ήταν 1.00 ± 0.01 . Η ζητούμενη μάζα αζώτου στα άγνωστα δείγματα υπολογίστηκε με την Εξίσωση 3-9 της παραγράφου

3.2.8.3. Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης κατά βάρος του αζώτου στο δείγμα ζυγίστηκαν τα δείγματα. Η ποσοστιαία κ.β. συγκέντρωση του αζώτου υπολογίστηκε από την Εξίσωση 3-10.

Μέτρηση αζώτου με τη μέθοδο Kjeldahl

Η μέθοδος Kjeldahl είναι μια χημική μέθοδος μετατροπής του πρωτεϊνικού αζώτου σε ιόν αμμωνίου, με θέρμανση θειικού οξέος, παρουσία καταλύτη. Το μίγμα που παράγεται γίνεται αλκαλικό, η αμμωνία διαχωρίζεται με απόσταξη και υπολογίζεται στοιχειομετρικά. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με το αυτόματο σύστημα Block digestion systems KJELDATHERM κατασκευής Gerhardt Analytical Systems, Γερμανίας. Το σύστημα οδηγεί το δείγμα σε διαδικασία 'χώνεψης' σε ειδικούς, ηλεκτρικά θερμαινόμενους αγωγούς από αλουμίνιο και αμέσως σε ταχεία απόσταξη των ατμών αμμωνίας.

Μέτρηση αζώτου με τη μέθοδο Dumas

Η μέθοδος καύσης Dumas βασίζεται στην καύση του δείγματος και τη μέτρηση του αζώτου που προκύπτει. Αρχικά το δείγμα οξειδώνεται σε περιβάλλον 'καθαρού' οξυγόνου και τα αέρια προϊόντα διαχωρίζονται με στήλες χρωματογραφίας υπό αυστηρές και ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και όγκου. Υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης, τα αέρια μετρώνται ως συνάρτηση της θερμικής αγωγιμότητάς τους. Η ανάλυση των δειγμάτων έγινε χρησιμοποιώντας αναλυτή Perkin-Elmer 2400 CHN. Η βαθμονόμηση του συστήματος γίνεται για κάθε μέτρηση αγνώστων δειγμάτων χρησιμοποιώντας ένα γνωστό πρότυπο δείγμα. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη λυοφιλοποίηση των δειγμάτων και τον τεμαχισμό τους σε διαστάσεις 0.5 mm.

Μελέτες σύγκρισης των δύο χημικών τεχνικών υποδεικνύουν ότι οι τιμές των αποτελεσμάτων μέσω της μεθόδου Dumas είναι συνήθως υψηλότερες κατ' απόλυτη τιμή από αυτές της Kjeldahl [Thompson M. 2002]. Αυτή η διαφορά οφείλεται στη διαφορά της πλήρους μετατροπής αντιδρώντος σε προϊόν. Συγκεκριμένα, η μετατροπή του μη-πρωτεϊνικού αζώτου σε ελεύθερο άζωτο κατά τη μέθοδο Dumas είναι πλήρης, ενώ κατά τη μέθοδο Kjeldahl οι αζωτούχες ενώσεις μετατρέπονται σε ιόντα αμμωνίου ατελώς. Παρόλα αυτά, οι Thompson και συν. μελετώντας τη διακύμανση μεταξύ των δύο μεθόδων στον υπολογισμό του αζώτου σε δείγματα κρέατος όπως χοιρινό, μοσχάρι, κοτόπουλο και αρνί, έφτασαν στο συμπέρασμα ότι οι διακυμάνσεις ήταν μικρές (διακύμανση 0.020 ± 0.004 %)

[Thompson M. 2004] και στατιστικά σημαντικές μόνο για το κρέας κοτόπουλου που δε μελετήθηκε στην παρούσα εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

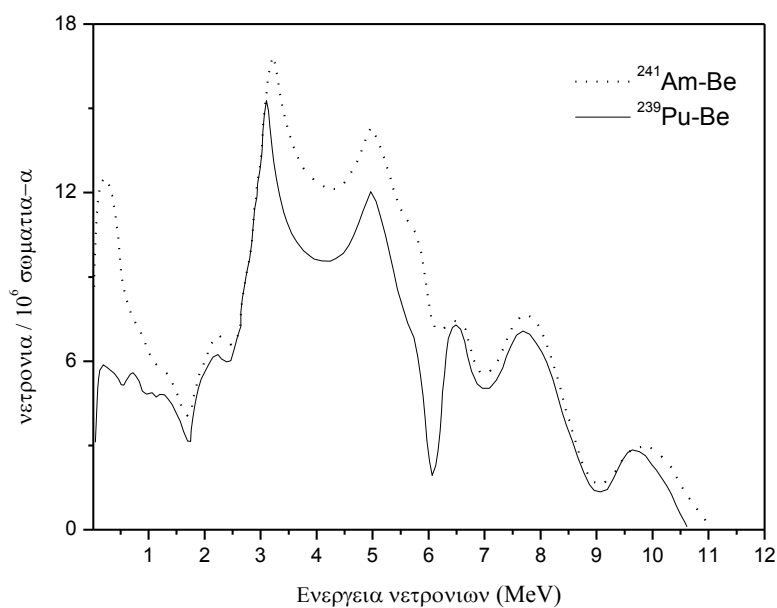
4.1.1 Σύγκριση πηγών $^{239}\text{Pu-Be}$ και $^{241}\text{Am-Be}$

Στον Πίνακα 4-1 δίνονται τα συγκριτικά χαρακτηριστικά των πηγών $^{239}\text{Pu-Be}$, $^{241}\text{Am-Be}$ [Geiger K.W. 1975] και ^{252}Cf [Blinov M.V. 1980]. Η πηγή $^{241}\text{Am-Be}$ παράγει σωματίδια-α μεγαλύτερης ενέργειας, άρα και μεγαλύτερο αριθμό εκπομπής νετρονίων ανά διάσπαση. Γενικά όσο αυξάνεται η μέση ενέργεια των σωματιδίων-α τόσο αυξάνεται το ποσοστό νετρονίων με χαμηλές ενέργειες [Geiger K.W. 1975]. Έτσι, το ποσοστό των νετρονίων, με ενέργειες μικρότερες από 1.5 MeV, είναι μεγαλύτερο για την πηγή $^{241}\text{Am-Be}$. Γι' αυτό το λόγο κυρίως, η μέση ενέργεια νετρονίων της πηγής $^{241}\text{Am-Be}$ είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της πηγής $^{239}\text{Pu-Be}$. Αντίθετα, οι Pauw και Aten αποδίδουν μεγαλύτερο ποσοστό νετρονίων χαμηλών ενεργειών (33.5%) στην πηγή $^{239}\text{Pu-Be}$ έναντι του 23% για την πηγή $^{241}\text{Am-Be}$ [Pauw and Aten 1972]. Σύμφωνα με τον Geiger, πηγές όπως η $^{239}\text{Pu-Be}$, όταν έχουν μεγάλο όγκο κατασκευής, εκπέμπουν περισσότερα νετρόνια χαμηλής ενέργειας λόγω των σκεδάσεων των νετρονίων στο υλικό της πηγής. Η πηγή $^{239}\text{Pu-Be}$ της διάταξης AANE εκπέμπει νετρόνια με ρυθμό 5.1×10^4 n/GBq*s.

Πίνακας 4-1 Συγκριτικά χαρακτηριστικά των πηγών $^{239}\text{Pu-Be}$, $^{241}\text{Am-Be}$ [Geiger K.W. 1975] και ^{252}Cf [Blinov M.V. 1980].

Χαρακτηριστικό	$^{239}\text{Pu-Be}$	$^{241}\text{Am-Be}$	^{252}Cf
E_α (MeV)	5.15	5.48	-
Αριθμός νετρονίων ανά 10^6 σωματια-α	65 ± 6	82 ± 8	3.75 n / σχάση
Ποσοστό (%) νετρονίων με $E_n < 1.5 \text{ MeV}$	11 ± 2	14 ± 2	
Μέση Ενέργεια Νετρονίων $\langle E_n \rangle$ (MeV)	4.59	4.46	2.3
Χρόνος ημιζωής (y)	24390	433	2.65
Εκπομπή νετρονίων ($n \text{ GBq}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	4×10^4	7×10^4	1.2×10^8 ($2.3 \times 10^9 \text{ n mg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Στο Σχήμα 4-1 δίνεται συγκριτικά το ενεργειακό φάσμα νετρονίων των πηγών $^{239}\text{Pu-Be}$ και $^{241}\text{Am-Be}$, όπως έχουν υπολογιστεί από τον Geiger [Geiger K.W. 1975]. Οι δύο πηγές έχουν παρόμοια ενεργειακά φάσματα για νετρόνια με τιμή ενέργειας $E_n > 1.5 \text{ MeV}$, ενώ η μεγαλύτερη διαφορά τους παρουσιάζεται για τα νετρόνια χαμηλής ενέργειας ($E_n < 1.5 \text{ MeV}$).



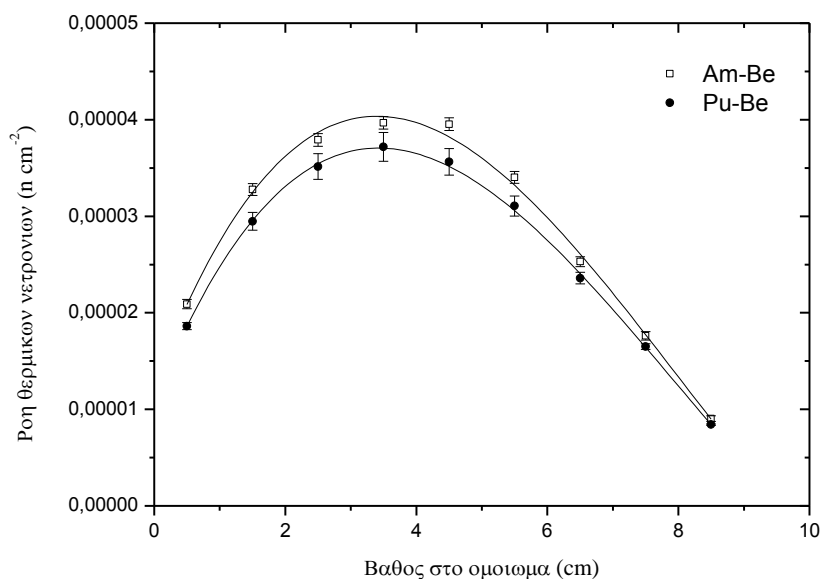
Σχήμα 4-1 Ενεργειακό φάσμα νετρονίων των πηγών $^{239}\text{Pu-Be}$ και $^{241}\text{Am-Be}$ [Geiger K.W. 1975].

Για τη σύγκριση των δύο πηγών όσον αφορά τη ροή θερμικών, επιθερμικών και συνολικών νετρονίων στον όγκο του ομοιώματος, καθώς και την κατανομή θερμικών νετρονίων κατά μήκος του κάθετου στον κυλινδρικό άξονα συμμετρίας, άξονα z, που διέρχεται από το κέντρο βάρους του ομοιώματος, έγινε χρήση του υπολογιστικού μοντέλου της διάταξης μέσω του κώδικα MCNP4C2. Οι υπολογισμοί της ροής νετρονίων σε ομοίωμα όγκου 1.0 L και σύστασης ‘ισοδύναμου ιστού’ (Εικόνα 3-4) δίνονται στον Πίνακα 4-2. Το $^{241}\text{Am-Be}$ παρέχει ~6.5% μεγαλύτερη θερμική ροή νετρονίων στο ομοίωμα και ~2% μεγαλύτερη ροή νετρονίων ενέργειας 0.5 eV – 1.5 MeV. Οι κατανομές της ροής θερμικών νετρονίων με το βάθος στο δείγμα, για τις δύο πηγές, δίνονται στο Σχήμα 4-2.

Πίνακας 4-2 Ροή θερμικών νετρονίων, νετρονίων ενέργειας $0.5 \text{ eV} < E_n < 1.5 \text{ MeV}$ και συνολικών νετρονίων στον όγκο ομοιώματος 1.0 L, όπως υπολογίστηκαν με τον κώδικα MCNP4C2, για τις πηγές $^{239}\text{Pu-Be}$ και $^{241}\text{Am-Be}$.

	<i>Ροή θερμικών¹ νετρονίων ($n \text{ cm}^{-2}$)</i>	<i>Ροή νετρονίων $0.5 \text{ eV} < E_n < 1.5 \text{ MeV}$ ($n \text{ cm}^{-2}$)</i>	<i>Συνολική ροή νετρονίων ($n \text{ cm}^{-2}$)</i>
$^{241}\text{Am-Be}$ [Geiger K.W.]	1.83E-05 ± 0.4%	3.96E-05 ± 0.2%	8.37E-05 ± 0.2%
$^{239}\text{Pu-Be}$ [Geiger K.W.]	1.71E-05 ± 0.4%	3.90E-05 ± 0.2%	8.27E-05 ± 0.2%

¹ Νετρόνια ενέργειας < 0.5 eV



Σχήμα 4-2 Κατανομή θερμικής ροής νετρονίων με το βάθος στο ομοίωμα όγκου 1.0 L, για τις πηγές $^{239}\text{Pu-Be}$ και $^{241}\text{Am-Be}$, όπως υπολογίστηκαν με τον κώδικα MCNP4C2.

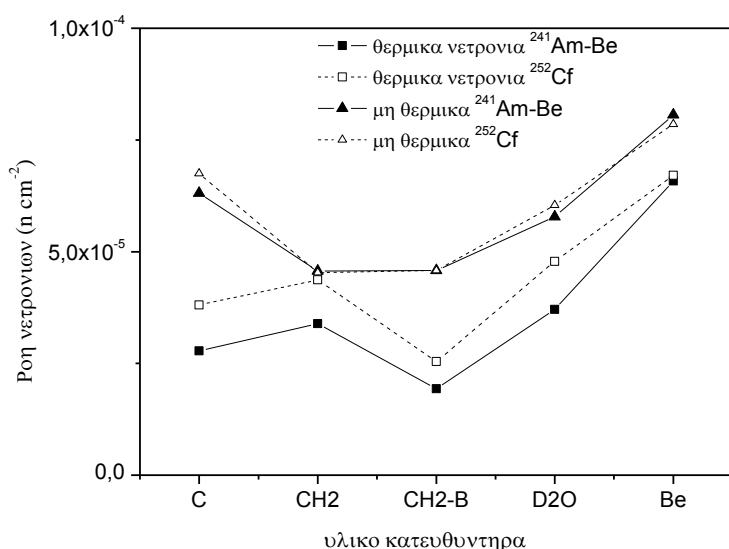
4.1.2 Σύγκριση πηγών $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf

Η μελέτη της δυνατότητας χρήσης διαφορετικής πηγής αφορά τη μελέτη της ροής νετρονίων στο δείγμα και στον ανιχνευτή και την απορροφημένη δόση στο ακτινοβολούμενο δείγμα με χρήση πηγής $^{241}\text{Am-Be}$ ή πηγής ^{252}Cf . Η σύγκριση αφορά την πηγή $^{241}\text{Am-Be}$ διότι η χρήση του $^{239}\text{Pu-Be}$ δεν επιτρέπεται εκτός περιοχής ελεγχόμενης ως προς την ασφάλεια. Ωστόσο οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν με υπάρχουσα πηγή $^{239}\text{Pu-Be}$ καθώς το φάσμα νετρονίων των δύο πηγών είναι παρόμοιο.

Η αύξηση της ροής θερμικών νετρονίων στο δείγμα αυξάνει τον αριθμό των αντιδράσεων σύλληψης και της εκπομπής άμεσων ακτινών-γ, αυξάνοντας το μετρούμενο 'σήμα'. Ταυτόχρονα, όμως, η αύξηση της ροής νετρονίων από την πηγή αυξάνει και τη ροή νετρονίων και ακτινών-γ στον ανιχνευτή, αυξάνοντας το υπόβαθρο μέτρησης. Αυτή η αύξηση του υποβάθρου μέτρησης δεν είναι ανάλογη με την αύξηση 'σήματος', γιατί η θωράκιση της διάταξης και του ανιχνευτή είναι πιο αποτελεσματική για τα χαμηλότερης μέσης ενέργειας νετρόνια πηγής ^{252}Cf από αυτά από πηγή $^{241}\text{Am-Be}$. Αποτέλεσμα αυτών είναι η εξάρτηση του λόγου 'σήμα προς υπόβαθρο' από το ενεργειακό φάσμα της χρησιμοποιούμενης πηγής.

Επιπλέον, οι ενεργές διατομές αλληλεπίδρασης των νετρονίων με την ύλη εξαρτώνται και από το υλικό μέσο του κατευθυντήρα. Αυτό σημαίνει ότι η μελέτη σύγκρισης των δύο πηγών πρέπει να γίνει σε σχέση με τα διαφορετικά υλικά κατασκευής κατευθυντήρα.

Στο Σχήμα 4-3 δίνεται η ροή νετρονίων στον όγκο ομοιώματος νερού 1.0 L, όπως υπολογίστηκαν με χρήση του κώδικα MCNP4C2, για τις πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf . Οι ροές νετρονίων αναφέρονται στα θερμικά νετρόνια ($E_n < 0.5 \text{ eV}$) και σε νετρόνια με ενέργειες από 0.5 eV έως 14 MeV. Τα υλικά κατευθυντήρα, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη, είναι ο γραφίτης, το πολυαιθυλένιο, το βοριομένο πολυαιθυλένιο, το 'βαρύ νερό' και το βηρύλλιο. Όπως φαίνεται από το σχήμα, η ροή θερμικών νετρονίων στο ομοίωμα ανά παραγόμενο νετρόνιο από πηγή ^{252}Cf είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ροή από πηγή $^{241}\text{Am-Be}$, για όλα τα υλικά κατευθυντήρα, εκτός από το βηρύλλιο. Το βηρύλλιο έχει υψηλή ενεργό διατομή σκέδασης νετρονίων και αποδίδει μεγάλη ροή νετρονίων στο ομοίωμα και για τις δύο πηγές χωρίς να επηρεάζεται έντονα από το φάσμα τους. Αντίθετα, η ροή μη θερμικών νετρονίων στο ομοίωμα είναι παρόμοια. Τα αποτελέσματα του Σχήματος 4-3 αποδίδονται και από τις τιμές του Πίνακα 4-3. Οι τιμές της ροής νετρονίων στις στήλες 3, 4 του Πίνακα 4-3 αναφέρονται ανά νετρόνιο πηγής.



Σχήμα 4-3 Η ροή νετρονίων, θερμικών και μη θερμικών, σε κυλινδρικό ομοίωμα νερού ($H = 20\text{cm}$, $D = 9\text{cm}$) για τις πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf και για διάφορα υλικά κατευθυντήρα.

Πίνακας 4-3 Ροή θερμικών και μη θερμικών νετρονίων στον όγκο ομοιώματος νερού 1.0L, όπως υπολογίστηκαν με τον κώδικα MCNP4C2, για τις πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf και για διάφορα υλικά κατευθυντήρα.

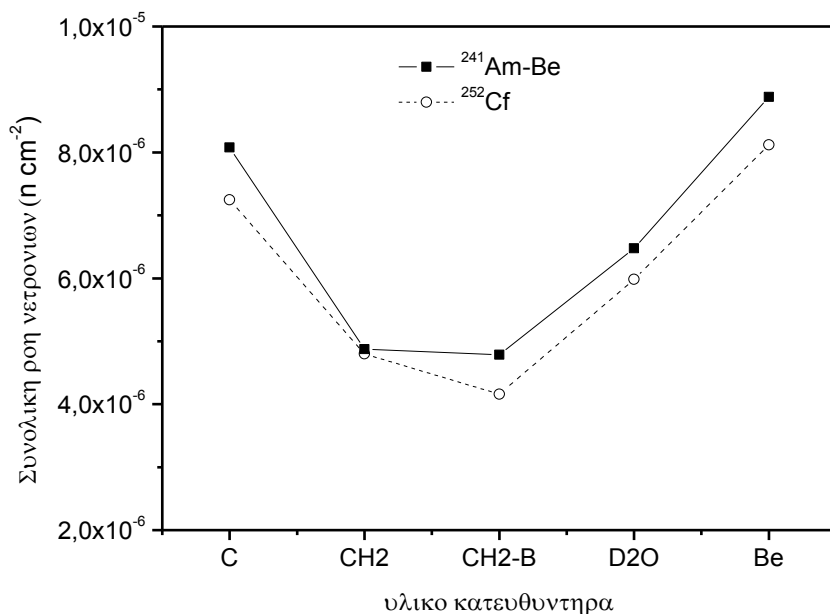
Υλικό κατευθυντήρα	Πηγή	Ροή θερμικών ¹ νετρονίων ($n\text{ cm}^{-2}$) *	Ροή μη θερμικών ² νετρονίων ($n\text{ cm}^{-2}$) *
Γραφίτης	$^{241}\text{Am-Be}$	$2.78\text{E-}05 \pm 1\%$	$6.31\text{E-}05 \pm 0.4\%$
	^{252}Cf	$3.81\text{E-}05 \pm 1\%$	$6.75\text{E-}05 \pm 0.5\%$
Πολυαιθυλένιο	$^{241}\text{Am-Be}$	$3.39\text{E-}05 \pm 1\%$	$4.57\text{E-}05 \pm 0.8\%$
	^{252}Cf	$4.37\text{E-}05 \pm 1\%$	$4.53\text{E-}05 \pm 0.8\%$
Βοριομένο πολυαιθυλένιο	$^{241}\text{Am-Be}$	$1.93\text{E-}05 \pm 0.9\%$	$4.58\text{E-}05 \pm 0.3\%$
	^{252}Cf	$2.54\text{E-}05 \pm 0.8\%$	$4.58\text{E-}05 \pm 0.4\%$
‘Βαρύ νερό’	$^{241}\text{Am-Be}$	$3.71\text{E-}05 \pm 0.7\%$	$5.78\text{E-}05 \pm 0.3\%$
	^{252}Cf	$4.78\text{E-}05 \pm 0.8\%$	$6.04\text{E-}05 \pm 0.4\%$
Βηρύλλιο	$^{241}\text{Am-Be}$	$6.58\text{E-}05 \pm 0.7\%$	$8.06\text{E-}05 \pm 0.4\%$
	^{252}Cf	$6.71\text{E-}05 \pm 0.9\%$	$7.85\text{E-}05 \pm 0.5\%$

¹ Νετρόνια ενέργειας $< 0.5\text{ eV}$

² Νετρόνια ενέργειας $0.5\text{ eV} < E_n < 14\text{ MeV}$

* Ανά νετρόνιο πηγής

Στο Σχήμα 4-4 δίνεται η συνολική ροή νετρονίων στον ενεργό όγκο του ανιχνευτή NaI(Tl) από τις πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf και για τα προαναφερόμενα υλικά κατευθυντήρα. Η πηγή $^{241}\text{Am-Be}$ προσδίδει μεγαλύτερη ροή νετρονίων στον ανιχνευτή (8-13%) για όλα σχεδόν τα υλικά κατασκευής εκτός από το πολυαιθυλένιο. Το αποτέλεσμα αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι το ενεργειακό φάσμα νετρονίων της πηγής $^{241}\text{Am-Be}$ έχει μεγαλύτερο ποσοστό ταχέων νετρονίων από την πηγή ^{252}Cf και τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με τα υλικά του κατευθυντήρα, της θωράκισης και του ομοιώματος με περισσότερες ανελαστικές σκεδάσεις, οπότε τα σκεδαζόμενα νετρόνια που φτάνουν στον ανιχνευτή είναι περισσότερα για την πηγή $^{241}\text{Am-Be}$. Επιπλέον, η ύπαρξη των ακτινών-γ ενέργειας 4.4 MeV της πηγής $^{241}\text{Am-Be}$ προσδίδουν μέσω του φαινομένου υπέρθεσης παλμών (pile up) αυξημένο υπόβαθρο στο φάσμα των ακτινών-γ. Αποτέλεσμα αυτών είναι, η χρήση πηγής $^{241}\text{Am-Be}$, να προσδίδει αυξημένο υπόβαθρο και αυξημένο σφάλμα μέτρησης. Τα αποτελέσματα του Σχήματος 4-4 αποδίδονται και από τις τιμές του Πίνακα 4-4. Οι τιμές της ροής νετρονίων στη στήλη 3 του Πίνακα 4-4 αναφέρονται ανά νετρόνιο πηγής.



Σχήμα 4-4 Η συνολική ροή νετρονίων στον ενεργό όγκο του ανιχνευτή NaI(Tl) για τις πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf και για διάφορα υλικά κατευθυντήρα.

Πίνακας 4-4 Συνολική ροή νετρονίων στον ενεργό όγκο του ανιχνευτή NaI(Tl), όπως υπολογίστηκαν με τον κώδικα MCNP4C2, για τις πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf και για διάφορα υλικά κατευθυντήρα.

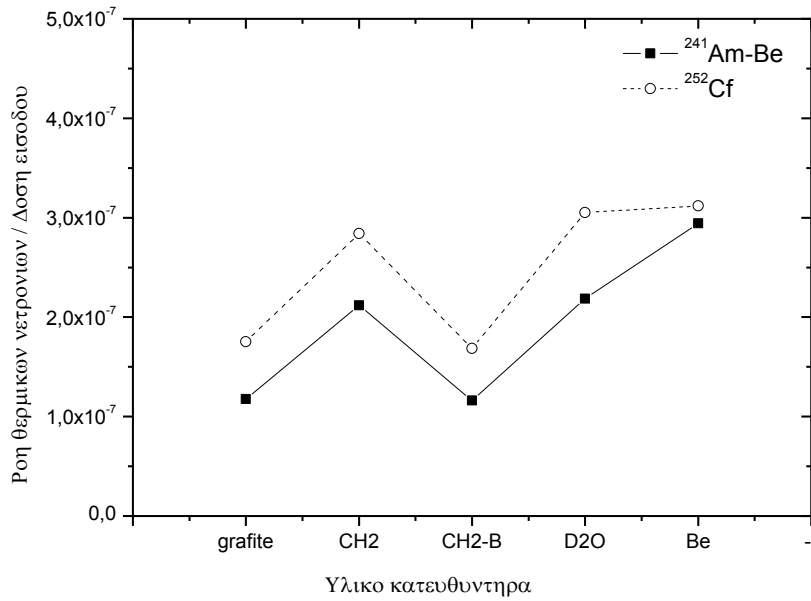
Υλικό κατευθυντήρα	Πηγή	Συνολική ροή νετρονίων (n cm $^{-2}$) *
Γραφίτης	$^{241}\text{Am-Be}$	8.08E-06 ± 1%
	^{252}Cf	7.24E-06 ± 1%
Πολυαιθυλένιο	$^{241}\text{Am-Be}$	4.87E-06 ± 1%
	^{252}Cf	4.80E-06 ± 1%
Βοριομένο πολυαιθυλένιο	$^{241}\text{Am-Be}$	4.79E-06 ± 1%
	^{252}Cf	4.16E-06 ± 1%
‘Βαρύ νερό’	$^{241}\text{Am-Be}$	6.48E-06 ± 1%
	^{252}Cf	5.98E-06 ± 1%
Βηρύλλιο	$^{241}\text{Am-Be}$	8.88E-06 ± 1%
	^{252}Cf	8.12E-06 ± 1%

* Ανά νετρόνιο πηγής

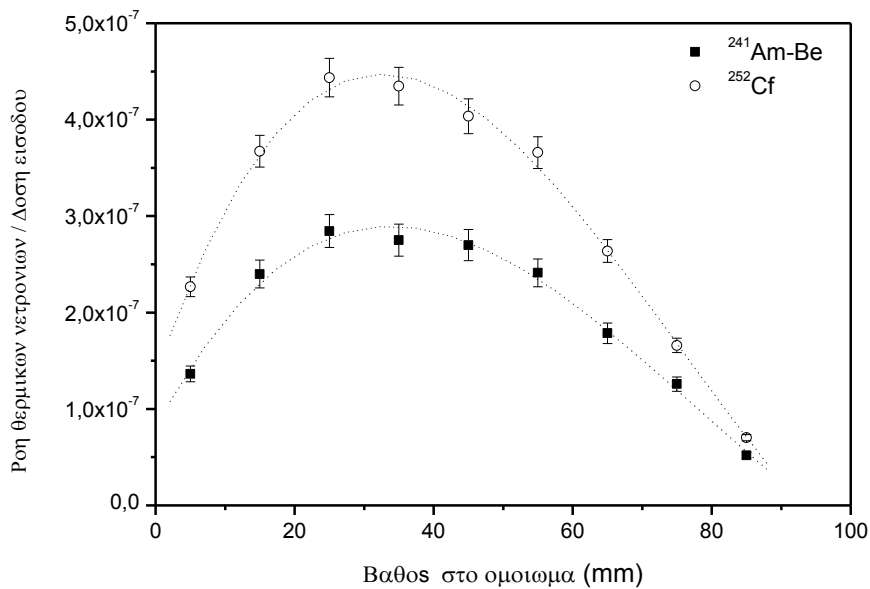
Συμπερασματικά των Σχημάτων 4-3 και 4-4, σημειώνεται ότι η πηγή ^{252}Cf υπερτερεί της πηγής $^{241}\text{Am-Be}$ ως προς τη ροή θερμικών νετρονίων στο ομοίωμα ανά δόση εισόδου και τη ροή των συνολικών νετρονίων στον ανιχνευτή, που σημαίνει ότι υπερτερεί ως προς το αυξημένο 'σήμα' και το χαμηλό υπόβαθρο. Στο ίδιο συμπέρασμα οδηγούνται και έρευνες από τους Allen και συν. (1986), McNeill και συν. (1989) και Krishnan και συν. [Krishnan S.S. 1990], οι οποίοι αντικατέστησαν πηγές $^{238}\text{Pu-Be}$ με πηγές ^{252}Cf και οδηγήθηκαν σε αύξηση του λόγου 'σήμα προς υπόβαθρο'.

Στο Σχήμα 4-5 δίδεται ο λόγος της ροής θερμικών νετρονίων στον όγκο ομοιώματος νερού 1.0 L προς τη δόση εισόδου του ομοιώματος, σε συνάρτηση με τα διαφορετικά υλικά κατευθυντήρα και για τις πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf . Για κάθε υλικό κατευθυντήρα, ο λόγος 'ροή θερμικών νετρονίων προς δόση εισόδου' είναι μεγαλύτερος για την πηγή ^{252}Cf , γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη θερμική ροή νετρονίων από το ^{252}Cf και την απουσία των ακτινών-γ ενέργειας 4.4 MeV.

Το Σχήμα 4-6 απεικονίζει την κατανομή, κατά μήκος του άξονα z, του λόγου της ροής θερμικών νετρονίων προς τη δόση εισόδου σε συνάρτηση με το βάθος στο ομοίωμα, για τις πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf . Οι τιμές έχουν υπολογιστεί με τον κώδικα προσομοίωσης MCNP4C2 και αναφέρονται σε υλικό κατασκευής κατευθυντήρα το γραφίτη. Η πηγή ^{252}Cf αποδίδει ~54% υψηλότερη τιμή του λόγου 'ροή θερμικών νετρονίων προς δόση εισόδου' στο μέγιστο της καμπύλης κατανομής και 51% υψηλότερο λόγο για ολόκληρο το ομοίωμα, όπως υπολογίζεται από το εμβαδόν κάτω από την κατανομή.



Σχήμα 4-5 Ο λόγος ‘ροή θερμικών νετρονίων προς δόση εισόδου’ σε ($\mu\text{Sv cm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{Ci}^{-1}$) για κυλινδρικό ομοίωμα νερού ($H = 20\text{cm}$, $D = 9\text{cm}$) σε συνάρτηση με τα διαφορετικά υλικά κατευθυντήρα, για τις πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf .



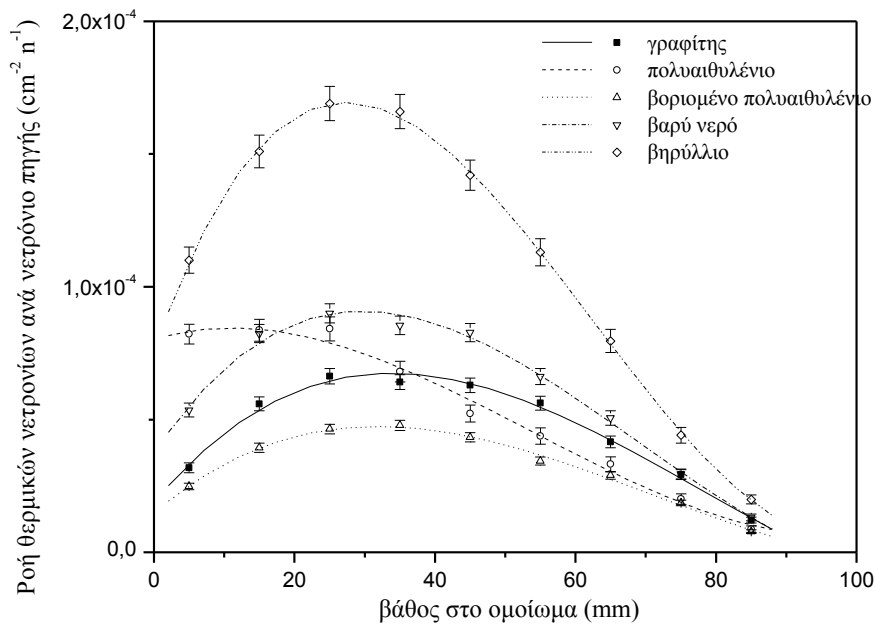
Σχήμα 4-6 Κατανομή του λόγου ‘ροή θερμικών νετρονίων προς δόση εισόδου’ σε ($\mu\text{Sv cm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{Ci}^{-1}$) με το βάθος σε κυλινδρικό ομοίωμα νερού ($H = 20\text{cm}$, $D = 9\text{cm}$) για τις πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ και ^{252}Cf και για υλικό κατευθυντήρα γραφίτη.

4.1.3 Επιλογή υλικών και μήκους κατευθυντήρα

Τα υλικά κατασκευής του κατευθυντήρα που μελετήθηκαν είναι ο γραφίτης, το πολυαιθυλένιο, το βοριομεμένο πολυαιθυλένιο, το ‘βαρύ νερό’ και το βηρύλλιο. Η μελέτη έγινε για πηγή $^{241}\text{Am-Be}$ και με το υπολογιστικό μοντέλο της διάταξης της παραγράφου 3.1.3.

4.1.3.1 Κατανομή ροής θερμικών νετρονίων κατά μήκος της διαμέτρου κυλινδρικού ομοιώματος για διάφορα υλικά κατευθυντήρα

Στο Σχήμα 4-7 φαίνεται η ροή θερμικών νετρονίων ανά νετρόνιο πηγής σε συνάρτηση με το βάθος στο ‘πρότυπο ομοίωμα’ της παραγράφου 3.1.2.2, για διαφορετικά υλικά κατευθυντήρα και για πηγή νετρονίων $^{241}\text{Am-Be}$. Για τα περισσότερα υλικά κατευθυντήρα, η ροή θερμικών νετρονίων, που φτάνει στην είσοδο του ομοιώματος, είναι μειωμένη και ‘χτίζεται’ στο ομοίωμα φτάνοντας το μέγιστό της σε βάθος που εξαρτάται από το υλικό σκέδασης του κατευθυντήρα.



Σχήμα 4-7 Κατανομή της ροής θερμικών νετρονίων σε συνάρτηση με το βάθος σε κυλινδρικό ομοίωμα νερού ($H = 20\text{cm}$, $D = 9\text{cm}$) για διαφορετικά υλικά κατευθυντήρα όπως προκύπτει από υπολογισμούς με τον MCNP4C2, για πηγή $^{241}\text{Am-Be}$.

Το μέγιστο της θερμικής ροής νετρονίων στον γραφίτη αντιστοιχεί σε βάθος 3.5 cm, στο βιοριμένο πολυαιθυλένιο σε 3.2 cm περίπου, στο βαρύ νερό στα 2.9 cm και στο βηρύλλιο σε βάθος 2.7 cm. Για κατευθυντήρα κατασκευασμένο από πολυαιθυλένιο, η ροή θερμικών νετρονίων που φτάνει στην είσοδο του δείγματος είναι ήδη αυξημένη και μειώνεται μετά από βάθος (1.5 – 2.0) cm. Επιπλέον στα κυλινδρικά ομοιώματα διαμέτρου μέχρι 3.0 cm το υλικό του κατευθυντήρα που παρέχει τη μέγιστη ροή θερμικών νετρονίων στο δείγμα είναι το βηρύλλιο και κατά δεύτερον το πολυαιθυλένιο. Για κυλινδρικά ομοιώματα διαμέτρου μεγαλύτερης των 3.0 cm σημαντική θερμική ροή στο δείγμα παρέχει το βηρύλλιο και το ‘βαρύ νερό’.

4.1.3.2 Ομοιογένεια κατανομής θερμικής ροής νετρονίων κατά μήκος της διαμέτρου κυλινδρικού ομοιώματος και δείκτης ποιότητας σχεδίασης Q

Στον Πίνακα 4-5 δίνονται η συνολική ροή θερμικών νετρονίων στο ‘πρότυπο ομοίωμα’ της παραγράφου 3.1.2.2 και η συνολική ροή νετρονίων στον όγκο του ανιχνευτή για τα διαφορετικά υλικά κατευθυντήρα. Επιπλέον δίνονται οι τιμές του δείκτη ομοιογένειας UI της κατανομής της θερμικής ροής κατά μήκος του άξονα z του ομοιώματος, όπως υπολογίστηκε από την Εξίσωση 0-1. Στον ίδιο πίνακα δίνονται οι τιμές του δείκτη ποιότητας, Q , όπως υπολογίστηκε από την Εξίσωση 0-2.

- Το βηρύλλιο παρέχει τη μεγαλύτερη θερμική ροή νετρονίων στο ομοίωμα, αλλά επιβαρύνει τον ανιχνευτή με υψηλή ροή νετρονίων, γεγονός που αυξάνει το υπόβαθρο μέτρησης και συνεπώς αυξάνει το στατιστικό σφάλμα μέτρησης. Επιπλέον, αντιστοιχεί σε κακή ομοιογένεια στην κατανομή της ροής θερμικών νετρονίων στο ομοίωμα και η υπολογιζόμενη τιμή του δείκτη ποιότητας σχεδίασης Q είναι η μεγαλύτερη τα υλικά που μελετήθηκαν. Επιπρόσθετα, λόγω της υψηλής χημικής τοξικότητας, το βηρύλλιο συνήθως δεν προτιμάται. Παρόλα αυτά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως υλικό στήριξης της πηγής λόγω της καλής σκέδασης νετρονίων που παρέχει [Stamatelatos I.E. 1992, Utteridge T.D. 1996].
- Το ‘βαρύ νερό’ παρέχει σχετικά υψηλή ροή θερμικών νετρονίων στο ομοίωμα, αλλά και υψηλή ροή νετρονίων στον ανιχνευτή. Με σχετικά κακή τιμή ομοιογένειας της ροής θερμικών νετρονίων κατά μήκος του άξονα z στο ομοίωμα, η τιμή του δείκτη ποιότητας σχεδιασμού Q κατατάσσει το υψηλού κόστους ‘βαρύ νερό’ σε ενδιάμεση θέση στη λίστα επιλογής υλικού κατευθυντήρα για τη συγκεκριμένη

διάταξη. Το ‘βαρύ νερό’ έχει χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με πηγή ^{252}Cf σε διάταξη άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση’ για μικρά ζώα [Stamatelatos I.E. 1995]. Ένα πλεονέκτημά του είναι η έλλειψη άμεσων ακτίνων- γ π.χ. 2.2 MeV του H, κατά την ενεργοποίηση του υλικού.

- Το πολυαιθυλένιο έχει ομοίως σχετικά υψηλή ροή θερμικών νετρονίων και παρόμοια τιμή του δείκτη ομοιογένειας με το ‘βαρύ νερό’. Η χαμηλή ροή νετρονίων στον ανιχνευτή, μειώνει το σφάλμα μέτρησης και η υπολογιζόμενη τιμή του δείκτη ποιότητας σχεδίασης Q για αυτό το υλικό το κατατάσσει σε δεύτερη θέση για την επιλογή υλικού κατευθυντήρα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση κατευθυντήρα από πολυαιθυλένιο έχει ως αποτέλεσμα μια σημαντική παρεμβολή στη μέτρηση υδρογόνου του ακτινοβολούμενου δείγματος η οποία και πρέπει να συνυπολογιστεί.
- Το βοριομένο πολυαιθυλένιο δίνει την καλύτερη τιμή για το δείκτη ομοιογένειας UI και τη μικρότερη ροή νετρονίων στον ανιχνευτή, υστερεί όμως σημαντικά στη ροή θερμικών νετρονίων στο ομοίωμα. Παρόλα αυτά, ο δείκτης ποιότητας σχεδίασης Q γίνεται μέγιστος για τη συγκεκριμένη διάταξη με κατευθυντήρα από βοριομένο πολυαιθυλένιο.
- Ο γραφίτης είναι ένα εύκολο και φθηνό υλικό για κατασκευή κατευθυντήρα και δίνει ικανοποιητική ομοιογένεια στη ροή θερμικών νετρονίων κατά μήκος του άξονα z στο ομοίωμα.

Συνοψίζοντας, η ομοιογένεια είναι βέλτιστη για υλικό κατευθυντήρα το βοριομένο πολυαιθυλένιο και το γραφίτη, με τον γραφίτη να παρέχει μεγαλύτερη θερμική ροή νετρονίων. Όσον αφορά τη ροή νετρονίων στον ανιχνευτή, τη μεγαλύτερη ροή δίνουν τα υλικά με υψηλή ενεργό διατομή σκέδασης νετρονίων (βηρύλλιο, γραφίτης) και τη μικρότερη ροή δίνουν υλικά τα οποία επιβραδύνουν και απορροφούν τα νετρόνια ικανοποιητικά (πολυαιθυλένιο, βοριομένο πολυαιθυλένιο). Ο δείκτης ποιότητας, Q, συνοψίζει την επίδραση των υλικών και γίνεται μέγιστος για το βοριομένο πολυαιθυλένιο και το πολυαιθυλένιο.

Πίνακας 4-5 Συνολική θερμική ροή νετρονίων στο 'πρότυπο ομοίωμα', συνολική ροή νετρονίων στον ανιχνευτή και τιμές του δείκτη ομοιογένειας και του δείκτη ποιότητας σχεδίασης για διαφορετικά υλικά κατευθυντήρα.

Υλικό κατασκευής κατευθυντήρα	Συνολική θερμική ροή νετρονίων στο ομοίωμα ($n\text{ cm}^{-2}$) [*]	Συνολική ροή νετρονίων στον ανιχνευτή ($n\text{ cm}^{-2}$) [*]	UI ($\times 10^{-5}$) ($n\text{ cm}^{-2}$) [*]	Q ($\times 10^5$) ($n\text{ cm}^{-2}$) ^{-1*}
Γραφίτης	$2.78 \times 10^{-5} \pm 1.0\%$	$8.08 \times 10^{-6} \pm 1.3\%$	1.89 ± 0.01	1.82
Πολυαιθυλένιο	$3.39 \times 10^{-5} \pm 1.3\%$	$4.87 \times 10^{-6} \pm 2.7\%$	2.85 ± 0.02	2.44
Βοριομένο πολυαιθυλένιο	$1.93 \times 10^{-5} \pm 0.8\%$	$4.79 \times 10^{-6} \pm 1.3\%$	1.36 ± 0.01	2.97
Βαρύ νερό	$3.71 \times 10^{-5} \pm 0.7\%$	$6.48 \times 10^{-6} \pm 1.2\%$	2.70 ± 0.02	2.12
Βηρύλλιο	$6.58 \times 10^{-5} \pm 0.7\%$	$8.88 \times 10^{-6} \pm 1.4\%$	5.33 ± 0.03	1.39

* Ανά νετρόνιο πηγής

4.1.3.3 Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος

Στον Πίνακα 4-6 δίνεται ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, $H^*(10)$ (ambient dose equivalent rate) από τα νετρόνια και ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος από τα φωτόνια 4.4 MeV της πηγής $^{241}\text{Am-Be}$ και τα φωτόνια που προκύπτουν από τις (n,γ) αλληλεπιδράσεις στα υλικά της διάταξης, όπως υπολογίστηκε στην παράγραφο 3.2.4.2. Ο γραφίτης και το βηρύλλιο δίνουν τις υψηλότερες τιμές δόσης για τα νετρόνια συγκριτικά με τα άλλα υλικά, και αυτό λόγω της υψηλότερης ροής νετρονίων που παρέχουν στον όγκο του δείγματος. Η δόση από φωτόνια από αλληλεπιδράσεις (n,γ) επηρεάζεται λιγότερο από τα υλικά κατευθυντήρα και εξάλλου η συνεισφορά της στη συνολική ισοδύναμη δόση κυμαίνεται μεταξύ 1.3% ως 2.5%.

Στον ίδιο πίνακα δίνεται και η τιμή του λόγου του δείκτη ποιότητας σχεδίασης Q προς το συνολικό ρυθμό ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος. Βρέθηκε ότι η τιμή του ρυθμού ισοδύναμης δόσης για τα εναλλακτικά υλικά κατασκευής κατευθυντήρα δεν επηρεάζει τη

σειρά κατάταξης των υλικών ως προς τον υψηλότερο λόγο του δείκτη ποιότητας σχεδίασης Q προς D_{total} , παρά τις ιδιαίτερα χαμηλές τιμές του Q / D_{total} στο βηρύλλιο και στον γραφίτη.

Πίνακας 4-6 Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος από νετρόνια και φωτόνια της πηγής $^{241}\text{Am-Be}$ στη θέση του ακτινοβολούμενου δείγματος της διάταξης.

Υλικό κατασκευής κατευθυντήρα	Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος από νετρόνια ($pSv h^{-1}$) [*]	Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος από φωτόνια ($pSv h^{-1}$) [*]	Q / D_{total} ($n cm^{-2} pSv h^{-1}$) ⁻¹
Γραφίτης	105.9 ± 5.5	1.4 ± 0.1	1696
Πολυαιθυλένιο	70.9 ± 3.2	1.8 ± 0.1	3356
Βοριομένο πολυαιθυλένιο	74.1 ± 2.7	1.4 ± 0.1	3934
Βαρύ νερό	75.5 ± 5.5	1.7 ± 0.1	2746
Βηρύλλιο	100.0 ± 2.7	1.6 ± 0.1	1368

^{*} Ανά νετρόνιο πηγής

4.1.3.4 Επιλογή υλικών κατασκευής κατευθυντήρα

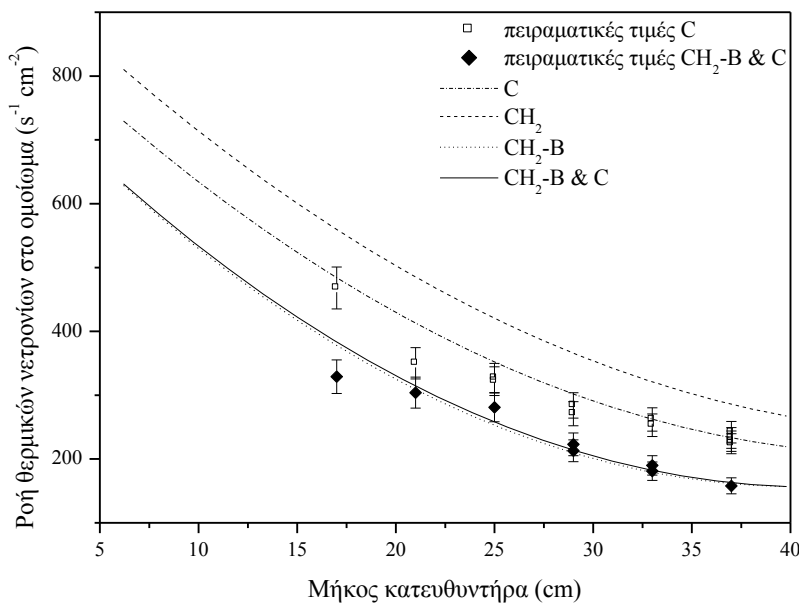
Βάσει των τιμών του Πίνακα 4-5 το βηρύλλιο εξαιρείται ως υλικό κατασκευής κατευθυντήρα λόγω της χαμηλής τιμής του δείκτη ποιότητας σχεδίασης Q , του υψηλού κόστους και τοξικότητας, το δε ‘βαρύ νερό’ λόγω του υψηλού κόστους. Τα υλικά με την υψηλότερη τιμή του Q και για τα οποία υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής κατευθυντήρα είναι το βοριομένο πολυαιθυλένιο, το πολυαιθυλένιο και ο γραφίτης. Επιπρόσθετα, μελετήθηκε η δυνατότητα χρήσης γραφίτη κάτω από την πηγή για τον κατευθυντήρα από βοριομένο πολυαιθυλένιο.

4.1.3.5 Επίδραση του μήκους του κατευθυντήρα στη ροή νετρονίων και στην απορροφούμενη δόση για διαφορετικά υλικά κατασκευής

Στο Σχήμα 4-8 απεικονίζεται η ροή θερμικών νετρονίων ($\Phi_{\text{θερμικών}}$) στον όγκο του ‘πρότυπου ομοιώματος’, όπως υπολογίστηκε με χρήση του κώδικα MCNP4C2, σε συνάρτηση με το μήκος του κατευθυντήρα. Τα υλικά που μελετήθηκαν είναι ο γραφίτης, το πολυαιθυλένιο και

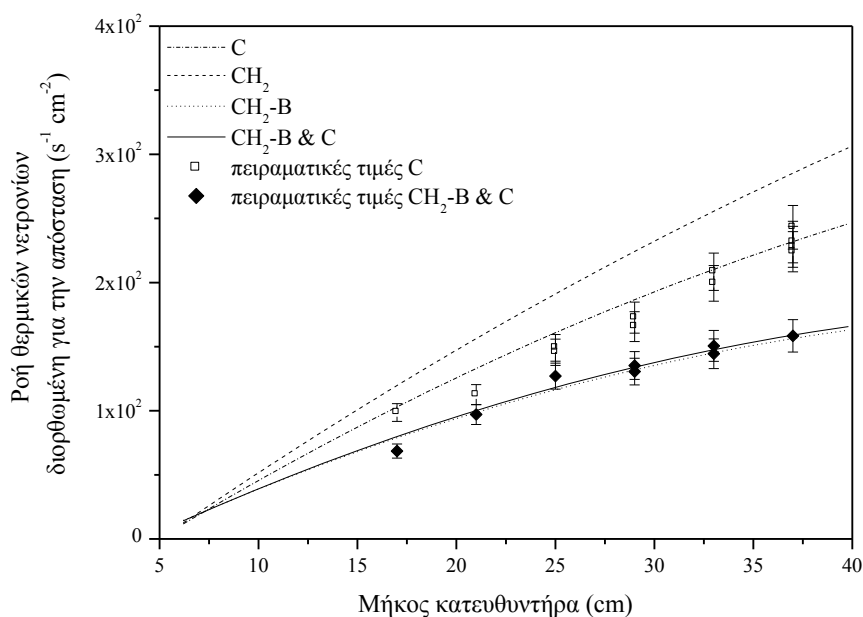
το βοριομένο πολυαιθυλένιο. Επιπλέον, για το τελευταίο υλικό, μελετήθηκε η δυνατότητα χρήσης ανακλαστή τοποθετημένου κάτω από τη πηγή.

Το πολυαιθυλένιο (CH_2) παρέχει την υψηλότερη ροή θερμικών νετρονίων στο ομοίωμα για κάθε μήκος κατευθυντήρα και ακολουθεί ο γραφίτης (C). Το βοριομένο πολυαιθυλένιο ($\text{CH}_2\text{-B}$) παρέχει τη μικρότερη θερμική ροή νετρονίων, καθώς το βόριο απορροφά έντονα τα θερμικά νετρόνια. Η χρήση γραφίτη ως ανακλαστή, ($\text{CH}_2\text{-B \& C}$), δεν παρέχει περισσότερη ροή θερμικών νετρονίων προς το ομοίωμα.



Σχήμα 4-8 Ροή θερμικών νετρονίων στον όγκο ‘πρότυπου ομοιώματος’ για διάφορα υλικά και μήκη κατευθυντήρα όπως προκύπτει από υπολογισμούς με τον MCNP4C2 και πειραματικές μετρήσεις των ‘καθαρών παλμών’ για δύο από τα υλικά για την πηγή $^{239}\text{Pu-Be}$.

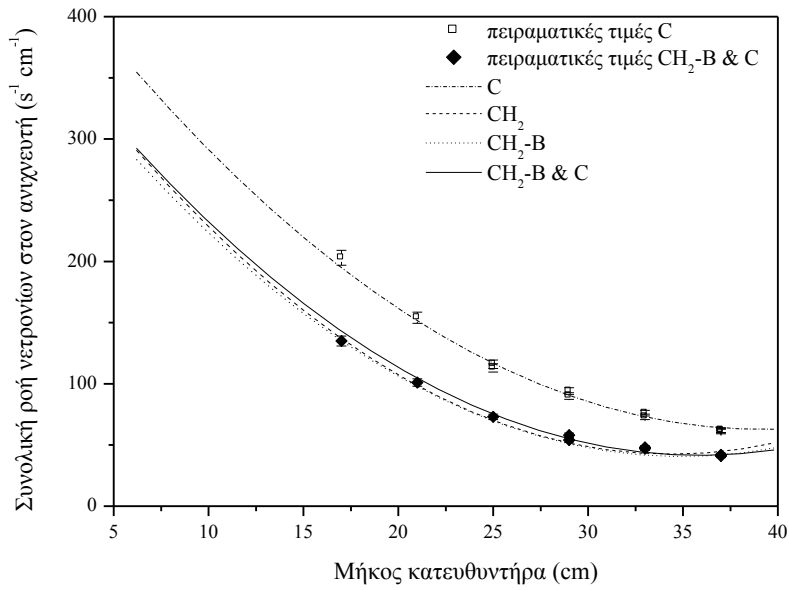
Μεγαλύτερο μήκος κατευθυντήρα αντιστοιχεί, κατασκευαστικά, σε μεγαλύτερη απόσταση πηγής – ομοιώματος, με συνέπεια μείωση της ροής των θερμικών νετρονίων προς το ομοίωμα. Διορθώνοντας για τη μείωση της ροής με το τετράγωνο της απόστασης, αποδίδεται καθαρά η επίδραση του μήκους του κατευθυντήρα στη ροή θερμικών νετρονίων και φαίνεται στο Σχήμα 4-9. Επιπλέον μεγαλύτερο μήκος κατευθυντήρα συνεπάγεται περισσότερες σκεδάσεις και μεγαλύτερη ροή νετρονίων προς το ομοίωμα.



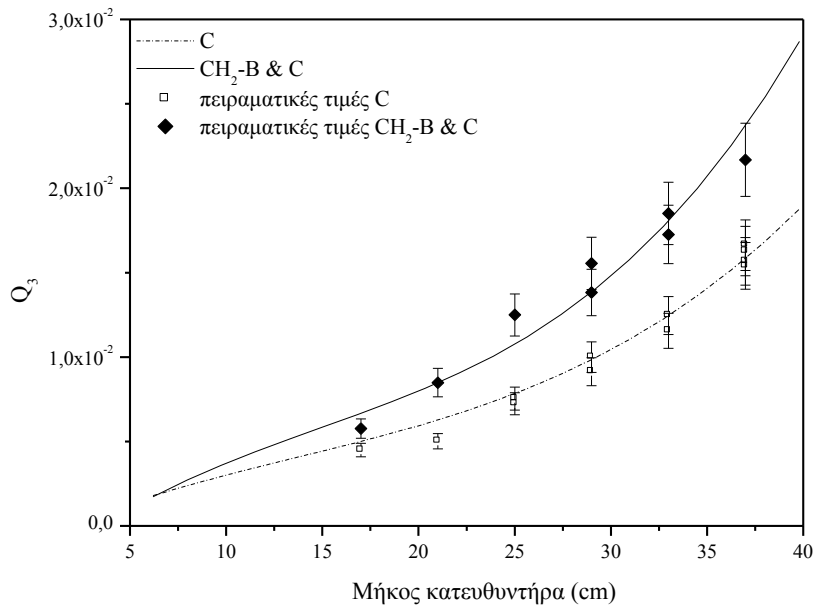
Σχήμα 4-9 Επίδραση του μήκους του κατευθυντήρα στη ροή θερμικών νετρονίων στον όγκο του ‘πρότυπου ομοιώματος’, όπως προκύπτει από υπολογισμούς με τον MCNP4C2 και διορθωμένη για την εξασθένιση με το τετράγωνο της απόστασης για διάφορα υλικά κατευθυντήρα και οι αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

Στο Σχήμα 4-10 απεικονίζεται η συνολική ροή νετρονίων ($\Phi_{\text{συνολική}}$) στον όγκο του ανιχνευτή NaI(Tl) σε συνάρτηση με το μήκος του κατευθυντήρα, για τα διαφορετικά υλικά κατασκευής του. Ο γραφίτης, C, αποδίδει περισσότερη ροή νετρονίων στον ανιχνευτή, ενώ τα υπόλοιπα τρία υλικά έχουν παρόμοια συμπεριφορά κυρίως λόγω της αλληλεπίδρασης του υδρογόνου με τα νετρόνια. Μεγαλύτερη ροή νετρονίων στον ανιχνευτή αυξάνει το υπόβαθρο μέτρησης και το σφάλμα μέτρησης.

Στο Σχήμα 4-11 δίνεται ο δείκτης ποιότητας σχεδίασης Q σε συνάρτηση με το μήκος του κατευθυντήρα, για δύο από τα υλικά κατασκευής. Ο δείκτης ποιότητας σχεδίασης Q γίνεται μέγιστος για μεγαλύτερο μήκος κατευθυντήρα και για το υλικό βοριομένο πολυαιθυλένιο CH₂-B με ανακλαστή από άνθρακα C.



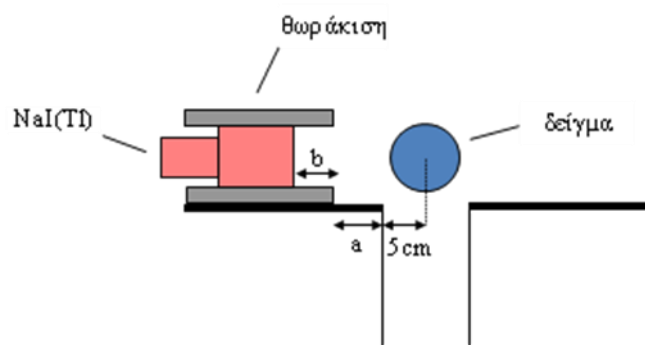
Σχήμα 4-10 Συνολική ροή νετρονίων στον όγκο του ανιχνευτή για διάφορα υλικά και μήκη κατευθυντήρα, όπως προκύπτει από υπολογισμούς με τον MCNP4C2 και πειραματικές μετρήσεις του υποβάθρου για δύο από τα υλικά.



Σχήμα 4-11 Εξάρτηση του παράγοντα Q σχεδίασης από το μήκος του κατευθυντήρα για δύο υλικά κατασκευής του κατευθυντήρα όπως προκύπτει από υπολογισμούς με τον MCNP4C2 και αντίστοιχες πειραματικές τιμές.

4.1.4 Θέση και θωράκιση του ανιχνευτή

Η βέλτιστη θέση του ανιχνευτή NaI(Tl) προσδιορίστηκε με πειραματικές μετρήσεις με μεταβολή της απόστασης ανιχνευτή – δείγματος, που συνεπάγεται και μεταβολή της σχετικής θέσης του ανιχνευτή ως προς τη θωράκισή του. Γενικά, μεγαλύτερη απόσταση σημαίνει λιγότερους παλμούς υποβάθρου, αλλά και λιγότερους ‘καθαρούς’ παλμούς στην ενεργειακή περιοχή του αζώτου, κυρίως λόγω του νόμου του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης και εξαιτίας της καλύτερης θωράκισης του ανιχνευτή ως προς το άνοιγμα του κατευθυντήρα. Ζητούμενο της μελέτης είναι η μεγιστοποίηση του λόγου ‘σήμα προς υπόβαθρο’ με το ελάχιστο στατιστικό σφάλμα μέτρησης των ‘καθαρών’ παλμών για το άζωτο. Στην Εικόνα 4-1 δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση των σχετικών αποστάσεων. Στον Πίνακα 4-7 δίνονται οι μικτοί παλμοί και παλμοί υποβάθρου στην ενεργειακή περιοχή του αζώτου, για δείγμα με διάλυμα αζώτου και όγκου 1.0 L.



Εικόνα 4-1 Σχηματική αναπαράσταση της σχετικής θέσης ανιχνευτή – δείγμα.

Πίνακας 4-7 Παλμοί στην ενεργειακή περιοχή του αζώτου με τον ανιχνευτή NaI(Tl) σε διάφορες αποστάσεις μέσα στη θωράκισή του και ως προς το δείγμα.

α/α θέσης ανιχνευτή	Απόσταση a (cm)	Απόσταση b (cm)	Μικτοί παλμοί G	Παλμοί υποβάθρου B	‘Καθαροί’ παλμοί N	‘Σήμα/υπόβαθρο’ N/B	$\sigma_{\%}(N)$
I	7	3	3321	2316	1005	$0,43 \pm 0,03$	7,5%
II	7	4	2981	2286	695	$0,30 \pm 0,03$	10,4%
III	7	5	2847	1974	873	$0,44 \pm 0,04$	8,0%
IV	8	2	3630	2587	1043	$0,40 \pm 0,03$	7,6%
V	8	3	3179	2230	949	$0,43 \pm 0,03$	7,7%
VI	8	4	2964	2052	912	$0,44 \pm 0,04$	7,8%

Από τους υπολογισμούς του Πίνακα 4-7 φαίνεται ότι για τις συγκεκριμένες μεταβολές της θέσης του ανιχνευτή και για μεγάλο ενεργό όγκο ανιχνευτή δε σημειώνονται μεγάλες μεταβολές στο λόγο ‘σήμα/υπόβαθρο’. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση θέσης ανιχνευτή με αύξοντα αριθμό Π. Επομένως, καθοριστικός παράγοντας για την κατάλληλη θέση ανιχνευτή επιλέγεται να είναι το μεγαλύτερο ‘σήμα’ καθαρών παλμών, N , και το μικρότερο στατιστικό σφάλμα μέτρησης, $\sigma_{σχ}(N)$. Οι συγκεκριμένες συνθήκες εμφανίζονται για απόσταση: άνοιγμα κατευθυντήρα – επιφάνεια ανιχνευτή ίση με 10cm ($a + b = 10$ cm). Σε αυτή την απόσταση, συγκριτικά μεγαλύτερο λόγο N/B δίνει ο συνδιασμός με αύξοντα αριθμό θέσης ανιχνευτή NaI(Tl) I. Αυτός ο συνδιασμός αποτελεί τη θέση επιλογής για τον ανιχνευτή ως προς το άνοιγμα του κατευθυντήρα και τη θωράκιση.

Η θωράκιση του ανιχνευτή επιλέχθηκε έτσι ώστε ο λόγος ‘σήμα προς υπόβαθρο’ να είναι μέγιστος και το σχετικό σφάλμα μέτρησης αζώτου να είναι ελάχιστο. Η μελέτη έγινε για διαφορετικά υλικά (Πίνακας 4-8) και διαφορετικό συνδυασμό υλικών (Πίνακας 4-9) γύρω από τον ανιχνευτή.

Πίνακας 4-8 Υλικά θωράκισης του ανιχνευτή NaI(Tl).

	<i>Υλικά θωράκισης ανιχνευτή</i>
α	ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κομμάτια μολύβδου διαστάσεων 10 cm x 10 cm x 5 cm κάτω από τον ανιχνευτή
β	κυλινδρικός μολύβδινος δακτύλιος πάχους 2.5 cm που καλύπτει περιμετρικά τον ανιχνευτή
γ	φύλλα παραφίνης πάχους 1.0 cm περιμετρικά του ανιχνευτή
δ	φύλλα boroflex TM πάχους 1.5 cm περιμετρικά και 1.0 cm μπροστά από τον ανιχνευτή

Πίνακας 4-9 Παλμοί στην ενεργειακή περιοχή του αζώτου με τον ανιχνευτή NaI(Tl) για διαφορετικό συνδιασμό υλικών θωράκισης.

Θωράκιση ανιχνευτή	Μικτοί παλμοί <i>G</i>	Παλμοί υποβάθρου <i>B</i>	‘Καθαροί’ παλμοί <i>N</i>	‘Σήμα/υπόβαθρο’ <i>N/B</i>	$\sigma_{σχ}(N)$
$\gamma + \delta$	3593	2524	1069	$0,42 \pm 0,04$	7,3%
$\beta + \gamma + \delta$	3358	2228	1130	$0,51 \pm 0,05$	6,6%
$\alpha + \gamma + \delta$	3874	2905	969	$0,33 \pm 0,03$	8,5%
$\alpha + \beta + \gamma + \delta$	3559	2412	1147	$0,48 \pm 0,05$	6,7%

Από τις τιμές του Πίνακα 4-9 φαίνεται ότι η προσθήκη του κυλινδρικού μολύβδινου δακτυλίου γύρω από τον ανιχνευτή μειώνει το υπόβαθρο μέτρησης περισσότερο από άλλες μεταβολές και αυξάνει το λόγο ‘σήμα/υπόβαθρο’. Η προσθήκη μιάς σειράς μολύβδινων κομματιών κάτω από τον ανιχνευτή δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα τις μετρήσεις αζώτου. Τα φύλλα παραφίνης και boroflexTM δεν αφαιρέθηκαν κατά τις μετρήσεις γιατί προστατεύουν τον ανιχνευτή από τα νετρόνια. Η βέλτιστη θωράκιση που επιλέχθηκε είναι ο συνδιασμός υλικών $\alpha + \beta + \gamma + \delta$.

4.2 ΤΥΠΙΚΟ ΦΑΣΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ NaI(Tl)

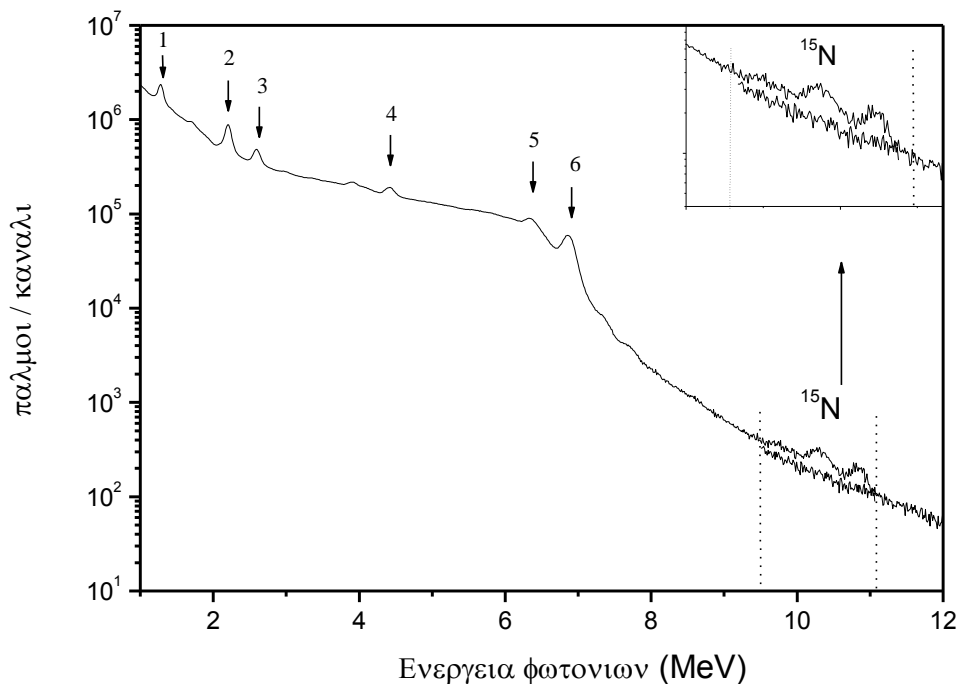
Ένα τυπικό φάσμα ακτίνων- γ που συλλέγεται από τον ανιχνευτή NaI(Tl) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-12. Το ακτινοβολούμενο δείγμα είναι ένα κυλινδρικό ομοίωμα «ισοδύναμο μαλακού ιστού» όγκου 1.00 L και με συγκέντρωση αζώτου 10.9 % κ.β. Το φάσμα υποβάθρου στην περιοχή του αζώτου αντιστοιχεί σε κυλινδρικό ομοίωμα σύστασης TEQ4 του Πίνακα 3-5. Χρησιμοποιώντας διάλυμα αντίστοιχης σύστασης ελεύθερο αζώτου για τη μέτρηση του υποβάθρου στην περιοχή του αζώτου, λαμβάνουμε υπόψη την προσαύξηση λόγω παρεμβολής κορυφών από το υδρογόνο και τα άλλα μή αζωτούχα στοιχεία του σώματος στην ενεργειακή περιοχή του αζώτου.

Οι βασικές κορυφές υποβάθρου είναι:

1. 0.48 MeV, από την αποδιέγερση του $^{11}\text{Li}^*$ μέσω της αντίδρασης $^{10}\text{B}(n,\gamma)^{11}\text{Li}^*$. Το βόριο υπάρχει στη διάταξη ως υλικό θωράκισης. Το ^{11}Li που σχηματίζεται σε ποσοστό 94% στη διεγερμένη κατάσταση. Αποδιεγείρεται σε σχετικά μικρό χρόνο υποδιπλασιασμού ($\sim 10^{-13}$ s) στη βασική του στάθμη εκπέμποντας ακτινοβολία 0.48 MeV. [Knoll G. 1979]
2. 1.29 MeV, η οποία είναι χαρακτηριστική του ^{41}Ar . Προέρχεται από ενεργοποίηση του αργού στον αέρα, κυρίως λόγω λειτουργίας του πυρηνικού αντιδραστήρα σχάσης στον ίδιο χώρο.
3. 2.22 MeV, από τη σύλληψη θερμικών νετρονίων του ^1H μέσω της αντίδρασης $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$. Υδρογόνο υπάρχει στο δείγμα και στα υλικά της θωράκισης της διάταξης.
4. 4.44 MeV, από την αποδιέγερση του $^{12}\text{C}^*$. Ο ^{12}C σχηματίζεται σε διεγερμένη κατάσταση μετά την αντίδραση $^9\text{Be}(\alpha,n)^{12}\text{C}^*$ στην πηγή και μετά την ανελαστική σκέδαση νετρονίων στον άνθρακα των υλικών της διάταξης $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)^{12}\text{C}^*$.
5. 6.3 MeV, πιθανόν η κορυφή μονής διαφυγής (single escape peak) των κορυφών που αθροίζονται στην ενεργειακή περιοχή 6.81 – 6.88 MeV. Για φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από ~ 3 MeV, η δίδυμη γένεση είναι εξίσου σημαντικό φαινόμενο αλληλεπίδρασης με το υλικό του NaI όσο και το φαινόμενο Compton. Όταν το ^{128}I αποδιεγείρεται, εκπέμπει πολλά φωτόνια με ενέργεια πάνω από το κατώφλι για δίδυμη γένεση [Lone 1981].
6. 6.88 MeV, η οποία είναι μια σύνθετη κορυφή. Νετρόνια από την πηγή θερμοποιούνται στον κρύσταλλο NaI και αλληλεπιδρούν μέσω αντιδράσεων σύλληψης θερμικών νετρονίων: $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ και $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$. Το ^{128}I αποδιεγείρεται παράγοντας μια ακολουθία ακτίνων-γ από τα ενδιάμεσα επίπεδα μέχρι τη βασική στάθμη. Πρόκειται για πολλά φωτόνια που έχουν σχετικά μικρό χρόνο εκπομπής και λόγω σύμπτωσής τους στον ανιχνευτή συλλέγονται ως μία στα 6.88 MeV [Lone 1981]. Μια παρόμοια διαδικασία συμβαίνει με την αποδιέγερση του ^{23}Na και δίνει μια κορυφή στα 6.96 MeV. Η κορυφή από το ^{128}I κυριαρχεί επί της κορυφής του ^{23}Na για δύο λόγους. Πρώτον, η ενεργός διατομή

σύλληψης θερμικών νετρονίων του ^{127}I (6.6 barn) είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του ^{23}Na (0.534 barn) στην περιοχή ενεργειών από $(0.025 - 10^6)$ eV. Δεύτερον, το ^{24}Na αποδιεγείρεται με ακτίνες-γ υψηλότερων ενεργειών (όπως 6.395 MeV, 3.982 MeV) και λόγω αυξημένης πιθανότητας διαφυγής ορισμένων από αυτές, δεν εναποτίθεται η συνολική ενέργεια στον κρύσταλλο [Shafroth 1958].

Η περιοχή ολοκλήρωσης του αζώτου (9.50 – 11.1) MeV φαίνεται σε μεγέθυνση στο Σχήμα 4-12 και περιλαμβάνει τις άμεσες ακτίνες-γ (10.83 MeV) του αζώτου, καθώς και τις ακτίνες μονής και διπλής διαφυγής (10.32 MeV και 9.81 MeV αντίστοιχα). Αντίστοιχο φάσμα ακτίνων-γ για βιολογικό υλικό με συγκέντρωση αζώτου 3.0 % κ.β. δίνεται στην παράγραφο 4.6 (Σχήμα 4-18).



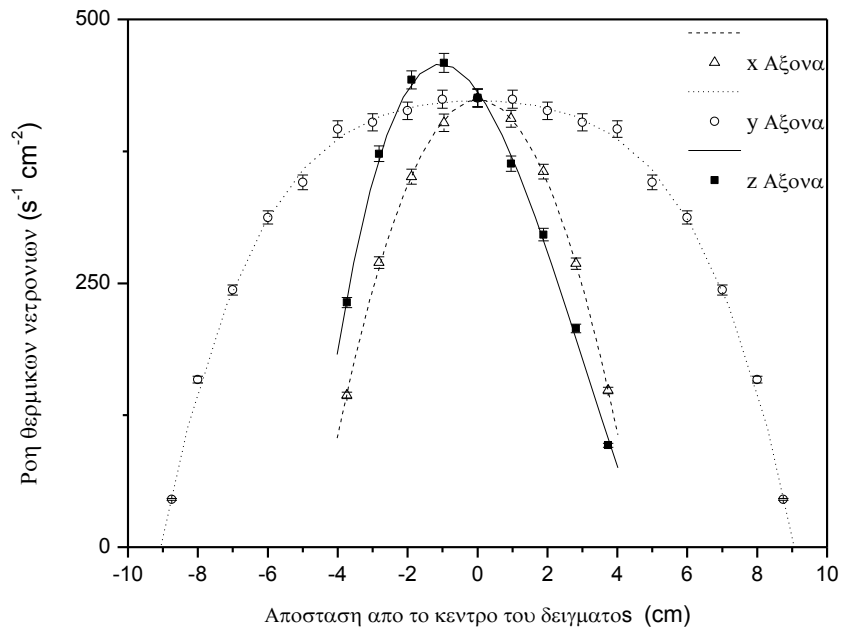
Σχήμα 4-12 Τυπικό φάσμα ακτίνων-γ, όπως ανιχνεύεται από σπινθηριστή NaI(Tl) για κυλινδρικό ομοίωμα ‘ισοδύναμο ιστού’ όγκου 1.0 L και συγκέντρωσης αζώτου 10.9 % κ.β.

4.3 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

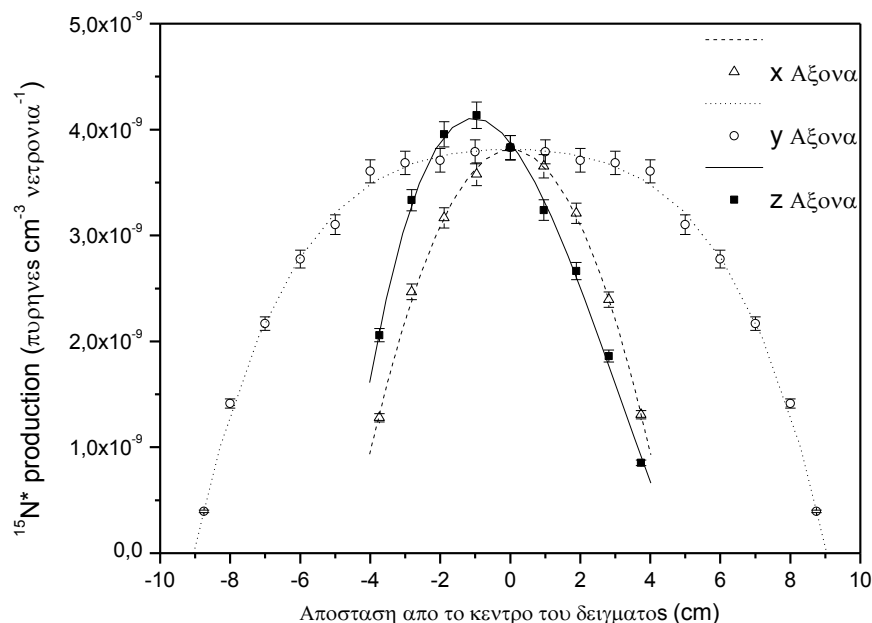
Στο Σχήμα 4-13 σχεδιάστηκε η κατανομή της ροής θερμικών νετρονίων στους τρεις κύριους άξονες κυλινδρικού ομοιώματος (πρότυπο ομοίωμα), σε συνάρτηση με την απόσταση από το κέντρο του ομοιώματος, όπως υπολογίστηκε με χρήση του κώδικα MCNP4C2. Ως άξονας y θεωρήθηκε ο κύριος άξονας του κυλίνδρου, ως x ο οριζόντιος που αποτελεί και κύριο άξονα του ανιχνευτή και ως άξονας z ο κατακόρυφος. Οι υπολογισμοί αφορούν σε όγκο ομοιώματος 1.0 L.

Η ροή θερμικών νετρονίων είναι συμμετρική ως προς τα κατακόρυφα επίπεδα που διέρχονται από τους άξονες x και y και ελαττώνεται στα άκρα του ομοιώματος για δυο λόγους: πρώτον το υλικό σκέδασης είναι λιγότερο άρα η συνεισφορά στη ροή από τις γύρω περιοχές του ομοιώματος είναι μειωμένη και δεύτερον επειδή η απευθείας ροή από την πηγή στα άκρα είναι μειωμένη εξαιτίας της μεγαλύτερης απόστασης. Στην είσοδο του ομοιώματος η θερμική ροή είναι μειωμένη (~53% του μεγίστου) και αυξάνεται σταδιακά με το βάθος εξαιτίας της θερμοποίησης των νετρονίων μετά από αλληλεπιδράσεις με το υλικό του ομοιώματος. Η μέγιστη τιμή ροής θερμικών νετρονίων βρέθηκε σε βάθος 3.2 cm στο κυλινδρικό ομοίωμα. Για μεγαλύτερα βάθη βρέθηκε ότι η ροή θερμικών νετρονίων μειώνεται λόγω εξασθένησης της δέσμης νετρονίων από τις αλληλεπιδράσεις και σε μικρότερο βαθμό λόγω μεγαλύτερης απόστασης από την πηγή. Στην έξοδο του ομοιώματος η ροή μειώνεται στο ~21% του μεγίστου, κυρίως λόγω εξασθένησης της δέσμης και μειωμένων σκεδάσεων (μειωμένο υλικό στην περιοχή).

Επομένως η ροή θερμικών νετρονίων δεν είναι ομογενής μέσα στο δείγμα και κατ' επέκταση η ενεργοποίηση των πυρήνων ^{15}N δεν είναι ομογενής. Η κατανομή των ενεργοποιημένων πυρήνων ^{15}N στους τρεις κύριους άξονες φαίνεται στο Σχήμα 4-14.



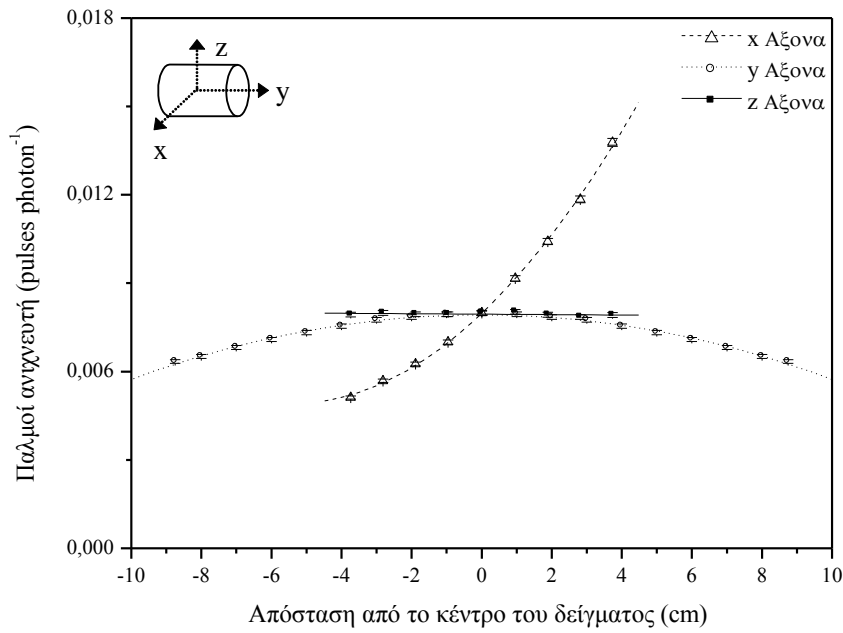
Σχήμα 4-13 Ροή θερμικών νετρονίων σε συνάρτηση με την απόσταση από το γεωμετρικό κέντρο του ομοιώματος κατά μήκος των κύριων αξόνων συμμετρίας, όπως προκύπτει από υπολογισμούς με χρήση του MCNP4C2.



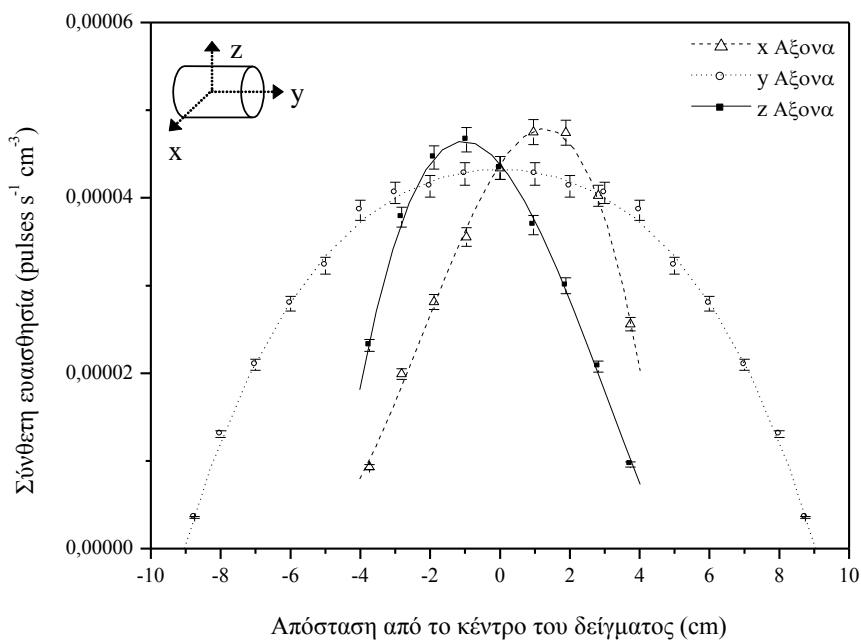
Σχήμα 4-14 Αριθμός ενεργοποιημένων πυρήνων $^{15}\text{N}^*$ σε συνάρτηση με την απόσταση από το γεωμετρικό κέντρο του ομοιώματος κατά μήκος των κύριων αξόνων συμμετρίας, όπως προκύπτει από υπολογισμούς με χρήση του MCNP4C2.

Το Σχήμα 4-15 δείχνει την απόδοση του ανιχνευτή στη συλλογή των φωτονίων ενέργειας 10.83MeV κατά μήκος των τριών κύριων αξόνων του ομοιώματος, όπως υπολογίστηκαν με χρήση του κώδικα MCNP4C2. Η απόδοση ανίχνευσης είναι πρακτικά σταθερή κατά μήκος του άξονα z. Κατά μήκος του άξονα y είναι κατά ~25% μειωμένη στα άκρα του ομοιώματος σε σχέση με την τιμή στο κέντρο του ομοιώματος, κυρίως λόγω εξασθένησης με το τετράγωνο της απόστασης και κατά δεύτερον λόγω αυτοαπορρόφησης στο ομοίωμα. Κατά μήκος του άξονα x, η απόδοση ανίχνευσης διαφέρει έντονα ως αποτέλεσμα της διαφορετικής στερεάς γωνίας, της διαφορετικής απόστασης από την επιφάνεια του ανιχνευτή και της αυτοαπορρόφησης στο ομοίωμα.

Στο Σχήμα 4-16 απεικονίζεται η σύνθετη ευαισθησία ενεργοποίησης και ανίχνευσης ακτίνων-γ κατά μήκος των τριών κύριων αξόνων του ομοιώματος όγκου 1.0 L. Από το σχήμα φαίνεται ότι υποεκτιμάται η συγκέντρωση αζώτου στην επιφάνεια του ομοιώματος. Για παράδειγμα, κατά μήκος του άξονα x και του z, η απόδοση ανίχνευσης διαφέρει έντονα (μεταβολές ως σχεδόν κατά παράγοντα του 4).



Σχήμα 4-15 Απόκριση του ανιχνευτή σε συνάρτηση με την απόσταση από το γεωμετρικό κέντρο του ομοιώματος κατά μήκος των κύριων αξόνων συμμετρίας, όπως προκύπτει από υπολογισμούς με χρήση του MCNP4C2.

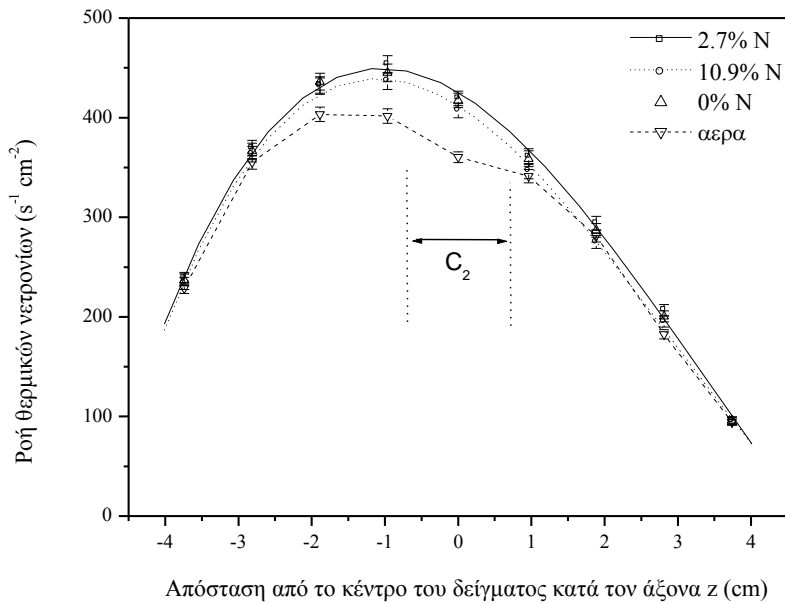


Σχήμα 4-16 Σύνθετη ευαισθησία ενεργοποίησης και ανίχνευσης σε συνάρτηση με την απόσταση από το γεωμετρικό κέντρο του ομοιώματος κατά μήκος των κύριων αξόνων συμμετρίας, όπως προκύπτει από υπολογισμούς με χρήση του MCNP4C2.

4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΙΩΝ

Η παρουσία ανομοιογένειας στο εσωτερικό του δείγματος ενδέχεται να προκαλεί διαταραχή στην κατανομή της ροής θερμικών νετρονίων στο δείγμα.

Στο Σχήμα 4-17 απεικονίζεται η επίδραση του υλικού ανομοιογένειας στη ροή θερμικών νετρονίων γύρω από το κέντρο του δείγματος κατά τον άξονα z. Το ομοίωμα, όγκου 1.0 L, αποτελείται από υλικό 'ισοδύναμο ιστού' (TEQ1, παραγράφος 3.2.7) και οι αξονικές ανομοιογένειες που μελετήθηκαν, διαμέτρου 1.8 cm, αφορούν διαφορετικές συγκεντρώσεις αζώτου από 0% μέχρι 10.9% (υλικά TEQ1 - TEQ2 - TEQ3 - TEQ4, παραγράφος 3.2.7). Από το σχήμα φαίνεται ότι οι διαφορές στην κατανομή της θερμικής ροής για εσωτερική ανομοιογένεια περιεκτικότητας αζώτου 0.0% ή 10.9% είναι συγκρίσιμες με το στατιστικό σφάλμα των τιμών. Σημαντική διαταραχή στην κατανομή της ροής όμως παρατηρείται για ανομοιογένεια σύστασης αέρα. Η θερμική ροή στο κέντρο του δείγματος είναι περίπου 15% μικρότερη από την αντίστοιχη σε ομοιογενές δείγμα περιεκτικότητας αζώτου 2.7%, ενώ η συνολική ροή θερμικών νετρονίων στο ομοίωμα είναι ~7% μικρότερη όταν το ομοίωμα περιέχει ανομοιογένεια αέρα. Μια τέτοια ανομοιογένεια αφορά τον αέρα στους πνεύμονες του σώματος μικρών ζώων και σ' αυτήν την περίπτωση πρέπει να γίνει επιπλέον διόρθωση.



Σχήμα 4-17 Κατανομή της ροής θερμικών νετρονίων σε ομοίωμα ‘ισοδύναμου ιστού’ με αξονική ανομοιογένεια στη συγκέντρωση αζώτου και σε συνάρτηση με την απόσταση από το κέντρο του ομοιώματος κατά μήκος του άξονα z. Οι τιμές υπολογίστηκαν με τον MCNP4C2.

4.5 AIR KERMA FREE-IN-AIR

Οι τιμές του air Kerma free-in-air στην έξοδο του κατευθυντήρα, στο σημείο που αντιστοιχεί στο κέντρο του ομοιώματος, χωρίς ομοίωμα, όπως υπολογίστηκαν στην παράγραφο 3.2.5.2, δίνονται στον Πίνακα 4-10.

Πίνακας 4-10 Τιμές air Kerma free-in-air από νετρόνια και φωτόνια για 2 διαφορετικές αποστάσεις πηγής – σημείο υπολογισμού, μέσω του κώδικα MCNP4C2.

Μήκος κατευθυντήρα (cm)	Απόσταση πηγής – σημείο υπολογισμού (cm)	$K_{\text{air}}^{\text{free-in-air}}$ (cGy/h) από νετρόνια	$K_{\text{air}}^{\text{free-in-air}}$ (cGy/h) από φωτόνια
22	48.9	0.009 ± 0.001	0.00144 ± 0.00005
34	60.9	0.006 ± 0.002	0.00094 ± 0.00004

Παρατηρούμε ότι η συνεισφορά των νετρονίων στο συνολικό ρυθμό δόσης στη θέση του δείγματος είναι περίπου εξαπλάσια αυτής των φωτονίων. Η συμμετοχή του υδρογόνου στη

συνολική δόση σε ιστούς φτάνει το 85% εξ' αιτίας των ελαστικών σκεδάσεων νετρονίων ενέργειας από 250 keV έως 14 MeV. Σε χαμηλότερες ενέργειες νετρονίων, η συμμετοχή του υδρογόνου είναι μέχρι και 97% λόγω της μεγάλης ενέργειας ανάκρουσης του υδρογόνου [Auxier J.A. 1969].

4.6 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ

4.6.1 Σε διαλύματα αζώτου

Στον Πίνακα 4-11 δίνονται οι μετρήσεις αζώτου για εννέα διαλύματα γνωστής περιεκτικότητας σε άζωτο και οι τιμές του διορθωτικού παράγοντα για τον όγκο, για όγκους 0.25, 0.50 και 1.00 L. Οι τιμές του πίνακα αφορούν την ποσοστιαία κατά βάρος περιεκτικότητα σε άζωτο των διαλυμάτων αζώτου του Πίνακα 3-5 και το σφάλμα μέτρησής τους.

Πίνακας 4-11 Τιμές % κ.β. συγκέντρωσης N σε μίγματα αζώτου γνωστής περιεκτικότητας, όπως μετρήθηκαν με την τεχνική της AANE και τιμές του διορθωτικού παράγοντα για τον όγκο όπως υπολογίστηκαν με τον κώδικα MCNP4C2.

Όγκος δείγματος (L)	Διορθωτικός παράγοντας	% κ.β. Αζωτο		
		2.7	5.5	10.9
0.25	0.51 ± 0.01	2.9 ± 0.4	5.7 ± 0.4	9.5 ± 0.6
0.50	0.71 ± 0.01	2.6 ± 0.3	5.2 ± 0.4	9.2 ± 0.6
1.00	1.00 ± 0.01	2.9 ± 0.2	5.6 ± 0.3	9.5 ± 0.6

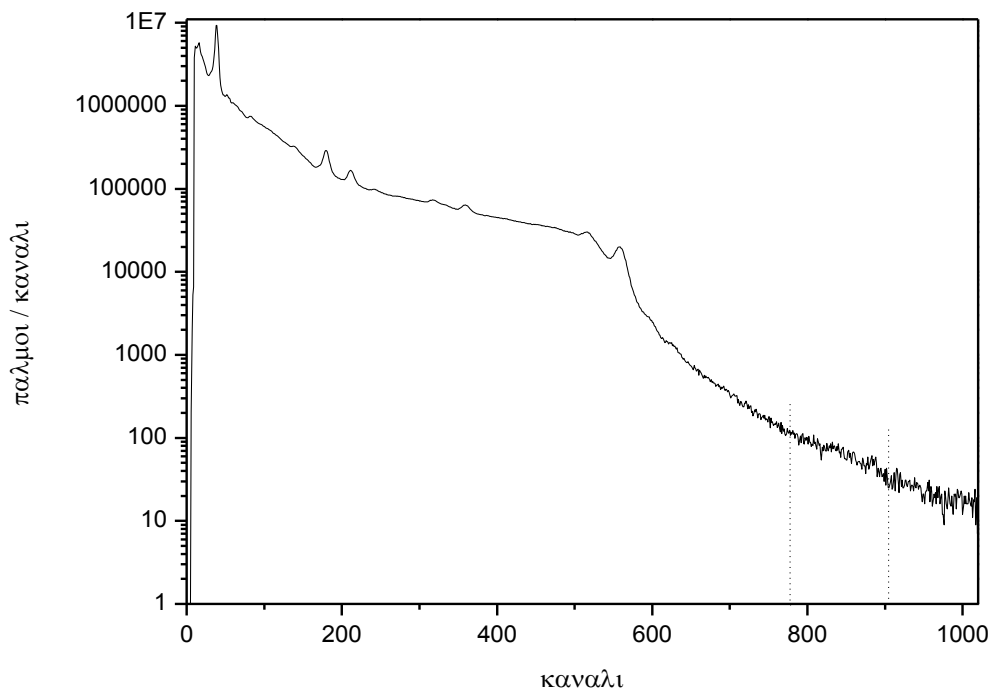
Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των ονομαστικών τιμών, για τα μίγματα με άζωτο 2.7% κ.β. και 5.5% κ.β., είναι μέσα στο στατιστικό σφάλμα μέτρησης. Για την ακραία τιμή στη συγκέντρωση αζώτου, 10.9% κ.β., οι αποκλίσεις είναι 12.8%, 15.5% και 12.8% για τους όγκους 0.25, 0.50 και 1.00 L, αντίστοιχα. Η μεγάλη συγκέντρωση στο δείγμα ενός στοιχείου όπως το άζωτο, που συνεισφέρει έντονα στην απορρόφηση των θερμικών νετρονίων, επιφέρει μεταβολή στην κατανομή της θερμικής ροής νετρονίων στο δείγμα σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή για το πρότυπο ομοίωμα. Υπολογισμοί μέσω του κώδικα MCNP4C2, σε ομοιώματα συγκέντρωσης 10.9% κ.β., δείχνουν μείωση της θερμικής ροής

νετρονίων κατά 10% περίπου, συγκρινόμενο με ομοίωμα συγκέντρωσης 2.7% σε άζωτο. Αυτή η υποεκτίμηση στη συγκέντρωση αζώτου πειραματικά, μπορεί να διορθωθεί μέσω του υπολογιστικού μοντέλου της διάταξης για τη διαφορετική ροή θερμικών νετρονίων στο ομοίωμα. Παρόλα αυτά, τιμές στη συγκέντρωση αζώτου τόσο υψηλές είναι εκτός του εύρους των αναμενόμενων τιμών για βιολογικά δείγματα. Συγκεκριμένα, οι τυπικές τιμές συγκέντρωσης αζώτου στον άνθρωπο είναι περίπου 0.8% σε λιπώδεις ιστούς, 2.7% σε σκελετικούς μύες, 4.2% σε οστά και 2.4% ως η μέση τιμή σε όλο το σώμα.

Το σφάλμα μέτρησης αζώτου κυριαρχείται από το στατιστικό σφάλμα μέτρησης των 'καθαρών' παλμών του αζώτου και εξαρτάται κυρίως από τη χρονική διάρκεια μέτρησης. Το στατιστικό σφάλμα κυμαίνεται από 3.7% έως 6.5% για τη μέτρηση των διαλυμάτων αζώτου. Το συνολικό σφάλμα στη μέτρηση της μάζας του αζώτου περιλαμβάνει: το σφάλμα υπολογισμού του παράγοντα βαθμονόμησης και το σφάλμα στον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή για τον όγκο και υπολογίζεται από την εξίσωση διάδοσης σφάλματος. Για διάλυμα 2.7% κ.β. Ν όγκου 1.0 L το συνολικό σχετικό σφάλμα μέτρησης αζώτου είναι περίπου 8.3%. Σε αυτόν τον υπολογισμό πρέπει να προστεθεί το σφάλμα επανατοποθέτησης του δείγματος, που εκτιμάται από το συντελεστή μεταβλητότητας επαναλήψιμων μετρήσεων, CV, και κυμαίνεται από 0.1% έως 1.0%.

4.6.2 Σε δείγματα ομογενοποιημένου κρέατος

Στο Σχήμα 4-18 δίνεται ένα φάσμα ακτίνων-γ που συλλέγεται από τον ανιχνευτή NaI(Tl) για το δείγμα «γλουτός και μπούτι χοιρινού κρέατος».



Σχήμα 4-18 Φάσμα ακτίνων-γ, όπως ανιχνεύεται από σπινθηριστή NaI(Tl) για δείγμα «γλουτός και μπούτι χοιρινού κρέατος» μάζας 1002 g.

Στον Πίνακα 4-12 δίνονται οι τιμές αζώτου (% κατά βάρος συγκέντρωση) σε νωπά δείγματα ομογενοποιημένου κρέατος, όπως μετρήθηκαν με τις τεχνικές AANE, καύση Dumas και Kjeldahl.

Το σφάλμα μέτρησης αζώτου με την τεχνική της AANE οφείλεται κυρίως στο στατιστικό σφάλμα μέτρησης του ρυθμού των ‘καθαρών’ παλμών. Το γεγονός ότι οι μικτοί παλμοί είναι μόλις 10% περισσότεροι από τους παλμούς του υποβάθρου, οδηγεί σε στατιστικό σχετικό σφάλμα μέτρησης του ρυθμού των ‘καθαρών’ παλμών που κυμαίνεται από 5.5% έως 6.3% για τα δείγματα ομογενοποιημένου κρέατος. Το ολικό σφάλμα στον υπολογισμό της ποσότητας αζώτου στα δείγματα, που υπολογίζεται από την εξίσωση διάδοσης σφαλμάτων και περιέχει το σφάλμα υπολογισμού του παράγοντα βαθμονόμησης, ανέρχεται σε τιμές από 7.7% έως 8.3%. Σε αυτή την εκτίμηση σφάλματος δεν έχει συμπεριληφθεί το σφάλμα επανατοποθέτησης του δείγματος στη θέση ακτινοβολήσης. Υπολογίζοντας την τυπική απόκλιση για κάθε ομάδα μετρήσεων από τη μέση τιμή τους, έχουμε και μια εκτίμηση του

σφάλματος επανατοποθέτησης, που περιέχει και το στατιστικό σφάλμα. Ο συντελεστής μεταβλητότητας, CV, αποτελεί ένα δείκτη επαναληψιμότητας των μετρήσεων και έχει την τιμή 2.2% για τη μέτρηση του ρυθμού παλμών υποβάθρου, ενώ κυμαίνεται από 1.1% έως 2.5% για τη μέτρηση του ρυθμού μικτών παλμών.

Πίνακας 4-12 Συγκριτικές μετρήσεις της % κατά βάρος συγκέντρωσης αζώτου για δείγματα ομογενοποιημένου κρέατος με τις τεχνικές AANE, Καύση Dumas και Kjeldahl. Παράγοντας βαθμονόμησης $F_{st} = (0.00112 \pm 0.00006)$ cps/gN.

<i>Δείγμα</i>	<i>% N (κ.β.)</i>		
	<i>AANE</i>	<i>Καύση Dumas</i>	<i>Kjeldahl</i>
Γλουτός βοδινού κρέατος	3.2 ± 0.2	3.3 ± 0.2	3.3 ± 0.3
Σπάλα βοδινού κρέατος	2.9 ± 0.2	2.8 ± 0.2	2.9 ± 0.3
Λαιμός βοδινού κρέατος	2.8 ± 0.2	2.9 ± 0.2	3.0 ± 0.3
Γλουτός και μπούτι χοιρινού κρέατος	3.0 ± 0.2	3.1 ± 0.2	3.1 ± 0.3

Η σύγκριση των τιμών κατά ζεύγη των αποτελεσμάτων της AANE με τα αποτελέσματα της Kjeldahl και της καύσης Dumas στο μικρό στατιστικό δείγμα ομοιογενούς βιολογικού δείγματος που μελετήθηκε, μέσω του t-test ζευγαρωτών παρατηρήσεων, δεν έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p = 0.39$ και 0.09 αντίστοιχα). Η μέγιστη απόκλιση που παρατηρήθηκε ήταν μεταξύ της AANE και της Kjeldahl τεχνικής για κρέας από λαιμό βοδιού (7%), και είναι συγκρίσιμο με το σφάλμα των μετρήσεων με AANE.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πειραματική διάταξη άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση που αναπτύχθηκε με την παρούσα μελέτη, έχει ως σκοπό τη μέτρηση του συνολικού αζώτου στο σώμα μικρών ζώων και σε βιολογικά δείγματα όγκου από περίπου 0.2 ως 1.5 L. Για το σκοπό αυτό, ο σχεδιασμός της διάταξης και η βαθμονόμησή της έγιναν για δείγματα σύστασης παραπλήσιας ζωικού ιστού, όγκου 0.25, 0.5 και 1.0 L. Κατάλληλος σχεδιασμός της διάταξης αποδίδει τη βέλτιστη ροή θερμικών νετρονίων στο δείγμα και το μικρότερο δυνατό υπόβαθρο μέτρησης, ώστε το στατιστικό σφάλμα μέτρησης αζώτου να είναι μικρό. Επιπλέον, μικρός χρόνος ακτινοβόλησης περιορίζει την απορροφούμενη δόση στο δείγμα, η οποία είναι σημαντική παράμετρος στις *in vivo* μετρήσεις.

5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

5.2.1 Επιλογή πηγής ακτινοβόλησης

Η πηγή ακτινοβόλησης για μια διάταξη AANE πρέπει να παρέχει ικανή ροή θερμικών και επιθερμικών νετρονίων στον όγκο του δείγματος ώστε, πρώτον το στατιστικό σφάλμα

μέτρησης να είναι μειωμένο και δεύτερον ο χρόνος μέτρησης να είναι μικρός και ταυτόχρονα οι δόσεις στο δείγμα και στον περιβάλλοντα χώρο να είναι μικρές.

Τα ενεργειακά φάσματα των πηγών $^{239}\text{Pu-Be}$ και $^{241}\text{Am-Be}$ είναι παραπλήσια και οι μέσες ενέργειες νετρονίων διαφέρουν ελάχιστα. Ως εκ τούτου, οι κατανομές ροής νετρονίων στο δείγμα είναι παρόμοιες, όπως και η κατανομή δόσης.

Η πηγή ^{252}Cf παρέχει υψηλότερη ροή θερμικών νετρονίων στον όγκο του δείγματος από την πηγή $^{241}\text{Am-Be}$ και προσδίδει μικρότερη απορροφούμενη δόση στο δείγμα ανά εκπεμπόμενο νετρόνιο. Η δόση στο δείγμα είναι μικρότερη κυρίως γιατί η πηγή ^{252}Cf στερείται της εκπομπής των φωτονίων ενέργειας 4.43 MeV, τα οποία εκπέμπονται από τις πηγές τύπου $(\alpha, n)\text{Be}$ ($^{241}\text{Am-Be}$, $^{239}\text{Pu-Be}$), η δε μέση ενέργεια νετρονίων που εκπέμπονται είναι μικρότερη. Επιπρόσθετα, η πηγή ακτινοβολίας πρέπει να παρέχει τη μικρότερη ροή νετρονίων προς τον ανιχνευτή, ώστε το υπόβαθρο μέτρησης να διατηρείται χαμηλό και το στατιστικό σφάλμα μέτρησης να είναι μικρό. Οι McNeill και συν. παρατήρησαν μείωση του υποβάθρου μέτρησης και αύξηση του λόγου 'σήμα προς υπόβαθρο' όταν αντικατέστησαν την ισοτοπική πηγή τύπου $(\alpha, n)\text{Be}$ με πηγή ^{252}Cf [McNeill K.G. 1989]. Η μείωση του υποβάθρου αποδίδεται κυρίως στην έλλειψη στο ^{252}Cf της ακτινοβολίας-γ φωτονίων 4.43 MeV, αφού η κύρια πηγή υποβάθρου για την περιοχή μέτρησης αζώτου είναι η συνάθροιση κορυφών (pile-up) των φωτονίων ενέργειας από 4 έως 7 MeV. Αύξηση του λόγου 'σήμα προς υπόβαθρο' παρατήρησαν επίσης οι Allen και συν. και οι Krishnan και συν. αντικαθιστώντας την πηγή $^{238}\text{Pu-Be}$ με πηγή ^{252}Cf [Allen B.J. 1986, Krishnan S.S. 1990]. Το βασικό μειονέκτημά της είναι ο μικρός χρόνος ημιζωής (2.65 y) που συνδυάζεται με το υψηλό κόστος κτήσης και διαχείρισης μετά τη χρήση. Αντίθετα, οι πηγές $^{241}\text{Am-Be}$ ή $^{239}\text{Pu-Be}$ έχουν μεγαλύτερους χρόνους ημιζωής και είναι οικονομικά πιο συμφέρουσες. Υπενθυμίζεται ότι αναλυτική σύγκριση των πηγών ^{252}Cf και $^{238}\text{Pu-Be}$ σε διατάξεις AANE δίνεται από τους Morgan και συν. και Stamatelatos και συν. [Morgan W.D. 1981, Stamatelatos I.E. 2004].

Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση, που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, ήταν πηγή $^{239}\text{Pu-Be}$ λόγω διαθεσιμότητας.

5.2.2 Επιλογή υλικού και μήκους κατευθυντήρα

Ο κατευθυντήρας σκοπό έχει να περιορίσει και αν είναι δυνατόν να κατευθύνει τη δέσμη νετρονίων προς την περιοχή του δείγματος. Το υλικό κατασκευής του πρέπει να σκεδάζει κατά το μέγιστο δυνατό τρόπο τα νετρόνια της πηγής προς το δείγμα και η ακτινοβολήση να είναι κατά το δυνατόν ομοιογενής. Βρέθηκε ότι το υλικό που παρέχει τη μεγαλύτερη ροή θερμικών νετρονίων, για δείγματα όγκου της τάξης του 1.0 L, είναι το βηρύλλιο και έπονται το 'βαρύ νερό' και το πολυαιθυλένιο. Από αυτά τα υλικά, το βηρύλλιο είναι ιδιαίτερα τοξικό ενώ το 'βαρύ νερό' έχει υψηλό κόστος. Το πολυαιθυλένιο για δείγματα τέτοιου μεγέθους δεν έχει καλή ομοιογένεια στην κατανομή της θερμικής ροής στον όγκο του ομοιώματος. Τα υλικά που παρέχουν την καλύτερη ομοιογένεια της θερμικής ροής κατά μήκος της κεντρικής διαμέτρου του ομοιώματος είναι ο γραφίτης και το βοριομένο πολυαιθυλένιο, με τον γραφίτη να υπερέχει στο λόγο 'ροή θερμικών νετρονίων προς ομοιογένεια'. Ωστόσο, λόγω μεγαλύτερης σκέδασης προς τον ανιχνευτή που παρέχει ο κατευθυντήρας από γραφίτη, το υλικό του βοριομένου πολυαιθυλενίου υπερέχει στο λόγο 'σήμα προς υπόβαθρο' κατά 17% και στο δείκτη ποιότητας σχεδίασης Q κατά 63%. Η τελική επιλογή υλικού κατασκευής κατευθυντήρα είναι το βοριομένο πολυαιθυλένιο. Η προσθήκη γραφίτη κάτω από την πηγή δεν αυξάνει τη ροή θερμικών νετρονίων στο δείγμα.

Μεγάλο μήκος κατευθυντήρα συνεπάγεται μεγάλη ροή θερμικών νετρονίων στον όγκο του δείγματος και συνεπώς μεγάλο σήμα. Για τη συγκεκριμένη διάταξη, μεγάλο μήκος κατευθυντήρα συνεπάγεται μεγάλη απόσταση πηγής - δείγματος, γεγονός που μειώνει το 'καθαρό' μετρούμενο σήμα εξ' αιτίας της απόστασης. Παράλληλα μειώνεται και η ροή νετρονίων στον όγκο του ανιχνευτή μειώνοντας επίσης το υπόβαθρο μέτρησης. Επιπλέον, ενώ μεγάλη ροή νετρονίων στο ομοίωμα αυξάνει την απορροφούμενη δόση στο δείγμα, μεγάλη απόσταση πηγής-δείγματος μειώνει τη δόση στο δείγμα. Η ομοιογένεια στην κατανομή της θερμικής ροής στο δείγμα δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από το μήκος του κατευθυντήρα. Η επίδραση του μήκους στη συνισταμένη των παραμέτρων μελετήθηκε μέσω του δείκτη επιλογής υλικών και διαστάσεων Q. Γενικά βρέθηκε ότι αύξηση του μήκους του κατευθυντήρα αυξάνει το δείκτη Q.

5.2.3 Θέση και θωράκιση ανιχνευτή

Κατά το σχεδιασμό της διάταξης AANE μελετήθηκαν εναλλακτικές θέσεις του ανιχνευτή NaI(Tl) ως προς την απόστασή του από το δείγμα και διαφορετικοί συνδυασμοί της

θωράκισής του. Το ζητούμενο της μελέτης ήταν ο μεγαλύτερος λόγος ‘σήμα προς υπόβαθρο’ για τη μέτρηση του αζώτου με το ελάχιστο στατιστικό σφάλμα μέτρησης. Η απόσταση που επιλέχθηκε ως βέλτιστη ήταν κέντρο δείγματος – επιφάνεια ανιχνευτή = 15 cm. Ο συνδυασμός θωράκισης περιλαμβάνει φύλλα παραφίνης και boorflexTM σε εναλλασσόμενη διάταξη με κομμάτια μολύβδου γύρω και κάτω από τον ανιχνευτή, ώστε να πετύχουμε επιβράδυνση των νετρονίων που κατευθύνονται προς τον ανιχνευτή και αποκοπή των φωτονίων που προέρχονται είτε από την πηγή απευθείας είτε από τις αλληλεπιδράσεις απορρόφησης των νετρονίων με τα υλικά της θωράκισης.

5.2.4 Υπόβαθρο μέτρησης με τον ανιχνευτή NaI(Tl)

Το υπόβαθρο του φάσματος συλλογής ακτίνων-γ για την παρούσα διάταξη έχει προσδιοριστεί στην παράγραφο 4.2. του παρόντος. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το υπόβαθρο μέτρησης αζώτου είναι ο πλαστικός περιέκτης του δείγματος, ο μεταλλικός δειγματοφορέας και ο περιβάλλοντας αέρας της διάταξης. Ο μεταλλικός δειγματοφορέας και ο πλαστικός περιέκτης χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση της διάταξης και στη μέτρηση του υποβάθρου. Επομένως οποιαδήποτε παρεμβολή τους στη μέτρηση αζώτου λαμβάνεται υπόψη κατά την ‘αφαίρεση’ του υποβάθρου. Αντίστοιχη μελέτη για τη μέτρηση αζώτου με διάταξη AANE σε ανθρώπους δείχνει επίδραση 10% στο υπόβαθρο μέτρησης του αζώτου από στρώμα που τοποθετήθηκε για την άνεση του ασθενούς [Krishnan S.S. 1990]. Η ύπαρξη τριχώματος στα ζώα ενδέχεται να επηρεάσει τη μέτρηση αζώτου και είναι ένας μελλοντικός στόχος μελέτης. Αντίστοιχες μελέτες για μετρήσεις σε ανθρώπους δείχνουν επίδραση των ρούχων του ασθενούς στη μέτρηση του αζώτου, χωρίς όμως να υπάρχει ποσοτικοποίηση αυτής της επίδρασης.

Το υπόβαθρο μέτρησης αζώτου βρέθηκε ότι ισούται με το 90% των ‘μικτών’ παλμών στην ενεργειακή περιοχή του αζώτου, σε περίπτωση μετρήσεων σε δείγματα όγκου ~1 L. Για λόγους ασφάλειας, η διάταξη εγκαταστάθηκε στο κυρίως εργαστήριο του πυρηνικού αντιδραστήρα σχάσης του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Επίδραση στη μέτρηση ενδέχεται να έχει η λειτουργία του αντιδραστήρα, αλλά όχι μεγαλύτερη από άλλες πηγές υποβάθρου. Η επίδραση της λειτουργίας του αντιδραστήρα είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί, αφού η λειτουργία του δεν ήταν σταθερή καθ’όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.

5.3 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΙΩΝ

Η ροή θερμικών νετρονίων μέσα σε ένα δείγμα δεν είναι ομοιογενής και κατ' επέκταση η ενεργοποίηση των πυρήνων ^{15}N στο δείγμα δεν είναι ομοιογενής. Επιπλέον η απόδοση του ανιχνευτή εξαρτάται από την γεωμετρία ανίχνευσης των άμεσων ακτίνων- γ του κάθε στοιχειώδους όγκου και από την αυτοαπορρόφηση στο δείγμα. Οι ανομοιογένειες σύστασης διαταράσσουν ακόμη περισσότερο την κατανομή θερμικής ροής νετρονίων στο εσωτερικό του σώματος. Κατά συνέπεια επηρεάζουν το ποσοστό ενεργοποίησης των πυρήνων αζώτου του σώματος και το ποσοστό φωτονίων ενέργειας 10.826 MeV που ανιχνεύονται. Για τη μελέτη της συνολικής επίδρασης ανομοιογενειών εισάγεται ο όρος 'σύνθετη ευαισθησία ενεργοποίησης και ανίχνευσης' CS.

Από τις καμπύλες της CS παρατηρείται μια υποεκτίμηση του αζώτου κοντά στην επιφάνεια του σώματος κυρίως λόγω μειωμένης ροής θερμικών νετρονίων. Βελτίωση της ομοιογένειας της θερμικής ροής νετρονίων μέσα στο δείγμα μπορεί να επιτευχθεί με χρήση θερμοποιτηών (με μείωση όμως συνήθως της ροής), ανακλαστήρων ή και περιστροφή του δείγματος κατά την ακτινοβολή [Stamatelatos I.E. 1992, 1993b, Dilmanian F.A. 1998].

Οι διαφορές στην κατανομή της θερμικής ροής στο ομοίωμα για εσωτερική αξονική ανομοιογένεια περιεκτικότητας 0.0% N ή 10.9% N είναι στα όρια του στατιστικού σφάλματος μέτρησης του αζώτου. Βελτίωση της διάταξης με περεταίρω μείωση του στατιστικού σφάλματος μπορεί να αναδείξει διαφορές στην κατανομή της θερμικής ροής και της σύνθετης ευαισθησίας μέτρησης αζώτου και να υπολογιστεί η συνεισφορά τους. Παρόλα αυτά, ανομοιογένειες με παρόμοια ακραία τιμή στη συγκέντρωση αζώτου κυμαίνονται έξω από τα αναμενόμενα όρια για βιολογικά δείγματα (περίπου 0.8% στον λιπώδη ιστό, ~1.3% στο ΚΝΣ και μεταξύ 2.0% και 4.6% στην πλειοψηφία των υπολοίπων οργάνων και ιστών του σώματος, ICPR 23). Η ανομοιογένεια που επηρεάζει την ευαισθησία μέτρησης του αζώτου είναι οι κοιλότητες σώματος με αέρα (π.χ. πνεύμονες). Κατάλληλη μέτρηση του όγκου αυτής της εσωτερικής ανομοιογένειας (π.χ. ακτινογραφία) με κατάλληλο μοντέλο υπολογισμού, μπορεί να εκτιμήσει τη συνεισφορά της ανομοιογένειας.

5.4 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ

Το στατιστικό σφάλμα βρέθηκε ότι κυμαίνεται από 3.7% έως 6.5% για τα διαλύματα αζώτου, ενώ το συνολικό σφάλμα στη μέτρηση του αζώτου για διάλυμα 2.7% κ.β. N όγκου 1.0 L υπολογίζεται στο 8.3%. Η βελτιστοποίηση της διάταξης αφορά κυρίως τη μείωση του στατιστικού σφάλματος μέτρησης και κατά δεύτερον τη μείωση της απορροφούμενης δόσης στο δείγμα όταν η εφαρμογή αφορά *in vivo* μελέτες. Μια μελλοντική βελτιστοποίηση της διάταξης με περισσότερους ανιχνευτές μπορεί να μειώσει το στατιστικό σφάλμα μέτρησης του αζώτου και να εξασφαλίσει τον προσδιορισμό της ακρίβειας της μεθόδου με μικρότερο σχετικό σφάλμα.

Το στατιστικό σφάλμα μέτρησης εξαρτάται από τους χρόνους ακτινοβόλησης του δείγματος και του υποβάθρου. Το σφάλμα μέτρησης αζώτου κυριαρχείται από αυτό το στατιστικό σφάλμα μέτρησης του ρυθμού των ‘καθαρών’ παλμών. Με την παρούσα διάταξη και για την εφαρμογή των τεσσάρων ειδών κρέατος, το σχετικό στατιστικό σχετικό σφάλμα μετρήσεων αζώτου διάρκειας 48 h σε βιολογικά δείγματα μάζας ~1.0 kg κυμαίνεται από 5.5% έως 6.3% και οφείλεται στη μικρή τιμή του λόγου ‘σήμα προς υπόβαθρο’ (‘καθαρό’ σήμα:υπόβαθρο = 1:9), το δε συνολικό 7.7% - 8.3%, ανάλογα με το χρόνο ακτινοβόλησης των δειγμάτων. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ένας μόνο ανιχνευτής NaI(Tl). Υπολογίζεται ότι με χρήση δύο παρόμοιων σε μέγεθος ανιχνευτών, εκατέρωθεν του δείγματος, το σχετικό στατιστικό σφάλμα μέτρησης θα μειωνόταν στο 4.6%. Επιπλέον, ένας σημαντικός περιορισμός του συστήματος είναι ο σχετικά μεγάλος χρόνος μέτρησης, 48 h, ο οποίος εμποδίζει τη χρήση του συστήματος σε *in vivo* μελέτες μικρών ζώων. Ο χρόνος μέτρησης μπορεί να μειωθεί σημαντικά είτε αυξάνοντας τη ροή νετρονίων στο δείγμα χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη πηγή νετρονίων, είτε αυξάνοντας την ανιχνευτική απόδοση χρησιμοποιώντας περισσότερους ανιχνευτές μικρού όγκου.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των ομοιογενών δειγμάτων κρέατος με την τεχνική της άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση είναι συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα για τις άλλες δύο χημικές μεθόδους. Η μέγιστη απόκλιση βρέθηκε να ήταν 7% για το ένα από τα τέσσερα δείγματα και είναι στα πλαίσια του σφάλματος μέτρησης της τεχνικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΓΕΝΙΚΗ ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η γνώση της συνολικής πρωτεΐνης στο σώμα μικρών ζώων ή σε βιολογικά δείγματα μεγάλου όγκου αποτελεί βασική απαίτηση των μελετών σύστασης σώματος τόσο για διατροφικές όσο και για μεταβολικές μελέτες. Οι συνήθεις τεχνικές αφορούν χημικές μεθόδους μέτρησης του αζώτου και περιλαμβάνουν την επεξεργασία του δείγματος, όπως τεμαχισμός, λυοφιλοποίηση, καύση κ.α.. Τέτοιες τεχνικές είναι καταστροφικές για το δείγμα, απαιτούν ομογενοποίησή του - με κίνδυνο 'μόλυνσης' του δείγματος - ή εφαρμόζονται δειγματοληπτικά με όλα τα μειονεκτήματα που αυτό περιλαμβάνει. Προβλήματα όπως τα προαναφερθέντα μπορούν να αποφευχθούν με χρήση της τεχνικής της άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση (AANE) αφού πρόκειται για μη-επεμβατική και μη-καταστροφική τεχνική για το δείγμα και εφαρμόζεται σε ολόκληρο το δείγμα, λαμβάνοντας υπόψη τις τυχόν ανομοιογένειες που αυτό έχει. Ειδικότερα, πρόκειται για μια σχετικά απλή διαδικασία μέτρησης για την οποία η προεργασία περιορίζεται στην τοποθέτηση του δείγματος σε φιάλες και τη ζύγισή του.

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη μιας διάταξης άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση με σκοπό τη μέτρηση του αζώτου σε βιολογικά δείγματα μεγάλου όγκου ή στο σώμα μικρών ζώων. Βασικό πρόβλημα μιας τέτοιας διάταξης για τη μέτρηση του αζώτου αποτελεί το υψηλό υπόβαθρο ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, λόγω της μικρής μάζας των δειγμάτων, οι μετρούμενοι μικτοί παλμοί αζώτου είναι περίπου 10% των παλμών υποβάθρου στην περίπτωση δείγματος μάζας ~ 1.0 kg και κατ' επέκταση η ακρίβεια μέτρησης περιορίζεται κυρίως από αυτό το υψηλό στατιστικό σφάλμα μέτρησης. Επομένως, ζητούμενο της μελέτης ήταν η αύξηση του λόγου 'σήμα προς υπόβαθρο', το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με έναν ή με συνδυασμό των κάτωθι επιλογών:

- Αύξηση της θερμικής ροής προς το ακτινοβολούμενο δείγμα, που επιτυγχάνεται με μεγαλύτερης ενεργότητας πηγή νετρονίων, με προσθήκη ανακλαστή νετρονίων κάτω από τη θέση της πηγής, ή / και με επιλογή κατάλληλου υλικού κατασκευής κατευθυντήρα.
- Αύξηση της απόδοσης μέτρησης με περισσότερους σε αριθμό ή / και μεγαλύτερους ανιχνευτές από αυτόν που χρησιμοποιήθηκε (4' x 4').
- Μείωση του υποβάθρου μέτρησης με μεγαλύτερη θωράκιση των ανιχνευτών έναντι της ακτινοβολίας υποβάθρου

Η μελέτη του σχεδιασμού της διάταξης έγινε με μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της διάταξης μέσω του υπολογιστικού κώδικα μεταφοράς Monte Carlo N-Particle (έκδοση 4C2). Σε αυτή τη φάση μελετήθηκαν:

α) Οι δυνατότητες που παρέχει συγκριτικά η χρήση πηγών νετρονίων όπως ^{252}Cf και Pu-Be: Το ^{252}Cf αποδείχτηκε ότι υπερέχει στην επίτευξη μέγιστου σήματος με το ελάχιστο υπόβαθρο μέτρησης αζώτου και με τη μικρότερη δόση εισόδου στο δείγμα. Το συμπέρασμα αυτό είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά ευρήματα των Allen και συν., McNeill και συν., και Krishnan και συν. οι οποίοι αντικατέστησαν ισοτοπικές πηγές τύπου $(\alpha, n)\text{Be}$ με πηγή ^{252}Cf [Allen B.J. 1986, McNeill K.G. 1989, Krishnan S.S. 1990]. Άλλο πλεονέκτημα της πηγής ^{252}Cf είναι ότι υπόκειται σε λιγότερο αυστηρούς κανονισμούς μεταφοράς και χρήσης. Γενικά, η πηγή ^{252}Cf χρησιμοποιείται περισσότερο για ανάλυση σύστασης οργάνων ή ιστών (partial body analysis) [Evans C.J. 1979], ενώ για ανάλυση σύστασης ολόκληρου σώματος (total body analysis) χρησιμοποιούνται συνήθως πηγές τύπου (α, n) κυρίως λόγω του μεγάλου κόστους των πηγών ^{252}Cf σε συνδυασμό με τον μικρό χρόνο ημιζωής του. Για ανάλυση

ατομικής σύστασης μικρών ζώων έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς και τα δύο είδη ισοτοπικών πηγών.

β) Η επίδραση του μήκους και των υλικών κατασκευής του κατευθυντήρα στο στατιστικό σφάλμα μέτρησης και στην απορροφούμενη δόση στο δείγμα. Από τα υλικά που μελετήθηκαν, αυτό που βρέθηκε να υπερέχει είναι το βοριομένο πολυαιθυλένιο. Αντίθετα, δε βρέθηκε να βελτιώνεται σημαντικά η στατιστική των μετρήσεων με προσθήκη ανακλαστήρα με τη μορφή ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου τεμαχίου γραφίτη κάτω από την πηγή. Σε αντίστοιχη διάταξη για την *in vivo* μέτρηση αζώτου στο ανθρώπινο σώμα και για πηγή $^{241}\text{Am-Be}$ έχει αποδειχτεί ότι το βηρύλλιο είναι καλύτερος ανακλαστής πηγής από τον άνθρακα [Stamatelatos I.E. 1991].

γ) Η βέλτιστη θέση και θωράκιση του ανιχνευτή NaI(Tl) με στόχο τη μείωση του στατιστικού σφάλματος μέτρησης. Ο συνδιασμός υλικών θωράκισης του ανιχνευτή που φτιάχτηκε και η γεωμετρία μέτρησης αποδίδουν μείωση του υποβάθρου μέτρησης κατά 17% και αύξηση του λόγου 'σήμα προς υπόβαθρο' κατά 45%.

Η βαθμονόμηση της διάταξης έγινε με βάση τη μέτρηση των παλμών αζώτου και υποβάθρου σε διάλυμα αζώτου ισοδύναμο ιστού, όγκου 1.0 L, και διάλυμα ελεύθερο αζώτου αντίστοιχα. Για μετρήσεις σε δείγματα διαφορετικού όγκου χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο της διάταξης και βρέθηκαν συντελεστές διόρθωσης για διαφορετικό όγκο δείγματος. Η μέθοδος αυτή διαφέρει από παλαιότερη μέθοδο βαθμονόμησης, που προτάθηκε από τον Vartsky και χρησιμοποιούσε το συνολικό υδρογόνο σώματος ως εσωτερικό δείκτη αναφοράς για τη μέτρηση αζώτου [Vartsky D. 1979].

Βρέθηκε ότι οι αζονικές ανομοιογένειες στη συγκέντρωση αζώτου σε ομοιογενή δείγματα που μελετήθηκαν, επηρεάζουν τη χωρική κατανομή ευαισθησίας και μέτρησης μόνο στις ακραίες περιπτώσεις πολύ υψηλής συγκέντρωσης αζώτου (10.9% κ.β.) και μηδενικής συγκέντρωσης.

Το στατιστικό σφάλμα μέτρησης αζώτου για δείγματα με σύσταση παραπλήσια του ζωϊκού ιστού κυμαίνεται από 3.7% έως 6.5%. Το στατιστικό σφάλμα για μετρήσεις σε ομογενοποιημένο κρέας όγκου ~ 1 L είναι από 5.5% - 6.3% και το συνολικό σφάλμα μέτρησης αζώτου κυμάνθηκε από 7.7% - 8.3%. Ο δείκτης επαναληψιμότητας (CV%) βρέθηκε από 1.1% έως 2.5%.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου για τη μέτρηση του αζώτου σε τέσσερα δείγματα κρέατος με την τεχνική της άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση τα αποτελέσματα βρέθηκαν συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα από τις καταστροφικές χημικές μεθόδους Kjeldahl και καύση Dumas. Η μέγιστη απόκλιση, 7%, δικαιολογείται από το σφάλμα της τεχνικής.

Η μέθοδος της AANE έχει εφαρμοστεί επιτυχώς για τον υπολογισμό της συνολικής πρωτεΐνης στο ανθρώπινο σώμα [Ryde S.J.S. 1987, Dilmanian A. 1998] και σε μεγάλα ζώα [Ellis K.J. 1992, Mitra S. 1998]. Ο αντίστοιχος υπολογισμός για μικρά ζώα είναι ιδιαίτερα δύσκολος δεδομένου του ασθενούς σήματος και του υψηλού υπόβαθρου μέτρησης [McNeill K.G. 1988].

Οι McNeill και Wang, στο Πανεπιστήμιο του Τορόντο, κατασκεύασαν διάταξη άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση με στόχο την ανάλυση σύστασης σώματος σε ζώα μάζας περίπου 3.0 kg. Η διάταξη διαθέτει δύο πηγές Pu-Be (20 Ci) και έναν ανιχνευτή NaI(Tl). Η εφαρμογή σε βόιο κρέας έδειξε στατιστικό σφάλμα περίπου 10% και συνολικό σφάλμα στη μέτρηση αζώτου σε πτηνά και κουνέλια της τάξης των 9.5% - 10% [McNeill K.G. 1988], δηλαδή σφάλματα μεγαλύτερα από αυτά στην παρούσα μελέτη. Η μέτρηση αζώτου σε κουνέλια μάζας (2.3 - 3.7) kg, δίνει στατιστικό σφάλμα στη μέτρηση του αζώτου 4% - 8% και διακύμανση των τιμών 7% [Wang H.Y. 1986]. Μια άλλη διάταξη AANE για μικρά ζώα μάζας 0.5 kg έως 1.0 kg κατασκευάστηκε από τους Stamatelatos και Yasumura στο Εθνικό Εργαστήριο του Brookhaven στη Νέα Υόρκη [Stamatelatos I.E. 1995]. Η διάταξη διέθετε πηγή ^{252}Cf (140 μg), δύο ανιχνευτές NaI(Tl) και 'βαρύ νερό' ως μέσο θερμοποίησης και ανάκλασης νετρονίων. Με την εν λόγω διάταξη έγινε προσδιορισμός της συνολικής πρωτεΐνης στο σώμα αρουραίων μάζας 650 g με στατιστικό σφάλμα μέτρησης 3.5% και συντελεστή διακύμανσης τιμών 5.5% [Yasumura S. 1998].

Η συνολική πρωτεΐνη είναι μια βασική παράμετρος σε μελέτες σύστασης σώματος. Το άζωτο αποτελεί το 16% περίπου της μάζας των πρωτεϊνών και ο υπολογισμός του αζώτου σε βιολογικά δείγματα είναι ένας έμμεσος τρόπος προσδιορισμού της συνολικής πρωτεΐνης σε αυτά. Η άμεση ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση, AANE, είναι μια αναλυτική, πυρηνική, μη-καταστροφική τεχνική που επιτρέπει τον προσδιορισμό του αζώτου και άλλων στοιχείων σε βιολογικά και μη βιολογικά δείγματα.

Η διάταξη που αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη βρίσκει πλήθος εφαρμογών, όπως ο προσδιορισμός του αζώτου σε βιολογικά υλικά για διατροφικές μελέτες (π.χ. μέτρηση

πρωτεΐνης σε τρόφιμα, σε συμπληρώματα διατροφής κ.α.) ή η μέτρηση αζώτου στο σολωμό [Talbot C. 1986]. Άλλη εφαρμογή αφορά στη μελέτη μεταβολής της πρωτεΐνης σε μικρά πειραματόζωα κατά την ανάπτυξή τους ή μετά από μεταβολική διαταραχή λόγω διατροφής ή παθολογείας.

Συμπερασματικά, η μέτρηση του αζώτου με την τεχνική της Άμεσης Ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση στο σώμα μικρών ζώων, είναι εφικτή σε βιολογικά δείγματα και σε τρόφιμα με τη διάταξη που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΓΛΩΣΣΑ

Η διδακτορική διατριβή αφορά στην ανάπτυξη μιας διάταξης Άμεσης Ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση (AANE) για τη μέτρηση του αζώτου και επομένως τη μέτρηση της συνολικής πρωτεΐνης σε βιολογικά δείγματα μεγάλου όγκου ή στο σώμα μικρών ζώων. Η AANE του αζώτου βασίζεται στην ανίχνευση και καταμέτρηση των άμεσων (prompt) ακτίνων-γ του αζώτου ενέργειας 10.83 MeV, οι οποίες εκπέμπονται από τους πυρήνες $^{15}\text{N}^*$ του δείγματος μετά τη σύλληψη θερμικών νετρονίων από τους πυρήνες ^{14}N του δείγματος.

Η διάταξη αποτελείται από μια πηγή νετρονίων ^{239}Pu -Be ονομαστικής ενεργότητας 185 GBq, έναν κατευθυντήρα νετρονίων από γραφίτη, τη βιολογική θωράκιση της πηγής, έναν ανιχνευτή ακτίνων-γ NaI(Tl) με τη θωράκισή του και ένα δειγματοφορέα. Ο σχεδιασμός της διάταξης είχε ως στόχο την εύρεση του βέλτιστου σήματος ανίχνευσης αζώτου με τη μικρότερη δόση στο δείγμα. Πειραματικά, η βελτιστοποίηση του σήματος αζώτου επιτυγχάνεται με ελαχιστοποίηση του στατιστικού σφάλματος μέτρησης για το μικρότερο δυνατόν χρόνο μέτρησης του δείγματος.

Για την επιλογή της βέλτιστης σχεδίασης έγινε εκτίμηση των χαρακτηριστικών των διαφόρων εναλλακτικών σχεδιάσεων με χρήση του κώδικα Monte Carlo MCNP4C2. Σημαντικό κριτήριο επιλογής ήταν η μεγιστοποίηση της ροής θερμικών νετρονίων στον όγκο του δείγματος και η ελαχιστοποίηση της απορροφούμενης δόσης στο δείγμα και της ροής νετρονίων στον όγκο του ανιχνευτή. Μελετήθηκε η επίδραση τριών εναλλακτικών πηγών νετρονίων, ^{239}Pu -Be, ^{241}Am -Be και ^{252}Cf , σε συνδυασμό με διαφορετικά υλικά κατευθυντήρα, όπως γραφίτης, πολυαιθυλένιο, πολυαιθυλένιο με 5% προσμίξεις βορίου, D₂O και βηρύλλιο, και η επίδραση του μήκους του κατευθυντήρα στο βέλτιστο σήμα. Επιπλέον μελετήθηκε η δυνατότητα χρήσης γραφίτη κάτω από την πηγή ως ανακλαστήρας νετρονίων. Ο σχεδιασμός της διάταξης ολοκληρώθηκε με την εύρεση της κατάλληλης θέσης και του υλικού θωράκισης του ανιχνευτή. Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου της διάταξης επιβεβαιώθηκαν με πειραματικές μετρήσεις. Ο υπολογισμός της ισοδύναμης δόσης στο προς ανάλυση δείγμα έγινε με χρήση του κώδικα προσομοίωσης MCNP4C2.

Ο αριθμός των άμεσων ακτίνων-γ του αζώτου του δείγματος που ανιχνεύονται εξαρτάται, εκτός από γεωμετρικούς παράγοντες και το είδος της πηγής, και από τη σύσταση και την

ομοιογένεια του δείγματος. Για το λόγο αυτό εισήχθη ο όρος ‘σύνθετη ευαισθησία ενεργοποίησης και ανίχνευσης’, CS, ο οποίος αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ακτίνων- γ του αζώτου ενέργειας 10.83 MeV που εκπέμπονται από το δείγμα ανά μονάδα χρόνου και όγκου του δείγματος και ανιχνεύονται από τον ανιχνευτή. Η κατανομή της CS στον όγκο του δείγματος δίνει ένα μέτρο της ανομοιογένειας της ανίχνευσης του αζώτου στο σώμα μικρών ζώων και παράλληλα παρέχει ένα δείκτη μέτρησης της ακρίβειας της μεθόδου. Για τη μελέτη της επίδρασης των ανομοιογενειών του σώματος στη μέτρηση του αζώτου με τη μέθοδο της AANE χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά ομοιώματα σύστασης ‘ισοδύναμη ιστού’ με διαφορετικές τιμές συγκέντρωσης αζώτου σε εσωτερικές κοιλότητες του ομοιώματος. Ως ακραία τιμή μελετήθηκε η παρουσία κοιλότητας αέρα στο εσωτερικό του δείγματος, όπως σε προσέγγιση θα ήταν οι πνεύμονες στο σώμα μικρών ζώων.

Η βαθμονόμηση της διάταξης βασίστηκε στη μέτρηση ενός πρότυπου κυλινδρικού δείγματος όγκου 1.0 L και γνωστής περιεκτικότητας σε άζωτο. Το πρότυπο δείγμα δίνει ένα σταθερό λόγο του αριθμού παλμών στην περιοχή του αζώτου ανά μονάδα μέτρησης χρόνου και ανά μονάδα μάζας αζώτου (F_{st}). Ο διορθωτικός συντελεστής $f_{correction}$ για τη μέτρηση αζώτου σε δείγματα διαφορετικού όγκου, διαστάσεων και πυκνότητας από το πρότυπο ομοίωμα εξάγεται με χρήση του υπολογιστικού κώδικα μεταφοράς νετρονίων και φωτονίων MCNP4C2.

Η ακρίβεια της μεθόδου ελέγχθηκε με μετρήσεις σε δείγματα γνωστής συγκέντρωσης αζώτου από 2.7% έως 10.9% κ.β. Επιπλέον, μετρήθηκε το συνολικό άζωτο σε τέσσερα δείγματα ομογενοποιημένου κρέατος διαφορετικής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη και λίπος, χρησιμοποιώντας τη διάταξη άμεσης ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση. Το άζωτο μετρήθηκε για τα ίδια δείγματα με δύο ανεξάρτητες χημικές μεθόδους, την τεχνική Kjeldahl και την καύση Dumas με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Συμπερασματικά, η άμεση ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση είναι μια αναλυτική, μη καταστροφική πυρηνική τεχνική δειγμάτων, που επιτρέπει την αξιόπιστη και ακριβή μέτρηση του αζώτου σε βιολογικά δείγματα μάζας 0.25 – 1.50 kg, καθώς και στο σώμα μικρών ζώων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΚΗ ΓΛΩΣΣΑ

DEVELOPMENT OF A PROMPT GAMMA NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS FACILITY FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

KASVIKI KALLIOPI

The thesis concerns the development of a Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA) facility for the measurement of nitrogen and thus total protein in large volume biological samples or the whole body of small animals. The method is based on detection of the 10.83 MeV nitrogen prompt γ -rays, which are emitted following the neutron capture from ^{14}N nuclei in the sample. The experimental device consists of a 185 GBq ^{239}Pu -Be neutron source, a graphite neutron collimator, radiation shielding, a shielded NaI(Tl) γ -ray detector and a sample holder. The device design aimed on the optimization of the detected nitrogen signal. Experimentally, optimal signal is achieved with minimization of the statistical error of measurement of nitrogen at a set measurement time of the sample (or radiation dose).

The design of the device was based on Monte Carlo simulations using code MCNP4C2. Computations aimed to maximize thermal neutron flux over the volume of sample, minimize the absorbed dose in the sample as well as the fluence rate incident on the gamma ray detector. The selection of the neutron source (^{239}Pu -Be, ^{241}Am -Be, ^{252}Cf) in combination with the collimator length and material (graphite, polyethylene, polyethylene with 5% boron impurities, 'heavy water' and beryllium) were studied as well as the possibility of using graphite below the source as a reflector. Furthermore, different detector position arrangements and shielding configurations were studied. The computational results were verified against measurements for selected configurations. The calculation of the equivalent dose of neutrons and photons was performed using code MCNP4C2.

The production of 10.83 MeV prompt γ -rays depends on sample elemental composition and homogeneity, the experimental configuration and the source type. The quantity 'Combined Sensitivity' (CS) was used to represent the number of γ -rays of nitrogen emitted from the

sample per unit of time and volume of the sample which were detected by the detector. The distribution of CS over sample volume provides a measure of the non-uniformity of nitrogen measurement to small animal body and therefore is an index of the accuracy of the measurement. The study included cylindrical phantoms, filled with 'equivalent tissue' liquid and different nitrogen concentration values inside internal cavities. As an extreme value, the presence of air cavities within the sample was also studied as it representing small animal's lungs.

The PGNAA calibration procedure was based on measurements performed using a 1 L in volume cylindrical calibration standard of known nitrogen concentration. As a result, the detected count ratio of nitrogen per unit of nitrogen mass (F_{st}) represent a standard index for the PGNAA facility. MCNP-4C2 was used to derive appropriate correction factors for the system response in order to account for differences in size between measured samples and the calibration standard. The accuracy of nitrogen determination by PGNAA in phantoms of known composition (2.7% - 10.9% N mass concentration) was studied. Total nitrogen was measured in four raw ground meat samples using the PGNAA facility. Nitrogen was also assessed in the meat samples independently by the Kjeldahl and Dumas combustion techniques with similar results.

This study showed that prompt gamma ray neutron activation analysis is a non-destructive nuclear analytical technique which allows determination of nitrogen concentration in biological samples, 0.25 – 1.00 kg in mass and the whole body of small animals.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΦΕΚ 216/Β, Υπουργική Απόφαση 1014 (ΦΟΠ) 94, 06/03/01, Κανονισμός Ακτινοπροστασίας, 2001
2. Al-Haddad I.K., Chettle D.R., Fletcher J.G., Fremlin J.H., *A transportable system for measurement of kidney cadmium in vivo*. International Journal of Applied Radiation and Isotopes 32 (2): pp 109-112, 1981
3. Allen B.J., Bailey G.M., McGregor B.J., *The AAEC total body nitrogen facility*. Proceedings 4th Aust. Conference in 'Nucl. Tech. Anal., Lucas Heights, Nov. 1985
4. Anderson J., Osborn S.B., Tomlinson R.W.S., Newton D., Rundo J., Salmon L., Smith J.W., *Neutron-activation analysis in man in vivo. A new technique in medical investigation*. Lancet 2 (7371): pp 1201-1205, 1964
5. Arnold, M.L., McNeill, F.E., Chettle, D.R., *The feasibility of measuring manganese concentrations in human liver using neutron activation analysis*. NeuroToxicology 20 (2-3): pp 407-412, 1999
6. Arnold, M.L., McNeill, F.E., Stronach, I.M., Pejovic-Milic, A., Chettle, D.R., Waker, A., *An accelerator based system for in vivo neutron activation analysis measurements of manganese in human hand bones*. Medical physics 29 (11): pp 2718-2724, 2002
7. Auxier J.A., Snyder W.S., Jones T.D., *Neutron interactions and penetration in tissue*. Radiation Dosimetry Vol I, 2nd edition, (F.H. Attix and W.C. Roach, eds.) Chapter 6, Academic Press, New York, pp 278, 1969
8. Baumgartner R.N., Heymsfield S.B., Lichtman S., Wang J., Pierson R.N., Jr. *Body composition in elderly people: effect of criterion estimates on predictive equations*. American Journal of Clinical Nutrition 53: pp 1345-1353, 1991
9. Baur L.A., Allen B.J., Rose A., Blagojevic N., Gaskin K.J., *A total body nitrogen facility for paediatric use*. Physics in Medicine and Biology 36 (10): pp 1363-1375, 1991
10. Beddoe A.H., Zuidmeer H., Hill G.L., *A prompt gamma in vivo neutron activation analysis facility for measurement of total body nitrogen in the critically ill*. Physics in Medicine and Biology 29 (4): pp 371-383, 1984a

11. Beddoe A.H., Streat S.J., Hill G.L., *Evaluation of an in vivo prompt gamma neutron activation facility for body composition studies in critically ill intensive care patients: Results on 41 normals*. *Metabolism* 33 (3): pp 270-280, 1984b
12. Beddoe A.H., Streat S.J., Hill G.L., *Measurement of total body chlorine by prompt gamma in vivo neutron activation analysis*. *Physics in Medicine and Biology* 32 (2): pp 191-201, 1987
13. Behnke A.R., Feen B.G., Welham W.C., *The specific gravity of healthy men. Body weight and volume as an index of obesity*. *J. Am. Med. Assoc.* 118: pp 495-498, 1942
14. Biggin H.C. & Morgan W.D., *Fast neutron activation analysis of the major body elements*. *Journal of Nuclear Medicine* 12 (12): pp 808-814, 1971
15. Biggin HC, Chen NS, Ettinger KV, Fremlin JH, Morgan WD, Nowotny R, Chamberlain MJ, *Determination of nitrogen in living patients*. *Nature New Biology* 236 (67): pp 187-188, 1972a
16. Biggin HC, Chen NS, Ettinger KV, Fremlin JH, Morgan WD, Nowotny R, Chamberlain MJ, *Measurements of whole body nitrogen by neutron activation analysis*. *Nature* 236: pp 639-649, 1972b
17. Blagojevic N., Allen B.J., Rose A., *Development of a total body chlorine analyser using a bismuth germinate detector system and a ^{252}Cf neutron source*. *Advances in In Vivo body composition studies*: pp 401-408, 1990
18. Blinov M.V., *Neutron energy spectra of spontaneous fission sources*. (review) In *Proceedings of the IAEA consultants meeting on 'Neutron Sources Properties'*, Debrecen, Hungary, pp 79-106, 17-21 March, 1980
19. Boddy K., Harden R.M., Alexander W.D., *In vivo measurement of the intrathyroidal iodine concentration in man by activation analysis*. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 28 (2): pp 294-300, 1968
20. Boddy K. & Glaros D., *The measurement of phosphorus in human bone using radioactive neutron sources—a technique for partial body in vivo activation analysis*. *International Journal of Applied Radiation and Isotopes* 24 (3): pp 179-182, 1973

21. Boddy K., Glaros D., Robertson I., *Measurement of calcium in sections of a human skeleton using a reactor spectrum: In vivo activation analysis technique*. Physics in Medicine and Biology 20 (1): pp 80-87, 1975
22. Boddy K., Lindsay R., Holloway I., Smith D.A.S., Elliott A., Robertson I., Glaros D., *A study of changes in whole-body calcium, phosphorus, sodium and nitrogen by neutron activation analysis in vivo in rats on a calcium-deficient diet*. Clinical Science and Molecular Medicine 51: pp 399-402, 1976
23. Boddy K., Williams E.D., Haywood J.K., *Simultaneous measurement of a deficit in total body calcium and phosphorus in diagnosis of hyperparathyroidism*. British Medical Journal 2 (6141): pp 864, 1978
24. Borovnicar D.J., Stroud D.B., *Can total body nitrogen be measured in newborn infants?* Asia Pacific J Clin Nutr 4: pp 47-50, 1995
25. Borsaru M., Berry M., Biggs M., Rojc A., *In situ determination of sulphur in coal seams and overburden rock by PGNA*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2003
26. Brozek J., Grande F., Anderson J.T., Keys A., *Densitometric analysis of body composition: Revision of some quantitative assumptions*. Annals of the New York Academy of Sciences 110: pp 113-140, 1963
27. Burkinshaw L., *In vivo analysis and the whole body counter*. Liquid Scintillation Counting 5, ch 15, ed M.A. Crook and P. Johnson, London: Heyden, pp 111-112, 1978
28. Burkinshaw L., Hill G.L., Morgan D.B., *Assessment of the distribution of protein in the human body by in-vivo neutron activation analysis*. Nuclear Activation Techniques in the Life Sciences, Vienna : IAEA, pp 787-798, 1978-1979
29. Chamberlain M.J., Fremlin J.H., Peters D.K., Philip H., *Total body calcium by whole body neutron activation: new technique for study of bone disease*. British medical journal 2 (605): pp 581-583, 1968

30. Chamberlain M.J., Fremlin J.H., Peters D.K., Philip H., *Total body sodium by whole body neutron activation in the living subject: further evidence for non-exchangeable sodium pool*. British medical journal 2 (605): pp 583-585, 1968
31. Chamberlain M.J., Fremlin J.H., Peters D.K., Philip H., *Measurement of whole body calcium and sodium by neutron activation analysis in the living subject*. Strahlentherapie, Sonderbande 67: pp 178-185, 1968
32. Chasteland M. & Comar D., *Neutron radioactivation analysis in vivo of some elements in the rat*. International Journal of Applied Radiation and Isotopes 23 (5): pp 209-218, 1972
33. Chettle D.R., Fletcher J.G., Downey S.P.M.J., Scott M.C., James H.M., Higgins C.S., *Measurement of nitrogen in vivo by neutron activation analysis: Further Developments and applications*. Journal of Radioanalytical Chemistry 71 (1-2): pp 533-546, 1982
34. Cohn S.H., Dombrowski C.S. and Fairchild R.G., *In-Vivo neutron activation analysis of calcium in man*. The International Journal of Applied Radiation and Isotopes 21 (3): pp 127-134, 1970
35. Cohn S.H. & Dombrowski C.S., *Measurement of total-body calcium, sodium, chlorine, nitrogen, and phosphorus in man by in vivo neutron activation analysis*. Journal of Nuclear Medicine 12 (7): pp 499-505, 1971
36. Cohn S.H., Sawitsky A., Vartsky D., Yasumura S., Zanzi I., Ellis K.J., *Body composition as measured by in vivo neutron activation analysis*. The 2nd Ross Conference Sante Fe, New Mexico, Sept 24-27, 1979
37. Cohn S.H., *The present state of in vivo neutron activation analysis in clinical diagnosis and therapy*. Atomic Energy Reviews 18 (3): pp 599-655, 1980
38. Cohn S.H., Vaswani A.N., Vartsky D., Yasumura S., Sawitsky A., Gartenhaus W., Ellis K.J., *In vivo quantification of body nitrogen for nutritional assessment*. The American Journal of Clinical Nutrition 35: pp 1186-1191, 1982
39. Cohn S.H., *In vivo neutron activation analysis; a new technique in nutritional research*. The Journal of Nutritional Biochemistry 3 (8): pp 378-386, 1992

40. Dilmanian F.A., Weber D.A., Yasumura S., Kamen Y., Lidofsky L., Heymsfield S.B., Pierson R.N., Wang J., Kehayias J.J., Ellis K.J., *Performance of the delayed and prompt-gamma neutron activation systems at Brookhaven National Laboratory*. Recent advances in In Vivo body composition studies. (New York: Plenum), pp 309-315, 1990
41. Dilmanian F.A., Lidofsky L., Stamatelatos I., Kamen Y., Yasumura S., Vartsky D., Pierson R.N., Weber D.A., Moore R.I., Ma R., *Improvement of the prompt gamma neutron activation facility at Brookhaven National Laborator*. Physics in Medicine and Biology 43 (2): pp 339-349, 1998
42. Dombrowski C.S., Wallach S., Shukla K.K., Cohn S.H., *Determination of whole body magnesium by in vivo neutron activation*. International Journal of Nuclear Medicine and Biology 1 (1): pp 15-21, 1973
43. Ellis K.J., Vartsky D., Cohn S.H., *A mobile prompt-gamma in-vivo neutron activation facility*. IAEA-SM-227/78, 1978
44. Ellis K.J., Vartsky D., Cohn S.H., *In vivo monitoring of heavy metals in man: Cadmium and mercury*. NeuroToxicology 4 (3): pp 164-168, 1983
45. Ellis K.J., Shypailo R.J., Sheng H.P., Pond W.G., *In vivo measurement of nitrogen, hydrogen and carbon in genetically obese and lean pigs*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 160: pp 159-168, 1992
46. Ellis K.J., *Human body composition: in vivo methods*. Physiological Reviews 80 (2): pp 649- 681, 2000
47. Ettinger K.V., Biggin H.C., Chen N.S., Chettle D.R., Fremlin J.H., Harvey T.C., Morgan W.D., Nowotny R., Thomas B.J., Vartsky D., *In vivo neutron activation analysis of nitrogen using capture gamma rays*. 1975
48. Evans C.J., Cummins P.E., Dutton J., Morgan W.D., Sivyer A., Ghose R.R., *A californium-252 facility for the in-vivo measurement of organ cadmium*. Nuclear Activation Techniques in the Life Sciences: pp 719-731, IAEA (Vienna), 1979
49. Evans C.J., Thomas D.W., Ryde S.J.S., Williams A.J., *Absolute measurements of total-body calcium using prompt gamma neutron analysis and internal chlorine*

- standardization: results in renal patients*. *Physiological Measurement* 15: pp 67-77, 1994
50. Fedorowicz R.P., Chettle D.R., Kennett T.J., Prestwich W.V., Webber C.E., A $^{238}\text{Pu}/\text{Be}$ facility for in vivo cadmium measurements. *Basic life sciences* 60: pp 323-324, 1993
51. Flynn M.A., Nolph G.B., Baker A.S., Martin W.M., Krause G., *Total body potassium in aging humans: a longitudinal study*. *The American Journal of Clinical Nutrition* 50 (4): pp 713-717, 1989
52. Forbes G.B., Gallup J., Hursh J., *Estimation of total body fat from potassium-40 content*. *Science* 133: pp 101-102, 1961
53. Geiger K.W. and Van der Zwan L., *Radioactive neutron source spectra from $^9\text{Be}(\alpha,n)$ cross section data*. *Nuclear Instruments and Methods* 131: pp 315-321, 1975
54. Geiger K.W., *Radioactive $\text{Be}(\alpha,n)$ and $\text{Be}(\gamma,n)$ neutron sources*. In Proceedings of the IAEA consultants meeting on 'Neutron Sources Properties', Debrecen, Hungary, 17-21 March, pp 43-77, 1980
55. Grafe J.L., McNeill F.E., Byun S.H., Chettle D.R., Noseworthy M.D., *The feasibility of in vivo detection of gadolinium by prompt gamma neutron activation analysis following gadolinium-based contrast-enhanced MRI*. *Applied Radiation and Isotopes* 69 (1): pp 105-111, 2011
56. Green S., Aro A.C.A., Taylor G.C., Scott M.C., *The development of microdosimetric detectors for investigating LET distributions in different body tissue*. *Radiation Protection Dosimetry* 31 (1/4): pp 137-141, 1990
57. Green S., προσωπική επικοινωνία, 2001
58. Grinyer J., Byun S.H., Chettle D.R., *In vivo prompt gamma neutron activation analysis of cadmium in the kidney and liver*. *Applied Radiation and Isotopes* 63 (4): pp 475-479, 2005
59. *Handbook of Radioactivity Analysis, Chapter 20: Analytical Techniques in Nuclear Safeguards*, Academic Press, p 1251, 2012

60. Harker W., Method and apparatus for measuring fat content in animal tissue either in vivo or in slaughtered and prepared form US Patent Application 186058, 1973
61. Harvey T.C., Dykes P.W., Chen N.S., Ettinger K.V., Jain S., James H., Chettle D.R., Fremlin J.H., Thomas B.J., *Measurement of whole-body nitrogen by neutron-activation analysis*. The Lancet 302 (7826): pp 395-399, 1973
62. Harvey T.C., Thomas B.J., Mclellan J.S., Fremlin J.H., *Measurement of liver-cadmium concentrations in patients and industrial workers by neutron-activation analysis*. The Lancet 305 (7919): pp 1269-1272, 1975
63. Heymsfield S.B., Lichtman S., Baumgartner R.N., Wang J., Kamen Y., Aliprantis A., and Pierson Jr.R.N., *Body composition of humans: comparison of two improved four-compartment models that differ in expense, technical complexity, and radiation exposure*. American Journal of Clinical Nutrition 52: pp 52-58, 1990
64. Heymsfield S.B., Zimian W., Baumgartner R.N., Dilmanian F.A., Ma R., Yasumura S., *Body composition and aging: a study by in vivo neutron activation analysis*. Journal of Nutrition 123: pp 432-437, 1993
65. Hill G.L., McCarthy I.D., Collins J.P., Smith A.H., *A new method for the rapid measurement of body composition in critically ill surgical patients*. British Journal of Surgery 65: p 732, 1978
66. International Commission on Radiological Protection - *Report of the task group on reference man*, ICRP 23, Pergamon Press, Oxford, UK, 1975
67. International Commission on Radiological Protection, *Reference Man: Anatomical Physiological and Metabolic Characteristics*. ICRP 23, Pergamon Press, Oxford, UK, 1975
68. International Commission on Radiological Protection, *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*. ICRP 74, Ann. ICRP Vol 26 No 3-4, 1996
69. International Commission on Radiological Protection, *Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values*. ICRP 89, 2002

70. International Commission on Radiation Units and Measurements, *Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement*. ICRU 44, ICRU, Bethesda, MD, USA, 1989.
71. Kalef-Ezra J.A., Karantanas A.H., Hatzikonstantinou I., Sferopoulos G., Glaros D.K., Siamopoulos K.C., *Bone mineral status after renal transplantation assessment by noninvasive technique*. Investigative Radiology 29 (2): pp 127-133, 1994
72. Kalef-Ezra J.A., Hatzikonstantinou J., Glaros D., Yasumura S., *In vivo measurement of phosphorus in bones of the hands: ten years of clinical experience*. Neutrons in research and industry (G. Vourvopoulos editor), pp 371-374, SPIE Vol. 2867 of the International Society of Optical Engineering Series, Washington, 1997
73. Kalef-Ezra J., Zibis A., Chaliassos N., Hatzikonstantinou I., Karantanas A., *Body composition in homozygous β -thalassemia*. Annals of New York Academy of Sciences 904: pp 621-624 2000.
74. Kasviki K., Stamatelatos I.E., Kalef-Ezra J., in: Proc. 11th Int. Conf. on Modern Trends in Activation Analysis, Guildford, UK, June 2004
75. Kasviki K., Stamatelatos I.E., Yannakopoulou E., Papadopoulou P., Kalef-Ezra J., *On the accuracy of protein determination in large biological samples by prompt gamma neutron activation analysis*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 263 (1): pp 132-135, 2007
76. Kehayias J.J. Aging and Body Composition. Nutrition and Aging: I.H. Rosenberg; A. Sastre (eds), Nestli Nutrition Workshop Series Clinical & Performance Program 6: pp 63-78, Nestec Ltd.; Vevey/S. Karger AG, Basel, 2002
77. Khrbush Y.S., Spyrou N.M., *Prompt gamma-ray neutron activation analysis by the absolute method*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 151 (1): pp 55-61, 1991
78. Knoll G.F., *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley and Sons, New York, 1999
79. Krishnan S.S., Bayley A.J., Hitchman A.J.W., Lin S.C., McNeill K.G., Harrison J.E., *Small sample in-vivo neutron activation analysis using californium sources*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 114 (1): 173-180, 1987

80. Krishnan S.S., McNeill K.G., Mernagh J.R., Bayley A.J., Harrison J.E., *Improved clinical facility for in vivo nitrogen measurement*. *Physics in Medicine and Biology* 35 (4): 489-499, 1990
81. Kvist H., Chowdhury B., Sjoström L., Tylen U. and Cederblad A., *Adipose tissue volume determination in males by computed tomography in adult men and women: predictive equations*. *American Journal of Clinical Nutrition* 48: pp 1351-1361, 1988
82. Kyere K., Oldroyd B., Oxby C.B., Burkinshaw L., Ellis R.E., Hill G.L., *The feasibility of measuring total body carbon by counting neutron inelastic scatter gamma rays*. *Physics in Medicine and Biology* 27 (6): pp 805-817, 1982
83. Lukaski H.C., Johnson P.E., Bolonchuk W.W., Lykken G.I., *Assessment of fat free mass using bioelectrical impedance measurement of the human body*. *American Journal of Clinical Nutrition* 41(4): pp 810-817, 1985
84. Mackie A., Hannan W.J., Tothill P., *An introduction to body composition models used in nutritional studies*. *Clinical Physics and Physiological Measurement* 10 (4): pp 297-310, 1989
85. McNeill F.E., Chettle D.R., *Improvements to the in Vivo measurement of cadmium in the kidney by neutron activation analysis*. *Applied Radiation and Isotopes* 49 (5-6): pp 699-700, 1998
86. McNeill K.G., Harrison J.E., Krishnan S.S., *In vivo measurements of nitrogen by naa*. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles* 110: pp 656-661, 1987
87. McNeill K.G., Wang H.Y., Waana C., *In vivo measurement of nitrogen in small animals*. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 124 (1): pp 251-256, 1988
88. McNeill K.G., Borovnicar D.J., Krishnan S.S., Wang Haiying, Waana Charles, Harrison J.E., *Investigation of factors which lead to the background in the measurement of nitrogen by IVNAA*. *Physics in Medicine and Biology* 34: pp 53-59, 1989
89. MCNP4C2, Monte Carlo N-Particle Transport Code System, RSICC COMPUTER CODE COLLECTION, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Contributed by: Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 2001

90. Mernagh J.R., Harrison J.E., McNeill K.G., *In vivo Determination of Nitrogen using Pu-Be Sources*. Physics in Medicine and Biology 22 (5): pp 831-835, 1977
91. Mitra S., Wolff J.E., Garrett R., *Calibration of a prototype in vivo total body composition analyser using 14 MeV neutron activation and the associated particle technique*. Applied Radiation and Isotopes 49 (5-6): pp 537-539, 1998
92. Moore F.D., Olesen K.H., McMurrey J.D., Parker H.V., Ball M.R., Boyden C.M., *The body cell mass and its supporting environment*. Philadelphia, PA: Saunders, 1963
93. Moore F.D., *Energy and the maintenance of the body cell mass*. J. parent. Ent. Nutr. 4: pp 227-260, 1980
94. Morita N., Takamura N., Murakami T., Jo O., Aoyagi K., Yamashita S., Okumura Y., *Evaluation of fat-free mass by whole-body counter in Japanese healthy young adults*. Radiation Protection Dosimetry 123 (1): 128-130, 2007
95. Morgan W.D., Vartsky D., Ellis K.J., Cohn S.H., *A comparison of ^{252}Cf and ^{238}Pu , Be neutron sources for partial-body in vivo activation analysis*. Physics in Medicine and Biology 26 (3): pp 413-424, 1981
96. Morgan W.D., *Of Mermaids and Mountains: Three Decades of Prompt Activation in Vivo*. Annals of The New York Academy of Sciences 904: pp 128-133, 2000
97. Nagai T., Fujii I., Muto H., Inouye T., *Total-body nitrogen and protein determined by in vivo fast-neutron activation analysis*. Journal of Nuclear Medicine 10 (4): pp 192-196, 1968
98. Ozbas E., Chettle D.R., Ettinger K.V., Fremlin J.H., Harvey T.C., Prestwich W.V., Thomas B.J., Dabek J.T., *In vivo neutron activation analysis measurements of calcium using the $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)^{37}\text{Ar}$ reaction*. The International Journal of Applied Radiation and Isotopes 27 (4): pp 227-232, 1976
99. Pace N. & Rathbun E.N., *Studies on body composition. III. The body water and chemically combined nitrogen content in relation to fat content*. Journal of Biological Chemistry 158: pp 685-691, 1945
100. Pallada S., *Μετρητής ολόσωμης ακτινοβολίας – Εφαρμογές*. MSc., University of Ioannina, Ioannina, MSc., University of Ioannina, Ioannina, 2012

101. Palmer H.E., *Feasibility of determining total body calcium in animals and humans by measuring ^{37}Ar in expired air after neutron irradiation.* Journal of Nuclear Medicine 14 (7): pp 522-527, 1973
102. Pauw H. and Aten A.H.W.Jr., *Neutron spectra of alpha-Beryllium neutron sources.* Health Physics 22: pp 511-514, 1972
103. Pollock C.A., Allen B.J., Warden R.A., Caterson R.J., Blagojevic N., Cocksedge B., Mahony J.F., Ibels L.S., *Total-body nitrogen by neutron activation in maintenance dialysis.* American Journal of Kidney Diseases 16 (1): pp 38-45, 1990
104. Preston T., Reeds P.J., East B.W., Holmes P.H., *A comparison of body protein determination in rats by in vivo neutron activation and carcass analysis.* Clinical Science 68: pp 349-355, 1985
105. Ryde S.J.S., Morgan W.D., Sivyer A., Evans C.J., Dutton J., *A clinical instrument for multi-element in vivo analysis by prompt, delayed and cyclic neutron activation using ^{252}Cf .* Physics in Medicine and Biology 32 (10): pp 1257-1271, 1987a
106. Ryde S.J.S., Cobbold S., Compston J., Evans C.J., Morgan W.D., *Measurement of total body calcium by a new technique of prompt-gamma in-vivo activation analysis.* Bone 8 (1): pp 53, 1987b
107. Ryde S.J.S., Morgan W.D., Evans C.J., Sivyer A., Dutton J., *Calibration and evaluation of a ^{252}Cf -based neutron activation analysis instrument for the determination of nitrogen in vivo.* Physics in Medicine and Biology 34 (10): pp 1429-1441, 1989
108. Sharafi A., Pearson D., Oxby C.B., Oldroyd B., Krupowicz D.W., Brooks K., Ellis R.E., *Multi-element analysis of a human body using neutron activation.* Physics in Medicine and Biology 28 (3): pp 203-214, 1983
109. Settle R.G., Foster K.R., Epstein B.R., Mullen J.L., *Nutritional assessment: whole body impedance and body fluid compartments.* Nutrition and Cancer 2 (1): pp 72-80, 1980

110. Shukla K.K. & Cohn S.H., *Measurement of calcium in rats by total body neutron activation analysis*. International Journal of Nuclear Medicine and Biology 1 (2): pp 73-78, 1973
111. Siri W.E., *Body composition from fluid space and density: analysis of methods*. Nutrition 9 (5): pp 480-491, 1993
112. Smith J.R.H., Athwal S.S., Chettle D.R., Scott M.C., *On the in vivo measurement of mercury using neutron capture and x-ray fluorescence*. The International Journal of Applied Radiation and Isotopes 33 (7): pp 557-561, 1982
113. Smith S. and Zachwieja J., *Visceral adipose tissue: a critical review of intervention strategies*. International Journal of Obesity 23: pp 329-335, 1999
114. Snyder W.S., Cook M.J., Nasset E.S., Karhausen L.R., Howells G.P., Tipton I.H., *Report of the Task Group on Reference Man: ICRP-23*. New York: Pergamon, 1984
115. Stamatelatos I.E., Chettle D.R., Green S., Scott M.C., *Design studies related to an in vivo neutron activation analysis facility for measuring total body nitrogen*. Physics in Medicine and Biology 37 (8): pp 1657-1674, 1992
116. Stamatelatos I.E., Chettle D.R., Scott M.C., *Studies relating to the choice of γ -ray detectors for in vivo nitrogen measurement by prompt-capture neutron activation analysis*. Physics in Medicine and Biology 38: pp 411-422, 1993a
117. Stamatelatos I.E., Dilmanian F.A., Ma R., Lidofsky L., Weber D.A., Pierson R.N., Kamen Y., Yasumura S., *Calibration for measuring total body nitrogen with a newly upgraded prompt gamma neutron activation facility*. Physics in Medicine and Biology 38: pp 615-626, 1993b
118. Stamatelatos I.E. & Yasumura S., *Prompt-gamma neutron activation facility for measuring body nitrogen in vivo in small animals*. Applied Radiation and Isotopes 46 (4): pp 269-272, 1995
119. Stamatelatos I.E., Boozer C.N., Ma R., Yasumura S., *In vivo assessment of total body protein in rats by prompt- γ neutron activation analysis*. 5th Int. Conference on Appl. Of Nuclear Techniques: Neutrons in Research and Industry. Crete, Greece, June 9 – 15, 1996

120. Stamatelatos I.E., Kasviki K., Green S., Gainey M., Kalef-Ezra J., Beddoe A., *Prompt-Gamma Neutron Activation Analysis Facility for In Vivo Body Composition Studies in Small Animals*. Analytical and Bioanalytical Chemistry 379 (2): pp 192-197, 2004
121. Stamatelatos I.E., Nanopoulos D.K., Kasviki K., Tzika F., Youtsos A.G., *Non-destructive analysis of bulk concrete samples using prompt gamma neutron activation analysis: preliminary results*. 4th International conference on NDT, Chania, Crete-Greece, 11-14 October 2007
122. Sutcliffe J.F., *A review of in vivo experimental methods to determine the composition of the human body*. Physics in Medicine and Biology 41: pp 791-833, 1996
123. Talbot C., Preston T., East B.W., *Body composition of Atlantic Salmon (Salmo salar L.) studied by neutron activation analysis*. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology 85 (3): pp 445-450, 1986
124. Tanaka G. & Kawamura H., *Reference man Models Based on Normal Data from Human Populations*. P-3a-195
125. Tanaka G. & Kawamura H., *Anatomical and Physiological Characteristics for Asian Reference Man — Male and Females of Different Ages: Tanaka Model*. NIRS-M-115 National Institute of Radiological Sciences, Hitachinaka, Japan, 1996
126. Tanaka G., Kawamura H., Griffith R.V., Cristy M., Eckerman K.F., *Reference Man models for males and females of six age groups of Asian populations*. Radiation Protection Dosimetry 79 (1-4): pp 383-386, 1998
127. Thompson M., Owen L., Wilkinson K., Wood R., Damant A., *A comparison of the Kjeldahl and Dumas methods for the determination of protein in foods, using data from a proficiency testing scheme*. Analyst 127 (12): pp 1666-1668, 2002
128. Thompson M., Owen L., Wilkinson K., Wood R. and Damant A., *Testing for bias between the Kjeldahl and Dumas methods for the determination of nitrogen in meat mixtures, by using data from a designed interlaboratory experiment*. Meat Science 68 (4): pp 631-634, 2004

129. Utteridge T.D., Ralston A.C., Wallace S.A., Allen B.J., Beddoe A.H., *Applied Radiation and Isotopes* 45: pp 789-794, 1996
130. Van Der Kooy K. and Seidell J., *Techniques for the measurement of visceral fat: a practical guide*. *International Journal of Obesity* 17: pp 187-196, 1993
131. Vartsky D., Ellis K.J., Cohn S.H., *Medical application of neutron capture γ -ray spectroscopy: measurement of cadmium and nitrogen in living human subjects.*, , 1976
132. Vartsky D., Prestwich N.W., Thomas B.J., Dabek J.T., Chettle D.R., Fremlin J.H., Stammers K., *The use of body hydrogen as an internal standard in the measurements of nitrogen in vivo by prompt neutron capture gamma-ray analysis*. *Journal of Radioanalytical Chemistry* 48: pp 243-252, 1979a
133. Vartsky D., Ellis K.J., Cohn S.H., *In vivo measurement of body nitrogen by analysis of prompt gammas from neutron capture*. *Journal of Nuclear Medicine* 20: pp 1158-1165, 1979b
134. Vartsky D., Ellis K.J., Vaswani A.N., Yasumura S., Cohn S.H., *An improved calibration for the in vivo determination of body nitrogen, hydrogen and fat*. *Physics in Medicine and Biology* 29 (3): pp 209-218, 1984
135. Wang H., Waana C., McNeill K.G., J.E. Harrison, L. Thompson, *In vivo measurement of nitrogen for small animals using nuclear techniques*. *Physics in Medicine and Biology* 32 (5): pp 637-641, 1987
136. Wang Z.M., Pierson Jr.R.N., Heymsfield S.B., *The five level model: a new approach to organizing body composition research*. *American Journal of Clinical Nutrition* 56: pp 19-28, 1992
137. Williams E.D., Boddy K., Harvey I., Haywood J.K., *Calibration and evaluation of a system of total body in vivo activation analysis using 14 MeV neutrons*. *Physics in Medicine and Biology* 23 (3): pp 405-415, 1978
138. Williams E.D. & Boddy K., *Measurements of whole-body oxygen in living humans by neutron activation analysis*. *International Journal of Applied Radiation and Isotopes* 29: pp 218-283, 1978

139. Yasumura S., Cohn S.H., Ellis K.J., *Measurement of extracellular space by total body neutron activation*. American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology 13 (1), 1983
140. Yasumura S., Stamatelatos I.E., Boozer C.N., Moore R., Ma R., *In Vivo body composition studies in rats: Assessment of total body protein*. Applied Radiation and Isotopes 49 (5-6): pp 731-732, 1998

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕ ΤΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Από την παρούσα μελέτη προέκυψαν, μέχρι την ημερομηνία κατάθεσης, οι ακόλουθες ξενόγλωσσες παρουσιάσεις σε συνέδρια και δημοσιεύσεις:

- Stamatelatos I.E., Kasviki K., Green St., Gainey M., Kalef-Ezra J., Beddoe A., *Prompt-gamma neutron activation facility for in vivo body composition studies in small animal.*, International Conference on Isotopic and Nuclear Analytical Techniques for Health and Environment, IAEA-CN-103, Vienna, Austria, 10-13 June 2003.
- Kasviki K., Stamatelatos I.E., Kalef-Ezra J., *Evaluation of spatial sensitivity of a prompt-gamma neutron activation analysis facility for the in vivo determination of nitrogen in small animals.*, 11th International Conference “Modern Trends in Activation Analysis”, MTAA-11-M079, University of Surrey, Guildford, U.K., 20-25 June 2004.
- Stamatelatos I.E., Kasviki K., Green St., Gainey M., Kalef-Ezra J., Beddoe A., *Prompt-gamma neutron activation facility for in vivo body composition studies in small animal.*, Analytical and Bioanalytical Chemistry, 379 (2) pp 192-197, 2004
- Kasviki K., Stamatelatos I.E., Yannakopoulou E., Papadopoulou P., Kalef-Ezra J., *On the accuracy of protein determination in large biological samples by prompt gamma neutron activation analysis.*, 6th International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications, IRRMA-6-44, McMaster University, Hamilton, Canada, 20-24 June 2005.
- Kasviki K., Stamatelatos I.E., Kalef-Ezra J., *Evaluation of spatial sensitivity of a prompt-gamma neutron activation analysis facility for the in vivo determination of nitrogen in small animals.*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 271 (1) pp 225-231, 2007.
- Kasviki K., Stamatelatos I.E., Yannakopoulou E., Papadopoulou P., Kalef-Ezra J., *On the accuracy of protein determination in large biological samples by prompt gamma neutron activation analysis.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research - Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 263 (1) pp 132-135, 2007.
- Stamatelatos I. E., Nanopoulos D. K., Kasviki K., Tzika F. and Youtsos A. G., *Non-destructive analysis of large concrete samples: Preliminary results*, 4th International Conference on Non-Destructive Testing, Chania, Crete, Greece, 11-14 October 2007.

- Κασβίκη Κ., Σταματελάτος Ι.Ε., Καλέφ-Εζρά Τ., *Μέτρηση της συνολικής πρωτεΐνης με άμεση νετρονική ενεργοποίηση, για την μέτρηση της συνολικής πρωτεΐνης σε βιολογικά δείγματα και μικρά ζώα*, 18^ο Διαπανεπιστημιακό Συνέδριο Ακτινολογίας, Ιωάννινα 2008

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΜΕΛΕΤΗ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ με ΝΕΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ

A.1 ΥΛΙΚΑ

A.1.1. Πειραματική διάταξη

Η πηγή ακτινοβολίας της διάταξης είναι μια ισοτοπική πηγή νετρονίων $^{239}\text{Pu-Be}$ με ενεργότητα του ^{239}Pu 1.85×10^{11} Bq (5 Ci) στις 01/07/1963 και αριθμό εκπεμπόμενων νετρονίων ανά μονάδα χρόνου 9.46×10^6 n/s κατά την ημερομηνία αναφοράς.

Η επιλογή των υλικών και των διαστάσεων της βιολογικής θωράκισης της πηγής έγινε με στόχο τον περιορισμό της έκθεσης των εργαζομένων στα νετρόνια και φωτόνια της πηγής και στα φωτόνια που ακολουθούν τις αλληλεπιδράσεις των νετρονίων και των φωτονίων με τα υλικά της θωράκισης. Για τη θωράκιση από τα νετρόνια απαιτούνται υλικά με υψηλή ενεργό διατομή σκέδασης και απορρόφησης νετρονίων. Στοιχεία με υψηλή μικροσκοπική ενεργό διατομή σκέδασης νετρονίων στην ενεργειακή περιοχή του φάσματος της πηγής είναι το υδρογόνο και ο άνθρακας. Οι πυρήνες αυτών των στοιχείων επιβραδύνουν τα ταχέα νετρόνια μέσω ελαστικών σκεδάσεων και μειώνουν την ενέργειά τους μέχρι να γίνουν θερμικά. Στοιχεία όπως το βόριο ($\sigma_a=755$ barn) και το λίθιο ($\sigma_a=71$ barn) έχουν υψηλή μικροσκοπική ενεργό διατομή απορρόφησης θερμικών νετρονίων, ενώ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και σύλληψη θερμικών νετρονίων στο υδρογόνο. Τη σύλληψη θερμικών νετρονίων από τους πυρήνες των στοιχείων της θωράκισης, ακολουθεί εκπομπή διεισδυτικών ακτίνων-γ. Επιπλέον η θωράκιση της διάταξης πρέπει να περιέχει υλικό που να εξασθενεί ικανοποιητικά αυτές τις ακτίνες-γ καθώς και τα φωτόνια ενέργειας 4.43 MeV που εκπέμπονται από την

πηγή. Συνήθως το υλικό που χρησιμοποιείται για την εξασθένηση των ακτίνων-γ είναι ο μόλυβδος.

Με βάση τα προαναφερόμενα, η θωράκιση της πηγής ακτινοβολήσης επιλέχθηκε ώστε να αποτελείται από πλάκες βοριομένου πολυαιθυλενίου πάχους 20 cm σε ορθογώνια διάταξη γύρω από τον κατευθυντήρα δέσμης και κάτω από την πηγή. Επιπλέον πλάκες βοριομένου πολυαιθυλενίου πάχους 20 cm με προσθήκη διάσπαρτων σκαγιών μολύβδου έχουν τοποθετηθεί γύρω από το πρώτο επίπεδο θωράκισης. Πάνω από τη θωράκιση και στα όρια του ανοίγματος του κατευθυντήρα έχουν τοποθετηθεί ορθογώνιες παραλληλεπίπεδες πλάκες μολύβδου πάχους 5 cm και πλάκες βοριομένου πολυαιθυλενίου πάχους 20 cm, με σκοπό την εξασθένηση και απορρόφηση των νετρονίων και φωτονίων που κατευθύνονται προς τους ανιχνευτές. Οι εξωτερικές διαστάσεις της θωράκισης είναι: μήκος 120 cm, πλάτος 110 cm και ύψος 100 cm.

A.1.2. Περιγραφή χώρου

Η διάταξη εγκαταστάθηκε στο δάπεδο του κτιρίου του Ερευνητικού Αντιδραστήρα στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος». Σύμφωνα με τον εσωτερικό Κανονισμό Ακτινοπροστασίας του Εργαστηρίου η περιοχή ορίζεται ως 'ελεγχόμενη'. Η περιοχή είναι αυστηρά ελεγχόμενη και η πρόσβαση στο χώρο γίνεται μόνο από εξουσιοδοτημένα άτομα. Η παραμονή των ατόμων στο χώρο είναι περιορισμένη και μόνο στα πλαίσια συγκεκριμένης και εγκεκριμένης εργασίας, ώστε η ετήσια έκθεση ενός ατόμου να μην υπερβαίνει το αντίστοιχο όριο δόσης.

A.1.3. Όρια δόσεων

Τα ετήσια όρια ενεργών δόσεων, όπως ορίστηκαν με αριθμό απόφασης 1014(ΦΟΡ)94 στην Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (ΦΕΚ 216/Β, 06-03-2001) που αφορά την έγκριση Κανονισμών Ακτινοπροστασίας, δίνονται στον Πίνακα Α-1.

Πίνακας Α-1 Όρια δόσεων

<i>Ομάδα ατόμων</i>	<i>Όριο Ενεργού Δόσης</i>
Επαγγελματικά εκτιθέμενοι	20 mSv/έτος
Κοινό	1 mSv/έτος

Τα περιοριστικά επίπεδα δόσεων επαγγελματικά εκτεθειμένων ορίζονται στα 3/10 του αντίστοιχου ορίου δόσης, δηλαδή 6 mSv/y [ΦΕΚ 216/Β 2001].

A.1.4. Όργανα μέτρησης

Τα όργανα μέτρησης του ρυθμού ισοδύναμης δόσης δίνονται στον Πίνακα Α-2. Ο ανιχνευτής φωτονίων έχει βαθμολογηθεί στο υποπρότυπο εργαστήριο βαθμονόμησης Ε.Β.Ο.Ι.Α της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας.

Πίνακας Α-2 Όργανα μέτρησης ρυθμού ισοδύναμης δόσης.

Σωματίδια	ανιχνευτής
νετρόνια	φορητός αναλογικός ανιχνευτής Berthold LB6411 + LB123
φωτόνια	ανιχνευτής τύπου Geiger-Mueller Philips PW4012

A.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

A.2.1. Παραδοχές

- ✓ Χρόνος κατάληψης στη θέση μέτρησης: 0.5 h/ημέρα x 5 ημέρες/εβδομάδα x 50 εβδομάδες /χρόνο = 125 h/χρόνο
- ✓ Θέση επαγγελματικά εργαζόμενου: 1 m από την εξωτερική επιφάνεια της διάταξης
- ✓ Χρόνος τοποθέτησης δείγματος: 20 s

A.2.2. Μετρήσεις – Υπολογισμοί

(I) Ο ρυθμός δόσης σε οριζόντια απόσταση 1 m από τη διάταξη (θέση εργασίας) μετρήθηκε με φορητό όργανο μέτρησης νετρονίων και βρέθηκε 1.9 $\mu\text{Sv/h}$. Με χρόνο κατάληψης 125 ώρες/έτος, η ισοδύναμη δόση από νετρόνια στη διάρκεια ενός έτους είναι 0.24 mSv.

Ο ρυθμός έκθεσης, στο ίδιο σημείο, από φωτόνια της πηγής και από φωτόνια που εκπέμπονται από αλληλεπιδράσεις των νετρονίων με τα υλικά της θωράκισης μετρήθηκε με ανιχνευτή τύπου Geiger-Mueller και βρέθηκε 0.15 mSv/h, άρα ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης είναι περίπου 1.5 $\mu\text{Sv/h}$. Με χρόνο κατάληψης 125 ώρες/έτος, η ισοδύναμη δόση από

φωτόνια στη διάρκεια ενός έτους είναι 0.19 mSv. Η απόκριση του ανιχνευτή G-M στα νετρόνια μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα στις περισσότερες περιπτώσεις μετρήσεων ακτινοπροστασίας [Guldbakke S. 1980]. Ως εκ τούτου, η συνολική ισοδύναμη δόση από νετρόνια και φωτόνια είναι 0.43 mSv για ένα έτος.

(II) Αντίστοιχες μετρήσεις σε επαφή με τη θωράκιση και στο ύψος της πηγής οδηγούν σε ισοδύναμη δόση 8.7 mSv/h.

A.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην περίπτωση (I) της παραγράφου A.2.2. η συνολική ισοδύναμη δόση είναι μικρή και δεν απαιτείται κάποιο επιπλέον μέτρο ακτινοπροστασίας.

Στην περίπτωση (II) της παραγράφου A.2.2. η συνολική ισοδύναμη δόση είναι υψηλή, αλλά δεν αντιπροσωπεύει θέση εργασίας ατόμου. Σημειώνουμε ότι η διάρκεια τοποθέτησης του δείγματος στη θέση ακτινοβόλησης είναι περίπου 20 sec.

Στο ενδεχόμενο χρήσης της διάταξης για μετρήσεις ρουτίνας και μεγαλύτερους χρόνους κατάληψης θα πρέπει να επανεξεταστούν: η θέση εργασίας (μεγαλύτερη του 1 m) και η τοποθέτηση δείγματος και επεξεργασία των φασμάτων να γίνεται με αυτοματοποιημένο τρόπο και από απόσταση.

Γενικά, η θωράκιση της πηγής ακτινοβόλησης της διάταξης AANE είναι επαρκής για λειτουργία της διάταξης εντός του χώρου του αντιδραστήρα και με τις παραδοχές τις αναφερόμενες στην παράγραφο A.2.1.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΦΕΚ 216/Β, Υπουργική Απόφαση 1014 (ΦΟΠ) 94, 06/03/01, Κανονισμός Ακτινοπροστασίας, 2001
2. Guldbakke S., Jahr R., Lesiecki H., Scholermann H., Neutron response of Geiger-Muller photon dosimeters for neutron energies between 100 keV and 19 MeV. Health Physics 39: pp 963-969, 1980

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ‘ΚΑΘΑΡΩΝ’ ΠΑΛΜΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Αριθμός ‘καθαρών’ παλμών αζώτου: $N = G - B$ Εξίσωση B-1

Στατιστικό σφάλμα των ‘καθαρών’ παλμών: $\sigma(N) = \sqrt{\sigma^2(G) + \sigma^2(B)}$ Εξίσωση B-2

Σχετικό σφάλμα αριθμού ‘καθαρών’ παλμών: $\sigma_{\sigma\lambda}(N) = \frac{\sqrt{G+B}}{G-B}$ Εξίσωση B-3

Ρυθμός μικτών παλμών: $R_G = \frac{G}{lt}$ Εξίσωση B-4

Ρυθμός παλμών υποβάθρου: $R_B = \frac{B}{lt}$ Εξίσωση B-5

Ρυθμός ‘καθαρών’ παλμών: $R_N = R_G - R_B$ Εξίσωση B-6

Στατιστικό σφάλμα του ρυθμού μικτών παλμών: $\sigma(R_G) = \frac{\sqrt{G}}{lt}$ Εξίσωση B-7

Στατιστικό σφάλμα του ρυθμού παλμών υποβάθρου: $\sigma(R_B) = \frac{\sqrt{B}}{lt}$ Εξίσωση B-8

Στατιστικό σφάλμα του ρυθμού ‘καθαρών’ παλμών:

$$\sigma(R_N) = \sqrt{\sigma^2(R_G) + \sigma^2(R_B)} = \frac{\sqrt{G+B}}{lt} \quad \text{Εξίσωση B-9}$$

όπου : lt είναι ο ενεργός χρόνος μέτρησης του ανιχνευτή (s).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΣΥΣΤΑΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ
ΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΙΑΣ

<i>ΥΛΙΚΟ</i>	<i>ΣΤΟΙΧΕΙΟ</i>	<i>% κ.β.</i>
Boroflex™	B	32.74
	C	21.13
	H	2.65
	Cr	0.03
	Fe	0.05
	O	21.01
	Si	22.39

<i>ΥΛΙΚΟ</i>	<i>ΣΤΟΙΧΕΙΟ</i>	<i>% κ.β. *1</i>
Παραφίνη	H	14.86
	C	85.14

<i>ΥΛΙΚΟ</i>	<i>ΣΤΟΙΧΕΙΟ</i>	<i>% κ.β. *2</i>
Βοριομένο	H	11.6
πολυαιθυλένιο	C	61.2
	O	22.2
	B	5.0

<i>ΥΛΙΚΟ</i>	<i>ΣΤΟΙΧΕΙΟ</i>	<i>% κ.β.</i> ^{*3}
Πολυαιθυλένιο	H	14.37
	C	85.63

<i>ΥΛΙΚΟ</i>	<i>ΣΤΟΙΧΕΙΟ</i>	<i>% κ.β.</i> ^{*4}
Plexiglass	H	8.05
	C	59.98
	O	31.96

^{*1} <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl?matno=213>

^{*2} Κατασκευή στο εργαστήριο

^{*3} <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl?matno=221>

^{*4} <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl?matno=223>