

Α.Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕ ΘΕΜΑ:

**«ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΚΤΙΝΟΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ
ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ»**

ΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ
ΑΒΡΑΑΜ ΦΩΤΕΙΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Ι. ΔΑΜΗΛΑΚΗΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ
ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Ι. Δαμηλάκη, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για τις πολύτιμες γνώσεις και τη σωστή καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου. Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Κ. Περισυνάκη για την έμπρακτη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την κ. Μ. Ραϊσάκη και όλους τους Ιατρούς και Τεχνολόγους του Ακτινολογικού Τμήματος του Νοσοκομείου για τη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειραματικού μέρους της εργασίας αυτής.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα την οικογένειά μου για την κατανόηση και τη συμπαράστασή της σε όλο το διάστημα των σπουδών μου.

Ηράκλειο, Οκτώβριος 2004

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Δοσιμετρία είναι ο κλάδος της επιστήμης που ασχολείται με τις μετρήσεις ιοντιζουσών ακτινοβολιών, με σκοπό την ποσοτική έκφραση της σχέσης μεταξύ των χαρακτηριστικών ενός πεδίου ακτινοβολήσης και του αποτελέσματος της ακτινοβολήσης ενός συστήματος. Η δοσιμετρία συνεισφέρει σημαντικά σε όσες επιστήμες κάνουν χρήση ιοντιζουσών ακτινοβολιών, και ιδιαίτερα στο χώρο της Ιατρικής, απ' όπου και πρωτοξεκίνησε η εφαρμογή της. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι δοσιμετρίας, και φυσικά, πολλά διαφορετικά είδη δοσιμέτρων. Στην συγκεκριμένη εργασία θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τη δοσιμετρία θερμοφωταύγειας.

Το φαινόμενο της θερμοφωταύγειας βρίσκει πρακτική εφαρμογή στη δοσιμετρία ιοντιζουσών ακτινοβολιών με τη συλλογή των οπτικών φωτονίων που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση του θερμοφωταυγάζοντος υλικού, που χρησιμοποιείται. Η μέθοδος της θερμοφωταύγειας αποτελεί την πιο αξιόπιστη μέθοδο για την μέτρηση δόσεων ακτινοβολίας από ιατρικές εξετάσεις. Οι εφαρμογές της TL δοσιμετρίας στην Ιατρική αφορούν κυρίως μετρήσεις της απορροφούμενης δόσεως στην Ακτινοθεραπεία και την Ακτινοδιαγνωστική, ενώ εφαρμόζεται σε μικρότερο βαθμό και στην Πυρηνική Ιατρική.

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μέτρηση δόσεων ασθενών, που υποβάλλονται σε ακτινοδιαγνωστικές εξετάσεις, με τη βοήθεια κρυστάλλων θερμοφωταύγειας. Στην Ακτινοδιαγνωστική, η ανάγκη της δοσιμέτρησης προκύπτει από τις επιταγές της Ακτινοπροστασίας, η οποία απαιτεί τη μικρότερη δυνατή δόση στον ασθενή και το προσωπικό, με την καλύτερη δυνατή ποιότητα απεικόνισης. Κι η ανάγκη αυτή γίνεται πιο επιτακτική, όταν οι ακτινοδιαγνωστικές εξετάσεις αφορούν νεογνά και μικρά παιδιά, όπως συμβαίνει στην παρούσα μελέτη, καθώς οι συγκεκριμένες ομάδες του πληθυσμού χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό ακτινοευαισθησίας. Πιο συγκεκριμένα, καλούμαστε να υπολογίσουμε την δόση που λαμβάνουν τα νεογνά και τα μικρά παιδιά, όταν υποβάλλονται σε εξέταση οισοφαγογραφήματος ή κυστεογραφίας, που πραγματοποιούνται προκειμένου να ελεγχθεί η φυσιολογία και η λειτουργία του πεπτικού ή του ουροποιητικού συστήματος αντίστοιχα. Παράλληλα, καλούμαστε να εκτιμήσουμε τον τυχόν κίνδυνο καρκινογένεσης, λόγω των σχολαστικών αποτελεσμάτων της ακτινοβολίας, έπειτα από συσχέτιση με την τιμή της απορροφούμενης δόσης που προκύπτει.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας συμπεριλαμβάνεται και ένα επιπλέον πειραματικό κομμάτι, που περιλαμβάνει σειρά διαδικασιών βαθμονόμησης TLD100 και TLD200 υπό καθορισμένες συνθήκες, προκειμένου να διαπιστωθεί αν ο συντελεστής βαθμονόμησης των δύο αυτών ειδών θερμοφωταυγάζοντων υλικών επηρεάζεται από τη γωνία ακτινοβολήσής τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	9
ΑΚΤΙΝΕΣ – Χ	9
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.2 ΦΥΣΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ – Χ.....	9
1.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ...	10
1.4 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ – Χ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	16
ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ – ΕΙΔΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ	16
2.1 ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ.....	16
2.1.1 ΔΟΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ Ή ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΔΟΣΗ.....	16
2.1.2 ΕΚΘΕΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	17
2.1.3 ΔΟΣΗ – ΕΚΘΕΣΗ	18
2.1.4 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	18
2.1.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ Q	18
2.1.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ W_R	19
2.1.7 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΔΟΣΗ	19
2.1.8 ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΙΣΤΟΥ W_T	20
2.1.9 ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΟΣΗ.....	20
2.1.10 ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΔΡΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ (RBE).....	21
2.2 ΔΟΣΙΜΕΤΡΑ	22
2.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ.....	22
2.2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ.....	23
2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ - ΕΙΔΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ	24
2.3.1 ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΑΕΡΙΟΥ.....	24
2.3.2 ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ	28
2.3.3 ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΕΣ	30
2.3.4 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ	31
2.3.5 ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟΥ.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	35
ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑ	35
3.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ	35
3.2 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΑΖΟΝΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	38

3.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΙΚΩΝ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ	39
3.4 ΓΕΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ.....	41
3.5 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΙΓΛΗΣ	42
3.6 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΙΓΛΗΣ LiF:Mg:Tl.....	45
3.7 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΑΤΟΜΩΝ ΠΡΟΣΜΙΞΗΣ Mg, Tl ΣΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ ΤΟΥ LiF:Mg:Tl.....	47
3.8 ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ (FADING).....	48
3.9 ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ / ΥΠΕΡΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ / ΚΟΡΕΣΜΟΣ / ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΣΗ	50
3.10 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΦΩΤΟΝΙΑ	52
3.11 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ	54
3.12 ΥΛΙΚΑ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ	55
3.13 ΑΝΑΓΝΩΣΤΗΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ (TLD READER)	61
3.14 ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ TLD (ANNEALING).....	64
3.15 ΣΗΜΑ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ (BACKGROUND).....	64
3.16 ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	67
ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ -	
ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ	67
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	67
4.2 DNA: Η ΑΙΤΙΑ ΤΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΚΤΙΝΟΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΥΛΗΣ	67
4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ – ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΥΛΗΣ	68
4.4 ΠΡΟΣΒΟΛΗ DNA ΑΠΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	69
4.5 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΠΙΒΙΩΣΗΣ ΚΥΤΤΑΡΩΝ	73
4.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ	73
4.7 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ	76
4.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	78
4.9 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΙΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ	79
4.10 ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ	81
4.10.1 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	81
4.10.2 ΑΡΧΕΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	81
4.10.3 ΜΕΤΡΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	82
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	87
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	87
5.1 ΑΚΤΙΝΟΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ.....	87
5.2 ΔΟΣΙΜΕΤΡΑ, ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΥΤΩΝ.....	91
5.2.1 ΔΟΣΙΜΕΤΡΑ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ (TLDs)	91
5.2.2 ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ (TLD READER)	92

5.2.3 ΦΟΥΡΝΟΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ (ANNEALING OVEN)	95
5.2.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ.....	97
5.2.5 ΘΑΛΑΜΟΣ ΙΟΝΙΣΜΟΥ.....	99
5.2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ ΚΑΙ ΔΟΣΗΣ	99
5.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΕΤΑΣΕΩΝ	100
5.3.1 ΟΙΣΟΦΑΓΟΓΡΑΦΗΜΑ.....	100
5.3.2 ΚΥΣΤΕΟΓΡΑΦΙΑ.....	103
5.3.3 ΜΕΤΡΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΣΕΩΝ ΚΥΣΤΕΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΟΙΣΟΦΑΓΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ.....	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	106
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ	
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	106
6.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ ΣΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ (C) ΤΩΝ TLD100 ΚΑΙ TLD200.....	106
6.2 ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΟΙΣΟΦΑΓΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ.....	119
6.3 ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΚΥΣΤΕΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	124
6.4 ΣΦΑΛΜΑΤΑ.....	127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο	130
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	134

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΑΚΤΙΝΕΣ – X

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανακάλυψη των ακτίνων X ήταν αποτέλεσμα μελετών και πειραμάτων, σχετικών με ηλεκτρικές εκκενώσεις σε αέρια, δηλαδή μελετών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των αερίων σε χαμηλές πιέσεις.

Ο W.C. Roentgen, καθηγητής της φυσικής του πανεπιστημίου του Wurzburg, ασχολήθηκε, όπως και άλλοι επιστήμονες της εποχής του, με τη μελέτη ηλεκτρικών εκκενώσεων, και το Δεκέμβριο του 1895 ανακοίνωσε την ανακάλυψη μιας άγνωστης έως τότε ακτινοβολίας, την οποία χαρακτήρισε ως X. Αμέσως, άρχισε εντατική μελέτη των ακτίνων X, τέτοιας εκτάσεως, ώστε δεν άργησαν να παρουσιαστούν τα πρώτα δυσμενή βιολογικά αποτελέσματα στους ερευνητές, μέσα σε διάστημα λίγων μόλις μηνών.

Η ακτινοβολία X είναι μια αόρατη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, με ενέργεια φωτονίων από λίγα keV έως πολλά MeV (ή μήκη κύματος $10^{-12} - 10^{-7}\text{m}$), που έχει την ιδιότητα να διαπερνά αδιαφανή ή στερεά σώματα, προκαλώντας το φθορισμό ορισμένων κρυστάλλων ή προσβάλλοντας το φωτογραφικό φιλμ.

1.2 ΦΥΣΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ – X

Οι ακτίνες X παράγονται από την πρόσκρουση ταχέων ηλεκτρονίων σε κατάλληλο στόχο. Η παραγωγή των ακτίνων X γίνεται μέσω δύο διαφορετικών διαδικασιών, που περιγράφονται στη συνέχεια της παραγράφου.

- Παραγωγή ακτινοβολίας πέδησης (ή συνεχούς φάσματος)

Όταν ένα ηλεκτρόνιο της προσπίπτουσας δέσμης αλληλεπιδρά με το ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο ενός πυρήνα του υλικού, από το οποίο αποτελείται ο στόχος, τότε υποβάλλεται σε τυχαίες και απότομες μεταβολές της ταχύτητάς του, ενώ μέρος

της αρχικής κινητικής του ενέργειας εκπέμπεται ως ακτινοβολία X, που ονομάζεται ακτινοβολία πέδησης.

Η ενέργεια των παραγόμενων φωτονίων κυμαίνεται από μηδέν έως μια μέγιστη ενέργεια, η οποία είναι ίση με την κινητική ενέργεια του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου. Το ενεργειακό φάσμα της ακτινοβολίας πέδησης είναι συνεχές, ενώ η παραγωγή της ακτινοβολίας αυτής αυξάνεται με αύξηση της τάσης στη λυχνία και του ατομικού αριθμού του υλικού του στόχου.

- Παραγωγή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας

Κατά την πρόσκρουση ενός ηλεκτρονίου στο στόχο, δύναται να σημειωθεί αλληλεπίδραση αυτού με ηλεκτρόνιο εσωτερικής στιβάδας ενός ατόμου του στόχου, που έχει ως αποτέλεσμα την εκτόξευση του δεύτερου εκτός ατόμου (ιονισμός). Η κενή θέση συμπληρώνεται με ηλεκτρόνιο υψηλότερης στιβάδας, πράγμα που συνοδεύεται με ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίου. Τα εκπεμπόμενα φωτόνια αποτελούν τη χαρακτηριστική ακτινοβολία του υλικού του στόχου. Οι ενέργειές τους είναι διακριτές και ίσες με την ενεργειακή διαφορά των στιβάδων, ανάμεσα στις οποίες γίνεται η μετάβαση, κι έτσι, το ενεργειακό φάσμα της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας είναι, κατά συνέπεια, γραμμικό, ενώ εμφανίζεται με τη μορφή αιχμηρών κορυφών επικαθήμενων στο φάσμα της ακτινοβολίας πεδήσεως.

1.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Μια δέσμη ακτινοβολίας X χαρακτηρίζεται από δύο ιδιότητες, από την ποιότητα και την ποσότητα. Η ποιότητα αναφέρεται στη διεισδυτική ικανότητα της δέσμης μέσα στην ύλη, είναι μια εξαιρετικά σημαντική παράμετρος που καθορίζει ορισμένες βασικές φυσικές ιδιότητές της (όπως την εξασθένισή της κατά τη διέλευσή της στην ύλη, τον τύπο αλληλεπιδράσεων μετά τη πρόσπτωση, κ.α.), και καθορίζεται από τη μέγιστη ενέργεια των φωτονίων του φάσματός της, τις σχετικές εντάσεις των φωτονίων στις ενέργειες του φάσματος και τις χαρακτηριστικές κορυφές. Απ' την άλλη, η ποσότητα σχετίζεται με τον αριθμό των φωτονίων που την απαρτίζουν, και άρα με την ένταση αυτής.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα ή την ποσότητα ή και τις δύο παραμέτρους, και κατά συνέπεια το παραγόμενο φάσμα, είναι:

- Υψηλή τάση (kVp)

Αύξηση της υψηλής τάσης μετατοπίζει σε υψηλότερη τιμή τη μέγιστη ενέργεια της δέσμης, την ενέργεια με μέγιστη συχνότητα εμφάνισης, και άρα τη μέση ενέργεια της δέσμης, όπως και την ένταση της δέσμης, χωρίς να επηρεάζει τη θέση των χαρακτηριστικών κορυφών και την ελάχιστη τιμή της ενέργειας των παραγόμενων φωτονίων.

- Κυματομορφή υψηλής τάσης

Η διεισδυτική ικανότητα μιας δέσμης ακτίνων X, η οποία παράγεται από εφαρμογή εναλλασσόμενης υψηλής τάσεως, είναι μικρότερη από εκείνη που προκύπτει με εφαρμογή συνεχούς τάσεως. Ανάλογα με την κυματομορφή υψηλής τάσεως, μεταβάλλεται, επίσης, και η ένταση της δέσμης.

- Υλικό ανόδου

Το υλικό της ανόδου, δηλαδή του στόχου, δεν επηρεάζει ούτε την ελάχιστη ούτε τη μέγιστη τιμή της ενέργειας της δέσμης. Καθορίζει, ωστόσο, τη θέση των χαρακτηριστικών κορυφών και την ένταση της παραγόμενης ακτινοβολίας (εμβαδόν κάτω απ' τις καμπύλες), καθώς αυτή είναι ανάλογη του ατομικού αριθμού του στοιχείου του στόχου.

- Ηθμοί (Φίλτρα)

Τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας της δέσμης ακτίνων X ($E_{\text{φωτονίου}} < 25\text{keV}$) δεν συμβάλλουν στη διαμόρφωση ακτινοδιαγνωστικής εικόνας, καθώς απορροφώνται από τον εξεταζόμενο. Η απομάκρυνση αυτών των φωτονίων είναι επιθυμητή και επιτυγχάνεται με την παρεμβολή στην πορεία της δέσμης ηθμών ή φίλτρων, δηλαδή τεμαχίων μετάλλου, συνήθως αλουμινίου ή χαλκού, που απορροφούν τα φωτόνια μικρής ενέργειας, ώστε να αποφεύγεται η αύξηση της δόσης στον ασθενή, χωρίς ωφέλιμο αποτέλεσμα.

Ο ηθμός δεν επηρεάζει ούτε τη μέγιστη ενέργεια των παραγόμενων φωτονίων ούτε τη θέση των χαρακτηριστικών κορυφών, τις οποίες, όμως, μπορεί να αποκόψει. Αύξηση του φιλτραρίσματος προκαλεί αύξηση της μέσης διεισδυτικής ικανότητας της δέσμης και ελάττωση της έντασης αυτής.

- Ρεύμα λυχνίας (mA)

Η ολική εκπομπή των φωτονίων της ακτινοβολίας X εξαρτάται από τον αριθμό των ηλεκτρονίων που προσκρούουν στην άνοδο, ή αλλιώς από το ρεύμα της

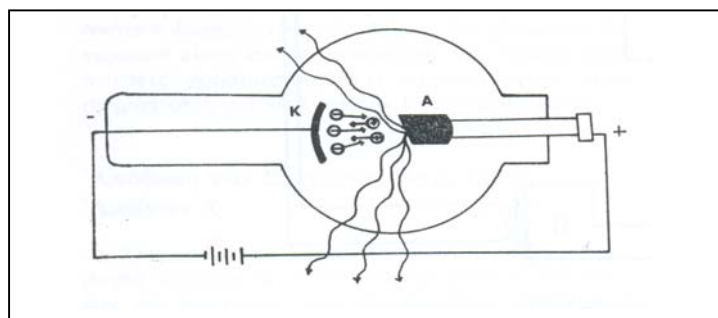
λυχνίας. Όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα τόσο μεγαλύτερη είναι και η ένταση της δέσμης.

1.4 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ – X

Οι ακτίνες X χρησιμοποιούνται τόσο στην Ακτινοδιαγνωστική όσο και στην Ακτινοθεραπεία. Στην Ακτινοδιαγνωστική χρησιμοποιούνται δέσμες ακτίνων X με ενέργειες φωτονίων έως 150KeV, στην κλασσική Ακτινοθεραπεία έως 500KeV, ενώ στην Ακτινοθεραπεία με ακτίνες υψηλής ενέργειας έως 25MeV. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις, η παραγωγή ακτίνων επιτυγχάνεται μέσω λυχνίας, ενώ στην τελευταία μέσω επιταχυντών. Στην συνέχεια της παραγράφου, ακολουθεί σύντομη περιγραφή των διατάξεων παραγωγής ακτίνων X.

- Σωλήνας Crookes

Αρχικά, για την παραγωγή ακτίνων X, χρησιμοποιήθηκαν οι σωλήνες Crookes, στους οποίους η πίεση ήταν περίπου ίση με $P = 10^{-3}$ mmHg. Πρόκειται για έναν αερόκενο σωλήνα με δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο. Η διάταξη σύντομα εγκαταλείφθηκε, λόγω αστάθειας στη λειτουργία της, κι έτσι, σήμερα χρησιμοποιείται μόνο για επιδείξεις.

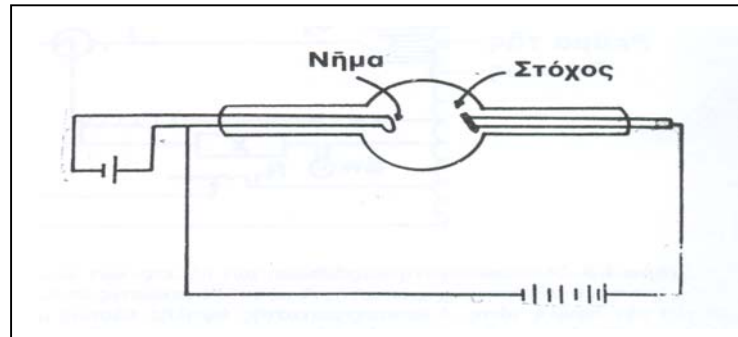


Εικόνα 1.1 Σωλήνας Crookes

- Σωλήνας Coolidge

Το 1913, ο W.D. Coolidge εισήγαγε τη βασική σχεδίαση της ομώνυμης λυχνίας παραγωγής ακτίνων X, η οποία χρησιμοποιείται και σήμερα σε εξελιγμένη μορφή. Έχει δομή όμοια με αυτή του σωλήνα, με τη διαφορά ότι εδώ υπάρχει ξεχωριστό κύκλωμα παραγωγής ηλεκτρονίων, που αποτελείται από νήμα βολφραμίου

στην κάθοδο, απ' το οποίο επιταχύνονται με υψηλή τάση, προσκρούοντας στην άνοδο, και παράγοντας, έτσι, ακτινοβολία X. Μια επίσης σημαντική διαφορά είναι πως εδώ, η πίεση είναι περίπου ίση με $P = 10^{-6}$ mmHg.

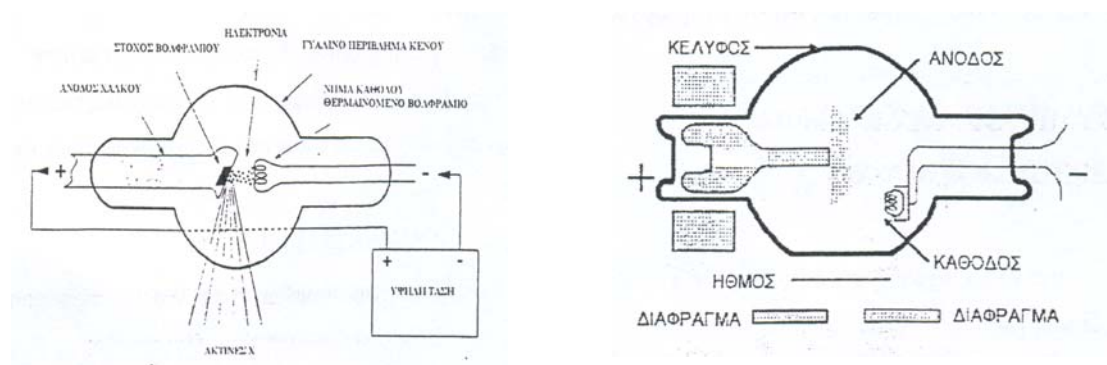


Εικόνα 1.2 Σχηματική παράσταση Σωλήνα Coolidge

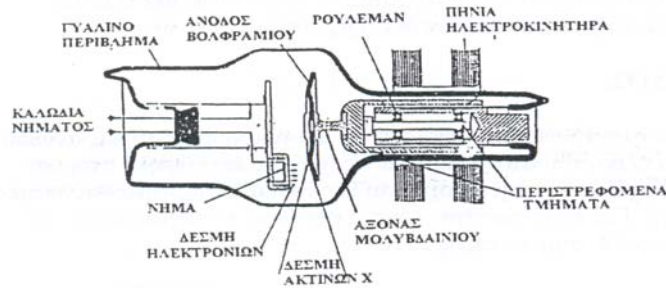
- Σύγχρονη Λυχνία ακτίνων X

Όπως είπαμε παραπάνω, ο σχεδιασμός τους βασίζεται στους σωλήνες Coolidge. Τα βασικά δομικά μέρη τους είναι τα εξής:

- Η κάθοδος, όπου παράγεται η δέσμη των ηλεκτρονίων
- Ο χώρος υψηλού κενού, στον οποίο επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια
- Η άνοδος, στην οποία παράγεται η δέσμη ακτίνων X, και η οποία είναι συνήθως περιστρεφόμενη για να μην υπερθερμαίνεται
- Το γυάλινο κέλυφος που περιβάλλει τη λυχνία και είναι κατάλληλα θωρακισμένο με μολύβδινο περίβλημα



Εικόνα 1.3 Σχηματικές παραστάσεις σύγχρονων λυχνιών



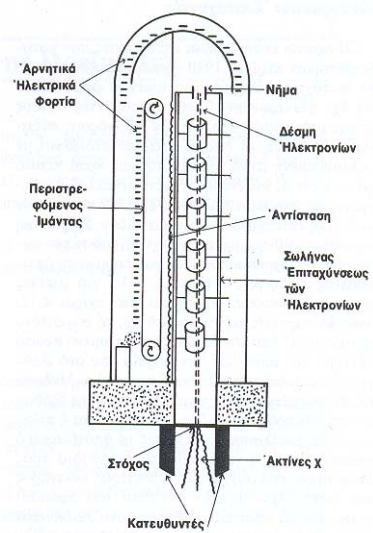
Εικόνα 1.4 Περιστρεφόμενη λυχνία

Ανάλογα με τις εφαρμογές, στις οποίες θα χρησιμοποιηθούν, συναντάμε κάποιες μικρές παραλλαγές στη βασική δομή τους (κλασικά ακτινοθεραπευτικά, οδοντιατρικές συσκευές, αγγειογράφοι, κ.α.).

Αν και δε θα ασχοληθούμε με συσκευές παραγωγής ακτίνων X υψηλής ενέργειας, στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη η αναφορά τους. Τέτοιες είναι:

- Γεννήτρια Van de Graaf

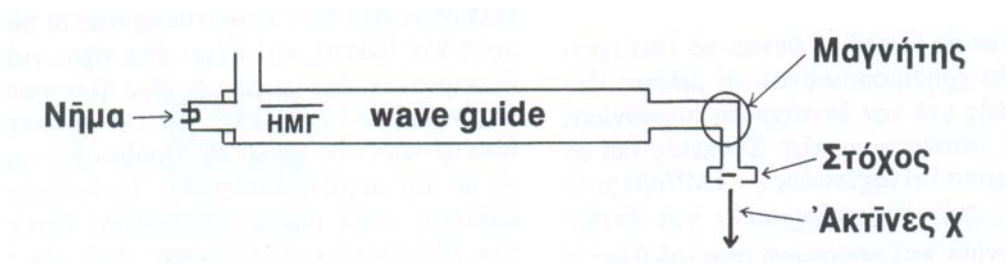
Πρόκειται για έναν ηλεκτροστατικό επιταχυντή, που κατασκευάστηκε το 1931 και επιτρέπει τη παραγωγή ακτίνων X με ενέργειες 2-4MeV.



Εικόνα 1.5 Συσκευή Van de Graaf

- Γραμμικός επιταχυντής

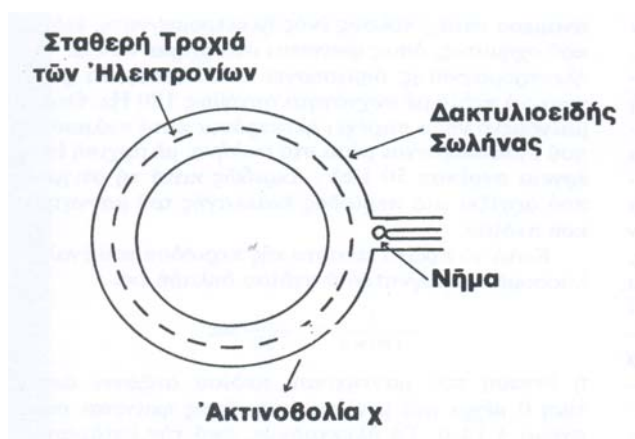
Πρωτοκατασκευάστηκε το 1930, πήρε όμως τη πρώτη σύγχρονη μορφή του το 1948 από τον Hansen. Έχει τη δυνατότητα παραγωγής ακτίνων X με ενέργειες 2-45MeV.



Εικόνα 1.6 Σχηματική παράσταση ευθύγραμμου επιταχυντή

- Βητατρόνιο

Πρόκειται για έναν κυκλικό επιταχυντή ηλεκτρονίων, που κατασκευάστηκε το 1950 και δίνει ακτίνες X ενέργειας 6-45MeV.



Εικόνα 1.7 Βητατρόνιο

Ακτίνες X δύναται να παραχθούν και από ανεπιθύμητους μηχανισμούς, που είναι σχεδιασμένοι για άλλες λειτουργίες, όπως από σωλήνες καθοδικών ακτίνων, ηλεκτρονικά μικροσκόπια, ηλεκτρονικές λυχνίες, ακόμη και από ισότοπα που εκπέμπουν ακτινοβολία β.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ – ΕΙΔΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ

2.1 ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

Δοσιμετρία είναι ο κλάδος της επιστήμης, που ασχολείται με τις μετρήσεις των ιοντιζουσών ακτινοβολιών, και κυρίως, με τον προσδιορισμό της απορροφούμενης δόσης και συγγενών ποσοτήτων, όπως της έκθεσης και του kerma. Η γνώση των δοσιμετρικών στοιχείων είναι απαραίτητη προϋπόθεση στους τομείς, που σχετίζονται με τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες, όπως π.χ. η ακτινοδιάγνωση, η ακτινοθεραπεία και η ακτινοπροστασία.

Η δοσιμετρία ξεκίνησε από το χώρο των ιατρικών εφαρμογών. Ακόμα και ο όρος 'δόση' είναι δανεισμένος από την Φαρμακολογία. Ο κύριος τομέας εφαρμογής της δοσιμετρίας, παραμένει ο συσχετισμός μεταξύ της ακτινοβολίας και του αποτελέσματος της δράσης της στα βιολογικά συστήματα. Παρ' όλα αυτά, η δοσιμετρία αποτελεί ένα ξεχωριστό κλάδο της Φυσικής, ο οποίος συνεισφέρει σημαντικά σε όλες τις επιστήμες που κάνουν χρήση ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Η συγγένεια αυτή με άλλους κλάδους επιστημών, έχει συντελέσει σε συχνές παρερμηνείες, ακόμα και βασικών εννοιών της δοσιμετρίας, με επικίνδυνες συνέπειες, σε ορισμένες περιπτώσεις. Τη λύση στο παραπάνω πρόβλημα, έρχεται να δώσει η χρήση της πιο πρόσφατης ορολογίας, που προτείνει η Διεθνής Επιτροπή Μονάδων Ακτινοβολιών και Μετρήσεων (ICRU, International Commission on Radiation Units and Measurements). Πρόκειται για έναν οργανισμό, που ιδρύθηκε το 1925 στο 1^ο Παγκόσμιο Συνέδριο Ακτινολογίας.

Ας δούμε παρακάτω, μερικές από τις βασικές έννοιες, που χρησιμοποιούνται ευρέως στο χώρο της δοσιμετρίας, όπως τις έχει ορίσει ο προαναφερθέν οργανισμός.

2.1.1 ΔΟΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ Ή ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΔΟΣΗ

Δόση ακτινοβολίας (D), ονομάζεται το πηλίκο της μέσης ενέργειας (dE), που αποδίδεται σε μια στοιχειώδη μάζα του ακτινοβολουμένου υλικού (dm), προς τη μάζα αυτή. Πιο απλά, δόση είναι το φυσικό μέγεθος, που εκφράζει την ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται ανά μονάδα μάζας. Έτσι:

$$D = dE / dm \quad (2.1)$$

Παλαιότερη μονάδα μέτρησης ήταν το rad (r, radiation absorbed dose), που ορίζεται ως η απορρόφηση ενέργειας 100 erg ανά g ακτινοβολουμένου υλικού, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται το Gray (Gy), που είναι η επίσημη μονάδα του συστήματος S.I. και ορίζεται ως η απορρόφηση ενέργειας 1 Joule ανά kg ακτινοβολουμένου υλικού. Ισχύει:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads}$$

Οι παραπάνω μονάδες απορροφήσεως χρησιμοποιούνται τόσο για ακτινοβολίες X και γ οποιασδήποτε ενέργειας, όσο και για σωματιδιακές ακτινοβολίες.

2.1.2 ΕΚΘΕΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Το μέτρο της ικανότητας της ακτινοβολίας να προκαλεί ιοντισμούς στον αέρα, ονομάστηκε έκθεση. Ο τελικός ορισμός, που δόθηκε το 1962, ορίζει ως έκθεση ακτινοβολίας (X), το πηλίκο της απόλυτης τιμής του συνολικού φορτίου (dQ) των ιόντων ενός σημείου και του ίδιου πρόσημου, θετικού ή αρνητικού, τα οποία παράγονται σε μάζα αέρα (dm), όταν όλα τα ιόντα (ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια) που ελευθερώνονται από την αλληλεπίδραση των φωτονίων, σταματούν πλήρως στον αέρα, δια τη μάζα αυτή. Ισχύει, λοιπόν:

$$X = dQ / dm \quad (2.2)$$

Μονάδα μέτρησης της έκθεσης στο διεθνές σύστημα μονάδων, S.I., είναι το C/kg. Παλαιότερα, γινόταν χρήση της ειδικής μονάδας Roentgen (R), όπου:

$$1 \text{ R} = 2,58 * 10^{-4} \text{ C/kg αέρα}$$

Η έκθεση αναφέρεται αποκλειστικά σε πεδία φωτονίων (X ή γ), ενώ η εφαρμογή της περιορίζεται σε πεδία ενέργειας μικρότερης των 3 MeV, περίπου. Άμεση μέτρηση της έκθεσης επιτυγχάνεται από ένα μόνο όργανο, που είναι γνωστό ως πρότυπος θάλαμος ιονισμού.

2.1.3 ΔΟΣΗ – ΕΚΘΕΣΗ

Σκοπός στη συγκεκριμένη παράγραφο είναι η αποσαφήνιση των εννοιών δόσης και έκθεσης. Η έκθεση, λοιπόν, είναι χαρακτηριστικό της δέσμης της ακτινοβολίας και ισχύει μόνο για ακτινοβολία X και γ. Αντίθετα, η δόση αποτελεί χαρακτηριστικό του μέσου, και ισχύει για όλα τα είδη ακτινοβολίας. Ακόμη, η δόση είναι το αποτέλεσμα της έκθεσης, δηλαδή για να υπάρξει δόση, πρέπει απαραίτητως να υπάρχει και μέσο, κάτι που δεν ισχύει για την έκθεση.

2.1.4 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένας από τους τρόπους εναπόθεσης της ενέργειας των φορτισμένων σωματιδίων στο ακτινοβολούμενο υλικό, είναι η ευθύγραμμη ή γραμμική μετάδοση ενέργειας (LET, linear transfer energy, L). Πρόκειται για τη μέση ενέργεια της ακτινοβολίας, που απελευθερώνεται κατά μήκος της διαδρομής της μέσα στο υλικό, ανά μm. Ισχύει, λοιπόν:

$$L = dE / ds \quad (2.3),$$

αν υποθέσουμε ότι ds είναι το μήκος της διαδρομής, που διανύει η ακτινοβολία μέσα στο υλικό.

Αντιπροσωπεύει, ουσιαστικά, την ανά μονάδα μήκους απώλεια ενέργειας, λόγω ιονισμού της ύλης, και εκφράζεται σύμφωνα με το σύστημα S.I., σε KeV / μm.

2.1.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ Q

Ο παράγοντας ποιότητας Q εκφράζει τη διαφορά στη βιολογική δράση, που παρουσιάζουν τα διάφορα είδη ακτινοβολιών. Η τιμή του εξαρτάται από την ευθύγραμμη μετάδοση της ενέργειας, καθώς η LET περιγράφει την ποιότητα μιας δέσμης ακτινοβολίας. Η LET διαφόρων ακτινοβολιών έχει διαφορετικές τιμές (που

εξαρτώνται από το υλικό με το οποίο αλληλεπιδρούν, το είδος και την ενέργεια του ιοντιστικού σωματιδίου ή φωτονίου).

Ο παράγοντας ποιότητας είναι αδιάστατη ποσότητα και συνδέει την απορροφούμενη δόση με το βιολογικό αποτέλεσμα. Αύξηση της LET συνεπάγεται με αύξηση του μεγέθους του βιολογικού αποτελέσματος. Επειδή, όμως, η ακριβής σχέση Q-LET δεν ανταποκρίνεται με βεβαιότητα στα βιολογικά αποτελέσματα, γι' αυτό χρησιμοποιείται μια νέα παράμετρος, ο παράγοντας βαρύτητας.

2.1.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ W_R

Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας, ICRP, ο W_R εξαρτάται απ' το είδος της ακτινοβολίας. Συμβατικά, θεωρείται ίσος με 1 στην περίπτωση φωτονίων και ηλεκτρονίων. Για τα υπόλοιπα είδη ιοντιζουσών ακτινοβολιών, η τιμή του είναι μεγαλύτερη του 1 και εξαρτάται από το είδος και την ενέργεια των σωματιδίων α , και για την ακρίβεια, από την ανασχετική τους ικανότητα. Η ποσότητα W_R είναι καθαρός αριθμός.

2.1.7 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΔΟΣΗ

Η ίδια δόση ακτινοβολίας στο ίδιο βιολογικό υλικό, είναι πιθανό να επιφέρει ποσοτικά διαφορετικά αποτελέσματα, πράγμα που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο αυτής της μελέτης. Για το συγκεκριμένο λόγο, έχει εισαχθεί ως βιολογική μονάδα δοσιμετρίας, η ισοδύναμη δόση.

Ισοδύναμη δόση, λοιπόν, ονομάζεται η απορροφούμενη δόση σε έναν ιστό ή όργανο T, σταθμισμένη για το είδος και την ποιότητα της ακτινοβολίας R. Δίνεται από τη σχέση:

$$H_{T,R} = D_{T,R} * W_R \quad (2.4), \text{ όπου}$$

$D_{T,R}$: η δόση που απορροφάται στον ιστό ή στο όργανο T από την ακτινοβολία R, και

W_R : ο συντελεστής στάθμισης της ακτινοβολίας ή παράγοντας βαρύτητας (ή ποιότητας) της ακτινοβολίας, όπως ονομάζεται.

Το ειδικό όνομα της μονάδας ισοδύναμης δόσης στο S.I. είναι το Sievert (Sv). Αν και το Sv είναι συνώνυμο του J/kg, χρησιμοποιείται μόνο για να δηλώσει ισοδύναμη δόση. Στην πράξη, χρησιμοποιείται μερικές φορές η παλαιότερη ειδική μονάδα, το rem (roentgen equivalent man, ισοδύναμο του roentgen στον άνθρωπο). Ισχύουν, έτσι, τα εξής:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

$$\text{Ισοδύναμη δόση σε rem} = \text{δόση σε rad} * W_R$$

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv} = 0,01 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Ίση ισοδύναμη δόση από διαφορετικού είδους ακτινοβολίες παράγει το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα. Ισοδύναμη δόση ονομάζεται, λοιπόν, η δόση οποιασδήποτε ιονίζουσας ακτινοβολίας, η οποία είναι βιολογικά «ισοδύναμη» με δόση 1 rad από ακτινοβολία X ή γ.

2.1.8 ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΙΣΤΟΥ W_T

Συχνά, και πρακτικά πάντα στις ιατρικές πράξεις, η απορρόφηση ενέργειας από ιοντίζουσα ακτινοβολία στο ανθρώπινο σώμα, είναι μακροσκοπικά ανομοιόμορφη. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη και τη σχετική ακτινοευαισθησία των διαφόρων ιστών ή οργάνων. Έτσι, σε χαμηλές δόσεις, πολλαπλασιάζουμε την ισοδύναμη δόση σε κάθε ακτινοευαίσθητο όργανο ή ιστό, με τον αντίστοιχο συντελεστή σχετικής ακτινοευαισθησίας του ιστού, W_T , που έχει προτείνει η ICRP. Το άθροισμα των παραγόντων βαρύτητας οργάνων ή ιστών W_T , σύμφωνα με τον ορισμό τους, ισούται με 1, ανεξαρτήτως φύλου και ηλικίας.

2.1.9 ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΟΣΗ

Ενεργός δόση E είναι το άθροισμα των σταθμισμένων ισοδύναμων δόσεων σε όλους τους ιστούς και όργανα του σώματος, από εσωτερική και εξωτερική ακτινοβολία.

$$E = \sum_T W_T H_T = \sum_T W_T \sum_R W_R D_{T,R} \quad (2.5)$$

Μονάδα ενεργού δόσης στο S.I. είναι το Sievert (Sv), ενώ παλαιότερη μονάδα της το rem. Ισχύει, δηλαδή, ότι και στην ισοδύναμη δόση.

Υπολογίζεται ως το άθροισμα των γινομένων της ισοδύναμης δόσης H_T των 12 καθορισμένων, απ' την ICRP, οργάνων επί το W_T του καθενός, και του γινομένου της μέσης ισοδύναμης δόσης H_T των υπόλοιπων οργάνων επί το W_T τους.

Όργανο ή Ιστός	W_T	Υπόλοιπα Όργανα
Γεννητικά όργανα	0,20	Μύες
Μαστός	0,05	Επινεφρίδια
Ουροδόχος κύστη	0,05	Νεφρός
Μυελός των οστών	0,12	Μήτρα
Παχύ έντερο	0,12	Πάγκρεας
Πνεύμονας	0,12	Σπλήνας
Στομάχι	0,12	Λεπτό έντερο
Θυρεοειδής	0,05	Εγκέφαλος
Ήπαρ	0,05	Θύμος αδένας
Οισοφάγος	0,05	
Επιφάνεια οστών	0,01	
Δέρμα	0,01	
	0,05	Υπόλοιπα Όργανα

Πίνακας 2.1 Τιμές W_T των 12 καθορισμένων και των υπόλοιπων οργάνων

2.1.10 ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΔΡΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ (RBE)

Οι ποσότητες ισοδύναμη και ενεργός δόση χρησιμοποιούνται κυρίως για χαμηλές δόσεις. Στην περίπτωση υψηλών δόσεων χρησιμοποιούμε τη σχετική βιολογική δραστηριότητα, RBE (Relative Biological Effectiveness), που ισούται με το

πηλίκιο της δόσης σε rad ακτίνων X από λυχνία 250kV, προς τη δόση σε rad ακτινοβολίας που προκαλεί το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα με τις ακτίνες X.

Η τιμή της RBE επηρεάζεται από το βιολογικό αποτέλεσμα που μελετάται, το μέγεθος της δόσεως, και άλλους παράγοντες. Επομένως, δεν είναι ίδια για κάθε ακτινοβολία.

2.2 ΔΟΣΙΜΕΤΡΑ

Οι σκοποί και οι διαδικασίες της δοσιμετρίας επιτυγχάνονται με τη χρησιμοποίηση κατάλληλων οργάνων, που καλούνται δοσίμετρα.

Δοσίμετρο ονομάζεται η διάταξη, το όργανο ή το σύστημα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ή την εκτίμηση οποιασδήποτε ποσότητας μπορεί να συσχετιστεί με τον καθορισμό της δόσης ακτινοβολίας ή εκθέσεως.

2.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ

Το δοσίμετρο πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις, προκειμένου να ανταποκρίνεται επιτυχώς στις απαιτήσεις της εφαρμογής, για την οποία έχει επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί.

Το ιδανικό δοσίμετρο, λοιπόν, είναι αυτό που:

- έχει γραμμική ανταπόκριση προς τη δόση
- παρέχει μεγάλο εύρος ανταποκρίσεως, από λίγα mrad ή μrad μέχρι πολλές εκατοντάδες ή χιλιάδες rads
- η ανταπόκρισή του είναι ανεξάρτητη του ρυθμού δόσεως, της ευθύγραμμης μετάδοσης ενέργειας και του ειδικού ιοντισμού
- χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακρίβεια και ευαισθησία
- παρέχει αναπαραγώγιμα αποτελέσματα
- λειτουργεί κατά τρόπο απλό, είναι εύχρηστο
- έχει μικρές διαστάσεις, ταυτόχρονα όμως, είναι και αρκετά μεγάλο ώστε να συμβούν στον ενεργό του όγκο πολλές αλληλεπιδράσεις, με αποτέλεσμα οι

στατιστικές διακυμάνσεις της εναποτιθέμενης ενέργειας να μπορούν να αγνοηθούν και το δημιουργούμενο σήμα να είναι μεγάλο, ώστε να μετριέται εύκολα

- η επίδρασή του στο πεδίο ακτινοβολίας είναι η ελάχιστη δυνατή
- είναι οικονομικό, χαμηλού κόστους
- παρέχει πληροφορίες σχετικά με το είδος της ακτινοβολίας
- είναι κατά προτίμηση φορητό
- η ατομική του σύσταση προσεγγίζει όσο το δυνατό περισσότερο τη σύσταση του υλικού μέσου, στο οποίο γίνεται η μέτρηση
- περιβάλλεται από τοίχωμα, (όταν το καθιστούν απαραίτητο ηλεκτρικοί ή μηχανικοί λόγοι), το οποίο έχει παρόμοια ατομική σύσταση με αυτήν του ενεργού όγκου και πάχος τοιχώματος περίπου ίσο με την μέγιστη εμβέλεια των δευτερογενών σωματιδίων που εκτινάσσονται σ' αυτό κάτω από τη δράση της ακτινοβολίας
- παρουσιάζει σταθερότητα απόδοσης στις συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος που θα χρησιμοποιηθεί

Τις παραπάνω ιδιότητες, ωστόσο, δεν τις συγκεντρώνει κανένα είδος δοσιμέτρου μόνο του, και για αυτό το λόγο υπάρχει μεγάλη ποικιλία δοσιμέτρων, ώστε να χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση το καταλληλότερο εξ αυτών, ενώ συχνά καταφεύγουμε και στη χρήση συνδυασμού αυτών.

2.2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ

Η επιλογή του δοσιμέτρου για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:

- το είδος της ακτινοβολίας
- το ενεργειακό φάσμα
- τη ροή και το ρυθμό ροής των σωματιδίων της ακτινοβολίας
- την ομοιογένεια του πεδίου ακτινοβολίας
- την απαιτούμενη αξιοπιστία και ακρίβεια της μέτρησης στη δυναμική του περιοχή
- το ελάχιστο όριο ανιχνευσιμότητας, κ.α.

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ - ΕΙΔΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ

Οι μετρητές ακτινοβολίας, συνήθως, ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες. Σ' αυτούς που παρέχουν πληροφορίες για τον αριθμό και πιθανώς και για την ενέργεια των σωματιδίων της ακτινοβολίας, στους μετρητές ρυθμού απορροφούμενης δόσης, και στους μετρητές ολοκληρωτικού τύπου.

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη δοσιμετρία είναι διαφόρων ειδών, και οι αρχές λειτουργίας τους στηρίζονται σε διάφορες επιδράσεις της ακτινοβολίας (π.χ. ιοντισμοί, διεγέρσεις, χημικές μεταβολές, βιολογικές επιδράσεις, αύξηση της θερμοκρασίας, κτλ.)

Υπάρχουν, λοιπόν, πολλές μέθοδοι δοσιμετρίας, όπως θερμοδομετρία, χημική δοσιμετρία, βιολογική δοσιμετρία, δοσιμετρία με ανιχνευτές ιχνών, και πολλές άλλες τεχνικές. Στην συνέχεια του κεφαλαίου, όμως, θα αναφέρουμε τις σημαντικότερες εξ αυτών, και βέβαια, τα αντίστοιχα είδη δοσιμέτρων, με εξαίρεση τη δοσιμετρία φωταύγειας και θερμοφωταύγειας που θα αναλυθούν εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.

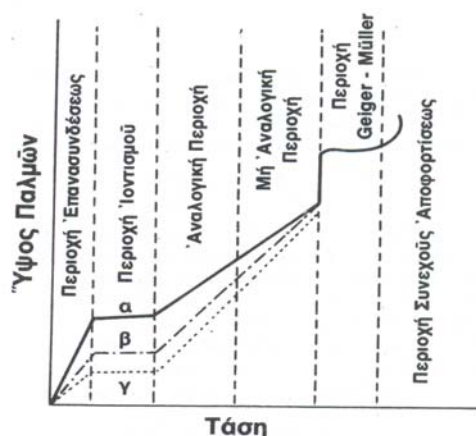
2.3.1 ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΑΕΡΙΟΥ

Πρόκειται για συσκευές που αποτελούνται από δύο πλάκες ή ηλεκτρόδια άλλου σχήματος, μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται υψηλή τάση. Το ένα είναι θετικό και ονομάζεται άνοδος, ενώ το δεύτερο αρνητικό και ονομάζεται κάθοδος. Ανάμεσα τους υπάρχει αέριο (ήλιο, νέο, αργό, υδρογόνο, κρυπτό) ή απλώς, ατμοσφαιρικός αέρας.

Η έκθεση του αερίου σε ιοντίζουσα ακτινοβολία οδηγεί στη δημιουργία ιόντων, τα οποία συλλέγονται από τις αντίθετα φορτισμένες πλάκες, με αποτέλεσμα τη ροή ρεύματος, του οποίου η ένταση μετράται. Πιο συγκεκριμένα, οι ανιχνευτές αερίου, συνήθως, λειτουργούν παλμικά, δηλαδή κάθε σωματίο ή φωτόνιο που διαπερνά το αέριο, δίνει ένα παλμό, το ύψος του οποίου εξαρτάται από την ενέργειά του. Έτσι, έχουμε τη δυνατότητα να γνωρίζουμε το πλήθος και την ενέργεια των φορτίων ή των φωτονίων.

Χαρακτηριστικό των ανιχνευτών αερίου αποτελεί η καμπύλη τους, η οποία παρουσιάζει το ύψος του παραγόμενου από την ακτινοβολία παλμού, σε συνάρτηση

με την τάση που εμφανίζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Τυχόν μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ανόδου – καθόδου συνεπάγεται με μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου εντός του αερίου. Ο αριθμός των ιόντων, που συλλέγεται από τα ηλεκτρόδια, συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται μεταξύ αυτών, δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, στο οποίο διακρίνονται οι εξής περιοχές:



Εικόνα 2.1 Διάγραμμα της σχέσης ύψους παλμού και τάσης για ακτινοβολίες α, β και γ σε ανιχνευτές αερίων

- Περιοχή επανασύνδεσης

Στην συγκεκριμένη περιοχή, η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι μικρή, με αποτέλεσμα τα αντίθετα φορτισμένα ιόντα να επανασυνδέονται μεταξύ τους, πριν φτάσουν στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια, και χωρίς, επομένως, να δημιουργούν παλμό. Όμως, με προοδευτική αύξηση της τάσης, ορισμένα ιόντα φτάνουν στα ηλεκτρόδια και δημιουργείται παλμός, με προοδευτικά αυξανόμενο ύψος.

- Περιοχή κορεσμού ή ιοντισμού

Στην περιοχή αυτή, όλα τα σχηματιζόμενα ιόντα συλλέγονται από τα δύο ηλεκτρόδια. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μεγάλη σταθερότητα, αφού για αξιόλογες μεταβολές της τάσεως, το ύψος του παλμού παραμένει σταθερό. Το μόνο που αλλάζει, είναι ο χρόνος συλλογής των φορτίων στα ηλεκτρόδια.

- Αναλογική περιοχή

Στην αναλογική περιοχή, η τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι αρκετά μεγάλη, με αποτέλεσμα τα ήδη υπάρχοντα ηλεκτρόνια να αποκτούν μεγάλη κινητική ενέργεια και να προκαλούν περαιτέρω ιοντισμούς, κατά την πρόσκρουσή τους σε άτομα του αερίου. Αυτοί οι δευτερογενείς και τριτογενείς ιοντισμοί προκαλούν

ενίσχυση των ιοντισμών του αερίου, ενώ το ύψος του παραγόμενου παλμού αυξάνεται με αύξηση της τάσης.

- Μη αναλογική περιοχή

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από αστάθεια, καθώς με επιπλέον αύξηση της τάσης, εξαφανίζεται σταδιακά η αναλογία του ύψους του παλμού με τον αριθμό των πρωτογενών φορτίων, δηλαδή, εκείνων που ελευθερώθηκαν αρχικά ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης αερίου – ακτινοβολίας. Συμπερασματικά, η συγκεκριμένη περιοχή δε χρησιμοποιείται σε μετρήσεις.

- Περιοχή Geiger - Mueller

Στην περιοχή Geiger, δηλαδή σε ακόμα μεγαλύτερες τιμές τάσης, το ύψος του παλμού δεν έχει καμία συσχέτιση με το πλήθος των φορτίων, που παράγεται κατά το αρχικό συμβάν. Κι αυτό γιατί, την αρχική αλληλεπίδραση ακολουθεί μια ‘καταιγίδα’ ή ‘χιονοστιβάδα’ ιοντισμών σε ολόκληρο τον όγκο του ανιχνευτή, γεγονός που οδηγεί την ενίσχυση του παλμού σε κορεσμό. Η περιοχή, λοιπόν, χαρακτηρίζεται από το μέγιστο ύψος του παλμού, από σταθερότητα σε μικρές μεταβολές της τάσεως, από μεγάλη ευαισθησία και από αδυναμία διάκρισης του είδους της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας.

- Περιοχή αποφόρτισης ή διαρκούς εκκένωσης

Στην περιοχή αυτή, που ισχύουν μεγαλύτερες τιμές τάσης, παρατηρείται το φαινόμενο της διαρκούς εκκένωσης, εφόσον τα θετικά ιόντα αλληλεπιδρούν με το τοίχωμα της καθόδου, παράγοντας υπερϊώδη ακτινοβολία και ιοντισμό του τοιχώματος της καθόδου, πράγμα που είναι δυνατό να οδηγήσει στην καταστροφή του οργάνου. Είναι, λοιπόν, ευνόητο ότι η περιοχή δε χρησιμοποιείται σε μετρήσεις.

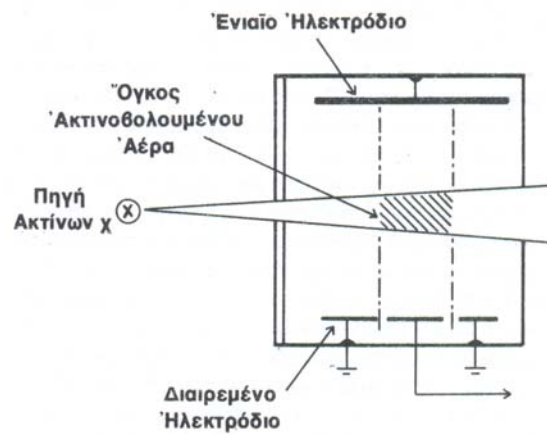
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποιοι χαρακτηριστικοί τύποι δοσιμέτρων αυτής της κατηγορίας:

- Θάλαμοι ιοντισμού (Ionization Chambers)

Η δοσιμετρία με θαλάμους ιοντισμού είναι η πιο συνηθισμένη δοσιμετρική μέθοδος στην Ιατρική, και πιθανώς, και η πιο παλιά. Το σχήμα και το μέγεθος των θαλάμων ποικίλει ανάλογα με τον τομέα εφαρμογής τους. Παρακάτω, αναφέρονται οι πιο συνηθισμένοι τύποι θαλάμων αυτής της κατηγορίας. Λειτουργούν στην περιοχή ιοντισμού, απαιτούν βαθμονόμηση, και μετρούν είτε ρυθμό δόσης είτε ολική δόση. Είναι ακατάλληλοι για μέτρηση σωματιδιακής ακτινοβολίας, και ακτινοβολίας X ή γ ,

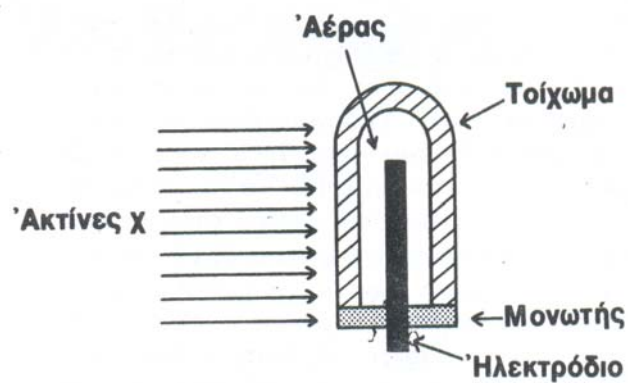
με ενέργεια μεγαλύτερη των 3 MeV, ενώ χρησιμοποιούνται, τέλος, και ως όργανα αναφοράς για τη βαθμολόγηση άλλων δοσιμέτρων.

- ✓ Θάλαμοι ιοντισμού με παράλληλες πλάκες και ελεύθερο αέρα



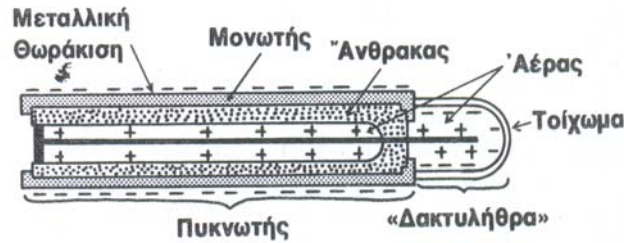
Εικόνα 2.2 Σχηματική παράσταση θαλάμου ιοντισμού με παράλληλες πλάκες

- ✓ Κλειστοί θάλαμοι ιοντισμού τύπου δακτυλήθρας (Thimble Chambers)



Εικόνα 2.3 Θάλαμος ιοντισμού τύπου δακτυλήθρας

- ✓ Κλειστοί θάλαμοι ιοντισμού τύπου πυκνωτή (Condenser Chambers)



Εικόνα 2.4 Κλειστός θάλαμος ιοντισμού τύπου πυκνωτή

- Ρυθμόμετρα τύπου Cutie Pie

Πρόκειται για θαλάμους ιοντισμού, που χρησιμοποιούνται ως όργανα μετρήσεως της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος

- Βαθμολογητές ισοτόπων (Isotope Dose Calibrators)

Είναι θάλαμοι ιοντισμού, ειδικά κατασκευασμένοι, σε σχήμα φρεατίου, για να παρέχουν την ενεργότητα των ραδιοφαρμάκων

- Αναλογικοί απεριθμητές (Proportional Counters)

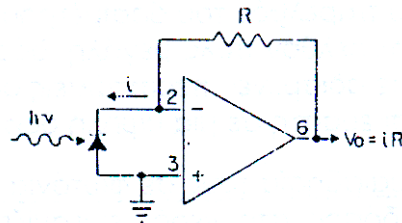
Λειτουργούν στην αναλογική περιοχή και είναι πιο ευαίσθητοι από τους θαλάμους ιοντισμού. Χρησιμοποιούνται στην φασματοσκοπία ακτίνων X και μαλακών ακτίνων γ, όπως και για την ανίχνευση ακτινοβολίας α και β. Στην συνέχεια, παρατίθεται η χαρακτηριστική καμπύλη ανταπόκρισής τους, που παρέχει τη σχέση μεταξύ του ρυθμού κρούσεων και του δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, για τα σωματίδια α και β.

- Ανιχνευτές Geiger - Mueller

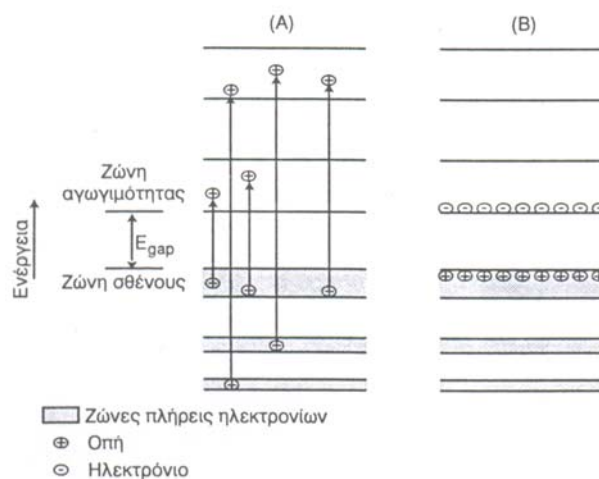
Οι ανιχνευτές αυτού του είδους παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με τους ανιχνευτές σπινθηρισμών, όταν λειτουργούν σαν καταμετρητές (pulse count mode). Λειτουργούν στην περιοχή Geiger – Mueller, έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής, και είναι ευαίσθητοι σε όλα τα είδη ιοντιζουσών ακτινοβολιών, χωρίς να έχουν, ωστόσο, τη δυνατότητα να διακρίνουν το είδος και την ενέργεια της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας. Χρησιμοποιούνται, επίσης, για μετρήσεις του επιπέδου ραδιενέργειας σε ελεγχόμενους χώρους.

2.3.2 ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

Οι ημιαγωγικοί (semiconductor) ανιχνευτές αποτελούν το στερεό ανάλογο των θαλάμων ιοντισμού. Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τον ημιαγωγό, προκαλεί την απελευθέρωση φορέων, με αποτέλεσμα να αλλάζει η ηλεκτρική του αγωγιμότητα. Η μεταβολή της αγωγιμότητας είναι ανάλογη με την εναποτιθέμενη ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, η τάση εξόδου του κυκλώματος μέτρησης, είναι ανάλογη του ρεύματος που δημιουργείται, και κατά συνέπεια, ανάλογη του ρυθμού δόσης. Στην περίπτωση που επιθυμούμε, ο ανιχνευτής να δρα ως μετρητής δόσης και όχι ως μετρητής ρυθμού δόσης, δεν έχουμε παρά να αντικαταστήσουμε την αντίσταση ανάδρασης του κυκλώματος με έναν πυκνωτή.



Εικόνα 2.5 Κύκλωμα μέτρησης (Η τάση V_0 είναι ανάλογη του I , άρα του ρυθμού δόσης)



Εικόνα 2.6 Ενεργειακές ζώνες ημιαγωγού. (Α) Μετά από ιονισμό (Β) Τελική κατάσταση

Σημαντικό πλεονέκτημα των ημιαγωγικών ανιχνευτών, έναντι των θαλάμων ιοντισμού, είναι ο μικρός τους όγκος, ωστόσο, παρουσιάζουν και βασικά μειονεκτήματα, καθώς η απόκρισή τους εξαρτάται από:

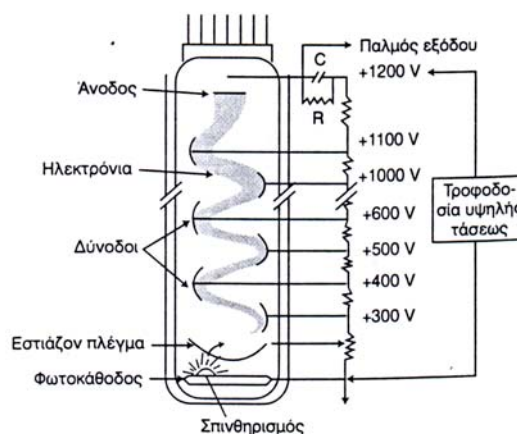
- τη θερμοκρασία

- το ρυθμό δόσης
- την ενέργεια των φωτονίων
- τη γωνία ακτινοβολίας
- το παρελθόν του δοσιμέτρου (μείωση της απόδοσης, αν στο παρελθόν δέχτηκαν πολύ μεγάλη δόση)

Στις περισσότερες ιατρικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί τύπου-p, χωρίς να εφαρμόζουμε εξωτερική τάση. Στην ακτινοθεραπεία, συνήθως, χρησιμοποιούνται δίοδοι Si. Γενικά, όμως, τα δοσίμετρα αυτής της κατηγορίας θεωρούνται κατάλληλα για την ακριβή μέτρηση της παροχής.

2.3.3 ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΕΣ

Πρόκειται για μια μέθοδο δοσιμετρίας, η αρχή λειτουργίας της οποίας στηρίζεται στην ιδιότητα φθορισμού (εκπομπή φωτός, κυρίως στην περιοχή των 400 nm), που χαρακτηρίζει ένα σύνολο υλικών, όταν αυτά ακτινοβολούνται με ιοντίζουσα ακτινοβολία, αλλά και στο γεγονός του αναλογικού πολλαπλασιασμού του αριθμού των ηλεκτρονίων, πράγμα που επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ειδικών διατάξεων, των λεγόμενων φωτοπολλαπλασιαστών.



Εικόνα 2.7 Φωτοπολλαπλασιαστής

Τα υλικά, που ενέχουν αυτήν την ιδιότητα, είναι ορισμένα ανόργανα κρυσταλλικά (όπως το NaI με προσμίξεις (που αποτελούν τους ενεργοποιητές των κρυστάλλων) θαλίου (Tl), το ZnS(Ag), το LiI(Eu), το LiI(Sn), το CsI(Tl)), ορισμένα οργανικά υλικά (όπως το ανθρακένιο), μερικά αέρια (π.χ. το ξένο) και ορισμένα πλαστικά. Οι προαναφερθείσες ουσίες αποκαλούνται σπινθηριστές ή φώσφοροι, παρά το γεγονός της έλλειψης κρυσταλλικής υφής, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ή ακόμη και του γεγονότος ότι δεν είναι στερεές. Ο πλέον κοινός σπινθηριστής είναι το NaI(Tl).

Η μορφή των σπινθηριστών ποικίλει και είναι ανάλογη της χρήσης τους. Η πιο διαδεδομένη μορφή τους είναι η κυλινδρική, ενώ διατίθενται ακόμη και σε μεγάλες διαστάσεις. Ωστόσο, παρουσιάζουν κατασκευαστικές δυσκολίες, οφειλόμενες στο ότι είναι τοξικοί και υγροσκοπικοί.

Οι ανόργανοι σπινθηριστές παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία, υψηλή απόδοση στην αντίχνευση φωτονίων, έναντι των οργανικών σπινθηριστών, κάτι που έχει να κάνει με την ύπαρξη βαρέων στοιχείων (π.χ. του I στον NaI(Tl)). Η δυναμική περιοχή τους, όμως, είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πεδία με ρυθμούς δόσης άνω των 10^{-4} Gy/s, εν αντιθέσει με κάποια είδη πλαστικών σπινθηριστών, που χρησιμοποιούνται και για μέτρηση ακτινοθεραπευτικών δόσεων.

2.3.4 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

Η φωτογραφική δοσιμετρία είναι μια μέθοδος, που βρίσκει εφαρμογή τόσο στην ιατρική φυσική όσο στην δοσιμέτρηση προσωπικού σε εργαστήρια ιοντιζουσών ακτινοβολιών, χάρις τη δυνατότητα αντίχνευσης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, μέσω της χρήσης ενός υλικού, του φωτογραφικού γαλακτώματος (ή φιλμ), που αποτελεί και το βασικό φωτοευαίσθητο τμήμα των δοσιμέτρων αυτής της κατηγορίας.

Το συνηθισμένο σύγχρονο φωτογραφικό δοσίμετρο αποτελείται από τα εξής μέρη:

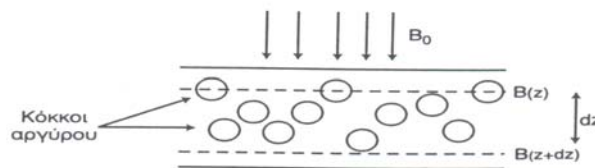
- τη βάση, που είναι το κεντρικό και πιο παχύ στρώμα από ανθεκτικό υλικό (συνήθως, οξική κυτταρίνη), διαφανές στο ορατό φως, εύκαμπτο και με την ιδιότητα να αλλάζει σχήμα, λόγω χρόνου ή υγρασίας

- το στρώμα συγκόλλησης μεταξύ της βάσης και των φωτογραφικών γαλακτωμάτων

- τα στρώματα φωτογραφικού γαλακτώματος, που τοποθετούνται εκατέρωθεν της βάσης και αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα ζελατίνης ή συνθετικού πολυμερούς, μέσα στο οποίο υπάρχουν μικροσκοπικοί φωτοευαίσθητοι κόκκοι αλογονούχου αργύρου, με ελάχιστο ποσοστό άλλων προσμίξεων (95% AgBr – 5% AgI ή AgCl)

- το προστατευτικό στρώμα ζελατίνης, που καλύπτει εκατέρωθεν το φιλμ

Η αρχή λειτουργίας του φωτογραφικού δοσίμετρου βασίζεται στο γεγονός της πρόκλησης αμαύρωσης στο φωτογραφικό γαλάκτωμα, όταν αυτό εκτίθεται στο ορατό φως ή σε ιοντίζουσα ακτινοβολία, και η οποία είναι ανάλογη της απορροφούμενης δόσης. Αύξηση της δόσης συνεπάγεται με αύξηση της αμαύρωσης, η οποία, πρέπει στο σημείο αυτό να πούμε ότι, εξαρτάται απ' την ενέργεια και τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας.



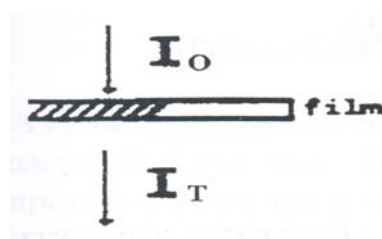
Εικόνα 2.8 Απορρόφηση οπτικής ακτινοβολίας σε φιλμ

Η αμαύρωση ενός φιλμ σ' ένα σημείο του χαρακτηρίζεται από ένα μέγεθος, που ονομάζεται 'οπτική πυκνότητα' OD, και ορίζεται ως ο λογάριθμος του λόγου της εντάσεως του ορατού φωτός, που διέρχεται απ' το εν λόγω σημείο, όταν προσπίπτει κάθετα στο φιλμ. Δηλαδή:

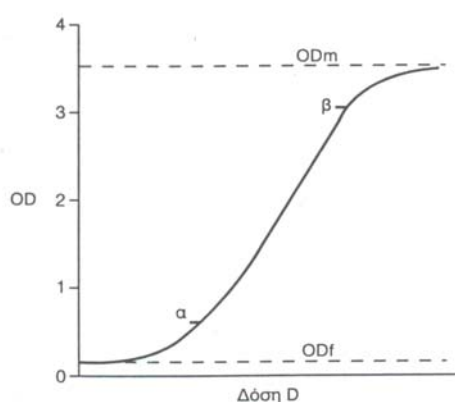
$$OD = \log (I_0 / I), \text{ όπου}$$

I_0 η προσπίπτουσα ένταση του φωτός και

I η εξερχόμενη ένταση



Σημαντική είναι και η χαρακτηριστική καμπύλη του φωτογραφικού δοσίμετρου. Πρόκειται για μια γραφική παράσταση, που παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της αμαύρωσης του φιλμ και του λογαρίθμου της έκθεσης, και μας δίνει σημαντικές πληροφορίες για την πλέον χρήσιμη περιοχή οπτικών πυκνοτήτων, που αντιστοιχεί σ' ένα γραμμικό κομμάτι αυτής. Το εύρος και η κλίση (μέση αντίθεση γ) του γραμμικού τμήματος καθορίζουν, επίσης, τα όρια εκθέσεων μεταξύ των οποίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το φιλμ, όπως και την ευαισθησία αυτού σε μικρές αλλαγές της εντάσεως της δέσμης.



Εικόνα 2.9 Χαρακτηριστική καμπύλη φιλμ. Χρήσιμη περιοχή η αβ

Όταν το φωτογραφικό γαλάκτωμα αμαυρώνεται, συμβαίνουν οι εξής διεργασίες:

- μια φυσικοχημική διεργασία, που οδηγεί στη δημιουργία μιας εμφανίσιμης λανθάνουσας εικόνας
- μια χημική διεργασία, κατά την οποία, με διαδικασίες εμφάνισης, στερέωσης, πλύσης και στεγνώματος, η λανθάνουσα εικόνα μετατρέπεται σε ορατή.

Η φωτογραφική δοσιμετρία έχει αρκετά πλεονεκτήματα (π.χ. τη δυνατότητα διάκρισης της ενέργειας με τη χρήση φίλτρων, τη διατήρηση της εικόνας, κτλ.), αλλά και μειονεκτήματα (αργή απάντηση, εξάρτηση από κλιματολογικές συνθήκες, εξασθένιση της λανθάνουσας εικόνας με το πέρασμα του χρόνου – fading-, συνολική ομίχλωση των φιλμ –fogging-).

2.3.5 ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟΥ

Δοσίμετρα προσωπικού χαρακτηρίζονται τα δοσίμετρα εκείνα που φέρει το προσωπικό, που εργάζεται σε χώρους ακτινοβολιών. Οι συνηθέστερες μορφές στις οποίες τα συναντάμε, είναι:

- Φωτογραφικές πλάκες

Η λειτουργία τους βασίζεται στην ιδιότητα των φωτογραφικών φιλμ να υφίστανται αμαύρωση, όταν πάνω τους προσπίπτει ιοντίζουσα ακτινοβολία, όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω. Η οπτική τους πυκνότητα προσδιορίζεται με χρήση ειδικών οργάνων, που καλούνται πυκνόμετρα, και κατόπιν, υπολογίζεται η δόση ακτινοβολίας που έχουν καταγράψει, σε ειδικά εργαστήρια. Στην Ελλάδα, ο συγκεκριμένος έλεγχος πραγματοποιείται στο ΚΠΕ «Δημόκριτος». Τα φωτογραφικά ατομικά δοσίμετρα μετρούν, λοιπόν, αθροιστικές δόσεις για περίοδο εβδομάδων ή μηνών, και παρέχουν τη δυνατότητα τηρήσεως αρχείων ακριβείας και διαπιστώσεως του είδους ή της ποιότητας της ακτινοβολίας

- Θερμοφωταυγάζοντα δοσίμετρα

Τα θερμοφωταυγάζοντα δοσίμετρα, με LiF, είναι τα πιο αξιόπιστα, καθώς παρέχουν την ακριβέστερη εκτίμηση της δόσεως, γεγονός που τα κάνει να χρησιμοποιούνται περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο τύπο ατομικών δοσιμέτρων

- Δοσίμετρα τσέπης ή τύπου στυλογράφου

Πρόκειται για θαλάμους ιονισμού τύπου πυκνωτή, οι οποίοι φορτίζονται και λειτουργούν ως ηλεκτροσκόπια. Είναι κατάλληλα για ακτινοβολία X και γ, όχι, όμως, και για β. Δίνουν τη δυνατότητα της άμεσης ανάγνωσης της δόσεως της ακτινοβολίας, χωρίς την ανάγκη αποστολής τους σε ειδικό εργαστήριο, πράγμα που αποτελεί το σπουδαιότερο τους προτέρημα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑ

3.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ

Φωταύγεια ονομάζεται η εκπομπή ορατής ακτινοβολίας από ένα σώμα, η οποία προκαλείται με οποιαδήποτε αιτία, εκτός αυτής της θέρμανσης έως πυράκτωσής του. Τα φωταυγάζοντα ή φωτογενή υλικά, όπως ονομάζονται, χαρακτηρίζονται από την ικανότητα να απορροφούν ένα συγκεκριμένο τύπο ενέργειας, ν' αποθηκεύουν μέρος αυτής για κάποιο χρονικό διάστημα, και στην συνέχεια να το επανεκπέμπουν σε μορφή οπτικής ακτινοβολίας.

Η χρήση προθεμάτων στη λέξη «φωταύγεια» σηματοδοτεί, βεβαίως, την ύπαρξη πολλών παρόμοιων ειδικών φαινομένων, και συνήθως, υποδηλώνει είτε τον τρόπο διέγερσης (δηλαδή το είδος της ενέργειας, με το οποίο διεγείρεται το υλικό) είτε τον τρόπο, με τον οποίο «διαβάζεται» η αποθηκευμένη πληροφορία του υλικού που φωταυγάζει. Ο παρακάτω πίνακας είναι ενδεικτικός των διαφόρων φαινομένων φωταύγειας.

ΕΙΔΟΣ ΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ	ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ
Φωτοφωταύγεια	Οπτική ακτινοβολία
Χημειοφωταύγεια	Χημική ενέργεια
Τριβοφωταύγεια	Μηχανική -//-
Βιοφωταύγεια	Βιοχημική -//-
Ακτινοφωταύγεια	Ιοντίζουσα ακτινοβολία
Ραδιοφωταύγεια	-//-
Ηλεκτροφωταύγεια	Ηλεκτρικό πεδίο
Ηχοφωταύγεια	Ηχητικά κύματα
Φθορισμός	Διάφοροι
Φωσφορισμός	-//-
Θερμοφωταύγεια	-//-

Πίνακας 3.1 Συνοπτική αναφορά διαφόρων φαινομένων φωταύγειας και του τρόπου διέγερσης τους

Ένα φαινόμενο φωταύγειας μπορεί να χαρακτηριστεί ως φθορισμός ή φωσφορισμός, πράγμα που εξαρτάται όχι από τον τρόπο διέγερσης, αλλά από την χρονική κλίμακα που μεσολαβεί έως ότου πραγματοποιηθεί η εκπομπή της οπτικής ακτινοβολίας.

Φωτογενής διέγερση συμβαίνει, όταν ένα δεσμευμένο ηλεκτρόνιο απορροφά ενέργεια και μεταβαίνει από τη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση Θ σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, τη διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση Δ . Αν το ηλεκτρόνιο επιστρέψει αμέσως στη βασική του κατάσταση, είτε απευθείας είτε μέσω μιας επιτρεπτής ενδιάμεσης κατάστασης E , με ταυτόχρονη εκπομπή οπτικής ακτινοβολίας, η διαδικασία ονομάζεται Φθορισμός.

Ωστόσο, κάποιες φορές η επιστροφή του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη κατάσταση και άρα η εκπομπή οπτικής ακτινοβολίας επιβραδύνεται, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη μιας ενεργειακής κατάστασης (μετασταθής ενεργειακή κατάσταση M) στην απαγορευμένη ενεργειακά περιοχή, η οποία αποτελεί ενεργειακή παγίδα για τα ηλεκτρόνια, αφού δεν επιτρέπεται η απευθείας μετάβασή τους από την κατάσταση M στη κατάσταση Θ . Απαιτείται, λοιπόν, στο σημείο αυτό προσφορά ενέργειας, προκειμένου το ηλεκτρόνιο να μεταβεί αρχικά στην κατάσταση Δ , δηλαδή να αποπαγιδευτεί, και από κει να επιστρέψει στην κατάσταση Θ , εκπέμποντας παράλληλα το ενεργειακό του πλεόνασμα υπό μορφή οπτικής ακτινοβολίας. Η ενέργεια που απαιτείται για την αποπαγίδευση του ηλεκτρονίου, προμηθεύεται με τη μορφή οπτικής ακτινοβολίας (φωτοδιέγερση) ή θερμότητας (θερμική διέγερση). Η όλη διαδικασία καλείται Φωσφορισμός.

Η πιθανότητα διαφυγής p ενός ηλεκτρονίου από τη μετασταθερή κατάσταση M σε μια διεγερμένη κατάσταση Δ , ανά μονάδα χρόνου, περιγράφεται από την εξίσωση Boltzmann:

$$p = s * e^{-\left(\frac{\Delta E}{KT}\right)} \quad (3.1), \text{ όπου}$$

s : η σταθερά για μια ειδική μετασταθή κατάσταση, με διαστάσεις συχνότητας

ΔE : η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των καταστάσεων M και Δ , γνωστή και ως ενεργειακό βάθος της παγίδας

T : η θερμοκρασία του υλικού σε $^{\circ}K$

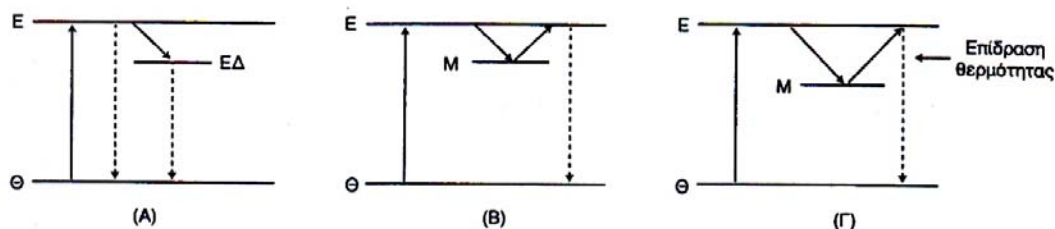
K : η σταθερά του Boltzmann

Όπως φαίνεται από την εξίσωση Boltzmann, αν αυξηθεί η θερμοκρασία του φωταυγάζοντος υλικού, αυξάνεται και η πιθανότητα διαφυγής του ηλεκτρονίου από

την ενεργειακή παγίδα. Έτσι, επιταχύνεται η διαδικασία του φωσφορισμού, καθώς η αποπαγίδευση των ηλεκτρονίων γίνεται πλέον μαζικά και με μεγαλύτερη ευκολία.

Ο επιταχυνόμενος φωσφορισμός, που προκαλείται από θέρμανση ενός φωτογενούς υλικού, ονομάζεται θερμοφωταύγεια (TL). Το φαινόμενο της θερμοφωταύγειας διαφέρει από τη πυράκτωση, κατά την οποία η θερμότητα προκαλεί έντονες ταλαντώσεις, συγκρούσεις και διεγέρσεις των ατόμων του υλικού, με αποτέλεσμα την εκπομπή ακτινοβολίας. Ωστόσο, στην πυράκτωση το φάσμα εκπομπής έχει σχέση με τη θερμοκρασία, ενώ στη θερμοφωταύγεια το φάσμα εκπομπής εξαρτάται μόνο από τον τύπο των ατόμων του υλικού και καθόλου από τη θερμοκρασία. Αν και υπάρχουν πολλές πιθανές πηγές διέγερσης που προκαλούν το φαινόμενο της θερμοφωταύγειας, στο εξής ο όρος θα χρησιμοποιείται για να περιγράψει, αποκλειστικά, τη θερμοφωταύγεια, που παράγεται εξαιτίας της απορρόφησης ιονίζουσας ακτινοβολίας.

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, η εκπομπή ακτινοβολίας είναι αποτέλεσμα φθορισμού ή φωσφορισμού, χωρίς, όμως, να είναι πάντα ξεκάθαρο σε ποιο από τα δύο φαινόμενα οφείλεται. Όταν η εκπομπή ακτινοβολίας πραγματοποιείται σε χρόνους μικρότερους των 10ns, τότε πρόκειται αναμφισβήτητα για φθορισμό, ενώ όταν πραγματοποιείται καθυστερημένα, σε χρόνους μεγαλύτερους των 100ms, πρόκειται σίγουρα για φωσφορισμό. Αν ο χρόνος αποδιέγερσης είναι μεταξύ 10ns και 100ms, τότε η διάκριση είναι δύσκολη και το φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως φθορισμός ή ως φωσφορισμός, ανάλογα με την επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας. Ο φθορισμός είναι ουσιαστικά ανεξάρτητος της θερμοκρασίας, και έτσι, αύξηση αυτής δε θα επιφέρει καμία μεταβολή. Αντίθετα, ο φωσφορισμός επηρεάζεται άμεσα, καθώς αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει τη διαδικασία του, σύμφωνα με την εξίσωση Boltzmann.

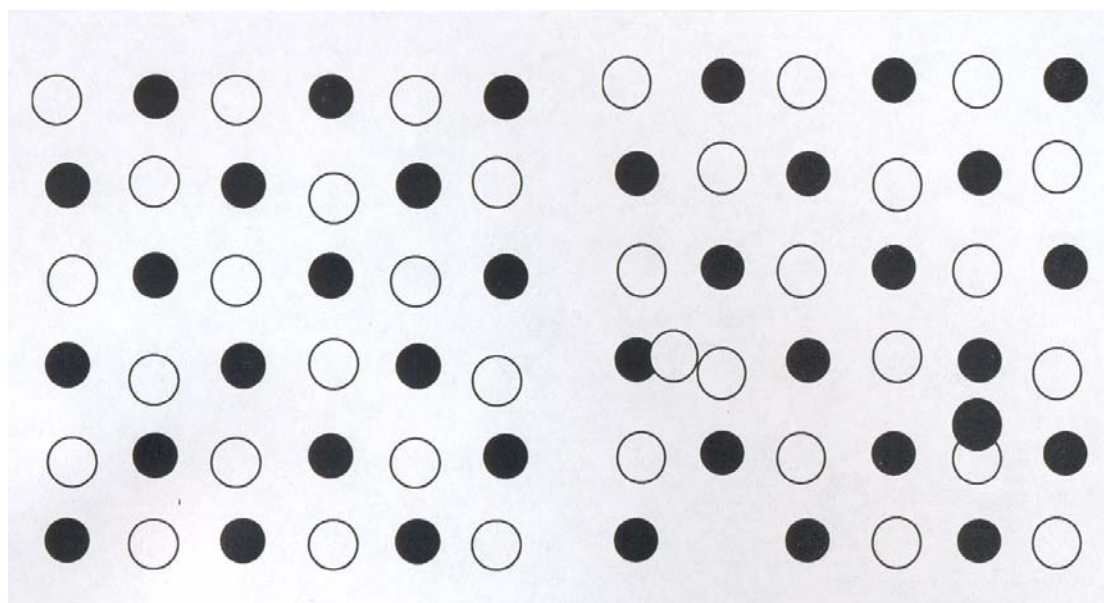


Εικόνα 3.1 (Α) Φθορισμός, (Β) Φωσφορισμός, (Γ) Θερμοφωταύγεια

3.2 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΑΖΟΝΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Το φαινόμενο της θερμοφωταύγειας, το οποίο μελετάται στην παρούσα εργασία, ερευνάται για πάρα πολλά χρόνια, χωρίς, ωστόσο, να γίνει εφικτή η ολοκληρωμένη διατύπωση ενός θεωρητικού μοντέλου, που να επεξηγεί με ακρίβεια το σύνολο των πειραματικών δεδομένων που το αφορούν. Κι αυτό οφείλεται στο ότι ο μηχανισμός της θερμοφωταύγειας είναι εξαιρετικά πολύπλοκος και σύνθετος, με αποτέλεσμα να προκύπτουν αρκετές δυσκολίες, που παρουσιάζονται, κυρίως, όταν εξετάζονται συγκεκριμένα υλικά (όπως το LiF:Mg:Ti) ή όταν απαιτούνται υψηλά επίπεδα απορροφούμενης δέσμης προκειμένου να διεξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Τα αλκάλια χαλίδωσης ή κοινώς τα αλογονούχα αλκάλια (όπως το LiF , το CaF , κ.α.) αποτελούν τα πιο διαδεδομένα φωσφορούχα, και άρα θερμοφωταυγάζοντα υλικά. Η κρυσταλλική δομή τους αποτελείται από δύο επικαλυπτόμενα κυβικά πλέγματα ιόντων αλογόνου και αλκαλίου, και συνθέτει την εικόνα του τέλειου, του ιδανικού κρυστάλλου. Όμως, αυτή η τέλεια ιοντική δομή αλκαλίου – αλογόνου είναι πάντα μη πραγματική. Στην ουσία, κάθε πραγματικός κρύσταλλος είναι «ελαττωματικός», καθώς περιέχει πλεγματικές ατέλειες διαφόρων ειδών, με καθοριστικό ρόλο για την πραγμάτωση του φαινομένου της θερμοφωταύγειας, όπως θα δούμε στη συνέχεια του κεφαλαίου.



Εικόνα 3.2 Αριστερά: Ιδανικό κρυσταλλικό πλέγμα. Δεξιά: Πραγματικό κρυσταλλικό πλέγμα με ατέλειες και προσμίξεις

Διακρίνονται δύο ειδών πλεγματικές ατέλειες:

- Οι ενδογενείς ή θερμικές
- Οι εξωγενείς ή εξωτερικές

Οι ενδογενείς ατέλειες προκαλούνται από θερμικές ταλαντώσεις των ιόντων, και εξαρτώνται άμεσα από τη θερμοκρασία, καθώς αύξηση της θερμοκρασίας του κρυσταλλικού πλέγματος συνεπάγεται με αύξηση του αριθμού τους. Χαρακτηριστικό είναι ότι ο αριθμός αυτής της κατηγορίας ατελειών παραμένει σταθερός, με απότομη και γρήγορη μείωση της θερμοκρασίας του κρυστάλλου, πράγμα που έχει ιδιαίτερη σημασία για τη θερμική επεξεργασία, στην οποία υπόκεινται τα θερμοφωταυγάζοντα υλικά.

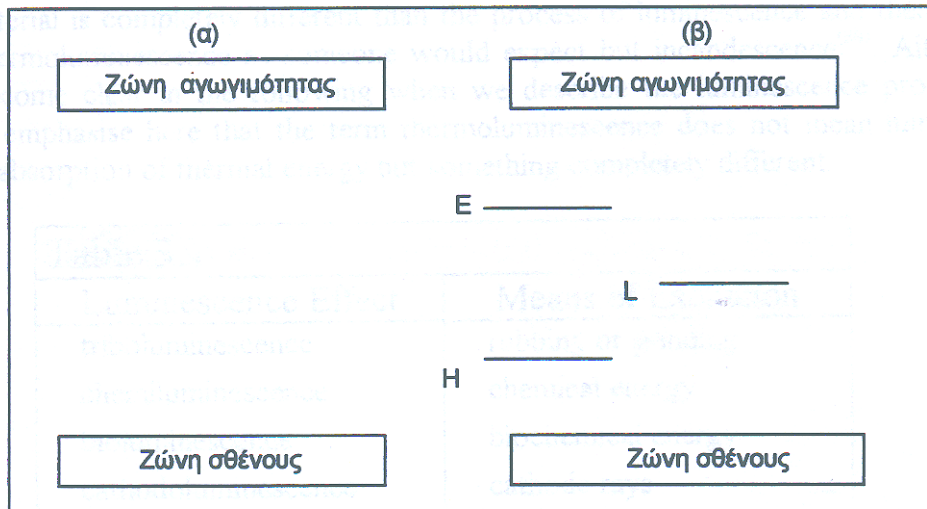
Οι εξωγενείς ατέλειες παράγονται από αντικαταστάσεις ιόντων με διαφορετικά ιόντα άλλων στοιχείων (ιόντα προσμίξεων). Ατέλειες θεωρούνται και οι παρουσίες ιόντων στην ενδιάμεση περιοχή ή οι απουσίες ιόντων αλκαλίου ή αλογόνου απ' το κρυσταλλικό πλέγμα. Τέλος, οφείλουμε να αναφέρουμε και την περίπτωση ατελειών, που δημιουργούνται εξαιτίας της επίδρασης της ακτινοβολίας.

Γενικά, ο αριθμός των ατελειών ενός κρυσταλλικού πλέγματος εξαρτάται από:

- Τον τύπο και την ποσότητα των ατομικών προσμίξεων
- Τη θερμική ιστορία και επεξεργασία του υλικού

3.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΙΚΩΝ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η παρουσία των πλεγματικών ατελειών κρίνεται αναγκαία για τη διεξαγωγή του φαινομένου της θερμοφωταύγειας. Στο σχήμα που ακολουθεί, αναπαρίσταται η δομή των ενεργειακών ζωνών ενός ιδανικού ηλεκτρικά μονωμένου κρυστάλλου, και η αντίστοιχη ενός πραγματικού κρυστάλλου.



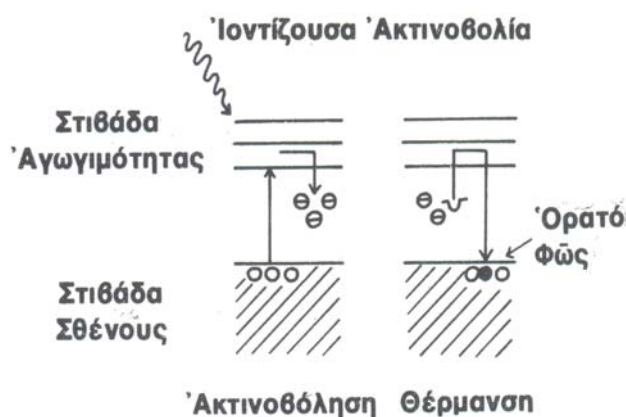
Εικόνα 3.3 Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών (α) ιδανικών (β) πραγματικών κρυσταλλικών δομών

Η Ζώνη Σθένους περιλαμβάνει όλες τις ενεργειακές καταστάσεις των δεσμευμένων ηλεκτρονίων, ενώ η Ζώνη Αγωγιμότητας όλες τις ενεργειακές καταστάσεις των μη δεσμευμένων ηλεκτρονίων, τα οποία είναι ελεύθερα να κινούνται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση εντός του κρυσταλλικού πλέγματος.

Στην πρώτη περίπτωση, αυτή του ιδανικού κρυστάλλου, δε μπορεί να λάβει χώρα το φαινόμενο της θερμοφωταύγειας. Εδώ, η Ζώνη Αγωγιμότητας είναι άδεια, με το σύνολο των ηλεκτρονίων να βρίσκεται στη Ζώνη Σθένους. Μεταξύ της Ζώνης Σθένους και της Ζώνης Αγωγιμότητας υπάρχει μια ενεργειακή περιοχή, το λεγόμενο ενεργειακό χάσμα, που θεωρείται απαγορευμένη ζώνη, καθώς δεν υπάρχει καμία επιτρεπτή ενεργειακή στάθμη, κι έτσι, είναι απίθανο για ένα ηλεκτρόνιο να καταφέρει να διασχίσει την απαγορευμένη περιοχή και να μεταβεί στην Ζώνη Αγωγιμότητας, χωρίς την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων.

Στην περίπτωση ενός πραγματικού κρυστάλλου, όμως, οι πλεγματικές ατέλειες της δομής του, και πιο συγκεκριμένα οι ενδογενείς, λειτουργούν ως ενεργειακές παγίδες, συμβάλλοντας μ' αυτόν τον τρόπο στη διαδικασία της θερμοφωταύγειας. Κι αυτό γιατί εμφανίζονται επιτρεπτές ενεργειακές καταστάσεις, ακόμη και εντός του ενεργειακού χάσματος, ακριβώς λόγω των συγκεκριμένων ατελειών. Πιο αναλυτικά, το κενό που δημιουργείται εξαιτίας της έλλειψης ενός αρνητικού ιόντος, μετατρέπεται σε μια περιοχή με περίσσεια θετικού φορτίου, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί ένα δυναμικό παγίδευσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων (Electrons) στην ενεργειακή κατάσταση E. Ομοίως, μια περιοχή με

πλεόνασμα αρνητικού φορτίου, που δημιουργείται λόγω έλλειψης κάποιου αλογόνου, θεωρείται δυναμικό παγίδευσης για τα ελεύθερα θετικά φορτία, τις λεγόμενες οπές (Holes), στην ενεργειακή κατάσταση H. Συνοπτικά, λοιπόν, η ενεργειακή κατάσταση E αναπαριστά μια παγίδα ηλεκτρονίων, η ενεργειακή κατάσταση H αναπαριστά μια παγίδα θετικών οπών, ενώ το L αποτελεί το κέντρο της φωταύγειας, στο οποίο ηλεκτρόνια και θετικές οπές μπορούν να επανασυνδεθούν, γεγονός που συνοδεύεται με ταυτόχρονη εκπομπή φωτός.



Εικόνα 3.4 Μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων μετά την ακτινοβόληση και θέρμανση θερμοφωταυγάζοντος υλικού

3.4 ΓΕΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ

Γενικά, η παραγωγή θερμοφωταύγειας από ένα υλικό, εξαιτίας της έκθεσής του σε ιονίζουσα ακτινοβολία, χωρίζεται σε τρία στάδια:

- Ιονισμός του υλικού και παγίδευση των ηλεκτρονίων
- Θέρμανση του υλικού για την αποπαγίδευση των ηλεκτρονίων
- Επανασύνδεση ηλεκτρονίων – οπών, με ταυτόχρονη εκπομπή οπτικών φωτονίων

Πιο αναλυτικά, η διαδικασία παραγωγής θερμοφωταύγειας έχει ως εξής. Όταν ένα θερμοφωταυγάζον υλικό απορροφήσει ιονίζουσα ακτινοβολία, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, γεγονός που ισοδυναμεί με μεταφορά ηλεκτρονίων από τη Ζώνη Σθένους στη Ζώνη Αγωγιμότητας. Τα συγκεκριμένα ηλεκτρόνια είναι πλέον

ελεύθερα να κινηθούν στο κρυσταλλικό πλέγμα, με κίνδυνο πάντα να εγκλωβιστούν σε παγίδες ηλεκτρονίων, όπως η ενεργειακή κατάσταση E. Το αντίστοιχο συμβαίνει με τις ελεύθερες θετικές οπές, που δημιουργούνται ως αποτέλεσμα της παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρονίων, και οι οποίες με τη σειρά τους μπορούν να κινούνται εντός του κρυσταλλικού πλέγματος, κατά μήκος της Ζώνης Σθένους, με κίνδυνο να εγκλωβιστούν κι αυτές σε ανάλογες παγίδες οπών, όπως η ενεργειακή κατάσταση H.

Τα ηλεκτρόνια παραμένουν παγιδευμένα έως ότου τους αποδοθεί η απαιτούμενη προς διαφυγή ενέργεια, γεγονός που εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες, το ενεργειακό βάθος των παγίδων και τη θερμοκρασία του υλικού. Αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού, τους προσδίδει θερμική ενέργεια, ικανή για την αποπαγίδευσή και τη μεταβίβασή τους στη Ζώνη Αγωγιμότητας, δίνοντας τους παράλληλα τη δυνατότητα να επανασυνδεθούν με θετικές οπές στα Κέντρα Φωταύγειας L, απελευθερώνοντας ταυτόχρονα το ενεργειακό τους πλεόνασμα, υπό μορφή οπτικών φωτονίων.

Αν και ο μηχανισμός της θερμοφωταύγειας συνίσταται από τη σύλληψη ηλεκτρονίων, συνοδευόμενη από καθυστερημένη επανασύνδεσή τους με οπές στα κέντρα θερμοφωταύγειας, είναι πιθανές και άλλου τύπου επανασυνδέσεις ηλεκτρονίων – οπών. Διακρίνουμε τη περίπτωση της άμεσης επανασύνδεσής τους (φθορισμός), και της άμεσης ή καθυστερημένης επανασύνδεσής τους με θερμική υποβάθμιση της ενέργειας, χωρίς την εκπομπή οπτικών φωτονίων.

3.5 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΙΓΛΗΣ

Ας θεωρήσουμε ένα υλικό που να περιέχει πλεγματικές ατέλειες ενός μόνο είδους, πράγμα που σημαίνει ότι όλες οι δημιουργούμενες παγίδες ηλεκτρονίων θα έχουν το ίδιο ενεργειακό βάθος, δηλαδή θα αντιστοιχούν στην ίδια ενεργειακή κατάσταση. Έστω ότι τη χρονική στιγμή t, το υλικό βρίσκεται σε θερμοκρασία T και είναι παγιδευμένα n ηλεκτρόνια. Η πιθανότητα διαφυγής p ενός ηλεκτρονίου, ανά μονάδα χρόνου, δίνεται από την εξίσωση Boltzmann, όπως είδαμε παραπάνω, όπου:

$$p = s * e^{-\left(\frac{\Delta E}{KT}\right)}$$

Ο ρυθμός απελευθέρωσης των ηλεκτρονίων από τις ενεργειακές παγίδες ισούται με:

$$\frac{dn}{dt} = n * p \Rightarrow - \frac{dn}{dt} = n * s * \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) \quad (3.2)$$

Θεωρούμε επίσης, ότι κανένα από τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται, δεν ξαναπαγιδεύεται, και ότι όλα επανασυνδέονται με θετικές οπές, εκπέμποντας ταυτόχρονα οπτικά φωτόνια θερμοφωταύγειας. Τότε, η ένταση της ακτινοβολίας θερμοφωταύγειας I εξαρτάται από το ρυθμό εκπομπής των οπτικών φωτονίων, και κατά συνέπεια από τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας, άρα ουσιαστικά, από το ρυθμό απελευθέρωσης των ηλεκτρονίων από τις ενεργειακές παγίδες, όπου είχαν εγκλωβιστεί. Έτσι, ισχύει:

$$I = - C * \frac{dn}{dt} \Rightarrow I = C * n * s * \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) \quad (3.3), \text{ όπου}$$

C : μια σταθερά σχετική με την απόδοση της θερμοφωταύγειας, καθώς εκφράζει την αναλογία του αριθμού των ηλεκτρονίων που επανασυνδέονται με οπές, εκπέμποντας φωτόνια, προς τον αριθμό των ηλεκτρονίων που παραμένουν ελεύθερα.

Αν το υλικό θερμανθεί με σταθερό ρυθμό $R = \frac{dT}{dt}$, τότε:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dn}{dT} * \frac{dT}{dt} = R * \frac{dn}{dT} \quad (3.4),$$

οπότε αντικαθιστώντας στη σχέση (3.2) προκύπτει:

$$- R * \frac{dn}{dT} = n * s * \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) \Rightarrow \frac{dn}{n} = - \frac{1}{R} * s * \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) * dT \quad (3.5),$$

και ολοκληρώνοντας, έχουμε:

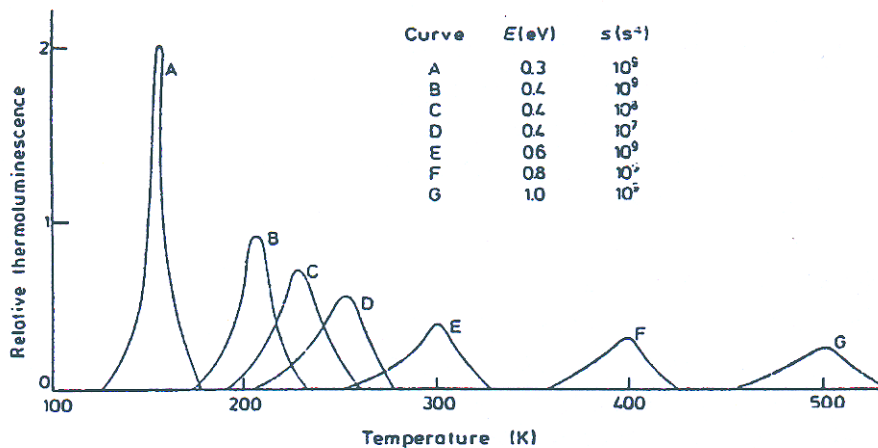
$$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right) = - \int_{T_0}^T \frac{1}{R} * s * \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) * dT \Rightarrow$$

$$n = n_0 * \exp\left(- \int_{T_0}^T \frac{1}{R} * s * \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) * dT\right) \quad (3.6),$$

όπου n_0 ο αριθμός των παγιδευμένων ηλεκτρονίων, κατά τη χρονική στιγμή t_0 και υπό θερμοκρασία T_0 . Με μια τελευταία αντικατάσταση στην εξίσωση (3.3), διαμορφώνεται η τελική μαθηματική σχέση που περιγράφει την ένταση της οπτικής ακτινοβολίας, προερχόμενης από ηλεκτρόνια που έχουν παγιδευτεί σε μια και μοναδική ενεργειακή παγίδα βάθους ΔE . Έτσι:

$$I = n_0 * \exp\left(-\int_{T_0}^T \frac{1}{R} * s * \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) * dT\right) * C * s * \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) \quad (3.7)$$

Η γραφική παράσταση της εντάσεως οπτικής ακτινοβολίας I, συναρτήσει της θερμοκρασίας T καλείται καμπύλη αίγλης ή λαμπρότητας (glow curve). Στην περίπτωση υλικών με ένα είδος ενεργειακής παγίδας στη δομή τους, η καμπύλη αίγλης έχει παρόμοια μορφή με κάποια απ' τις καμπύλες που εμφανίζονται, στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.5 Διάφορες καμπύλες θερμοφωταύγειας για υλικά με ένα μόνο είδος ενεργειακών παγίδων στη δομή τους

Αρχικώς, η καμπύλη I αυξάνει εκθετικά, καθώς με αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται απ' τις παγίδες, και άρα και ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων, που φτάνει σε μια μέγιστη τιμή, η οποία αντιστοιχεί στην κορυφή αυτής. Κατόπιν φθίνει έως ότου μηδενιστεί, τη στιγμή που εξαντλούνται και τα τελευταία αποθέματα παγιδευμένων ηλεκτρονίων. Παρατηρούμε πως όσο μεγαλύτερο είναι το ενεργειακό βάθος των παγίδων, τόσο μεγαλύτερη είναι η μετατόπιση της κορυφής προς υψηλότερες θερμοκρασίες. Αντίθετα, αύξηση του ρυθμού θέρμανσης R του υλικού, μετατοπίζει την κορυφή της καμπύλης σε θέσεις με χαμηλότερη θερμοκρασία. Το ύψος κάθε κορυφής ή το εμβαδόν που περικλείεται κάτω απ' την καμπύλη αίγλης, μπορούν να ληφθούν ως μέσα μέτρησης της έκθεσης του υλικού στην ιοντίζουσα ακτινοβολία και της δόσης που έλαβε αυτό.

Όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω βασίστηκαν στην υπόθεση ότι στο υλικό υπήρχε ένα μόνο είδος ενεργειακής παγίδας βάθους ΔΕ. Στην πραγματικότητα, όμως,

τα υλικά θερμοφωταύγειας περιέχουν πολλές διαφορετικές ενεργειακές παγίδες, οφειλόμενες σε μεμονωμένες πλεγματικές ατέλειες ή σε συνδυασμό ατελειών της δομής τους. Σε κάθε ενεργειακή παγίδα αντιστοιχεί και μια καμπύλη αίγλης, η οποία, ωστόσο, είναι δυνατό να μην εμφανιστεί ξεκάθαρα ή ακόμα και να αγνοηθεί τελείως κατά την ανάγνωση του σήματος. Η τελική καμπύλη αίγλης του υλικού, που προκύπτει, έχει εμβαδόν και κορυφή, που εξαρτώνται άμεσα από τον αριθμό των ενεργειακών παγίδων, και επομένως από τον αριθμό των πλεγματικών ατελειών αυτού.

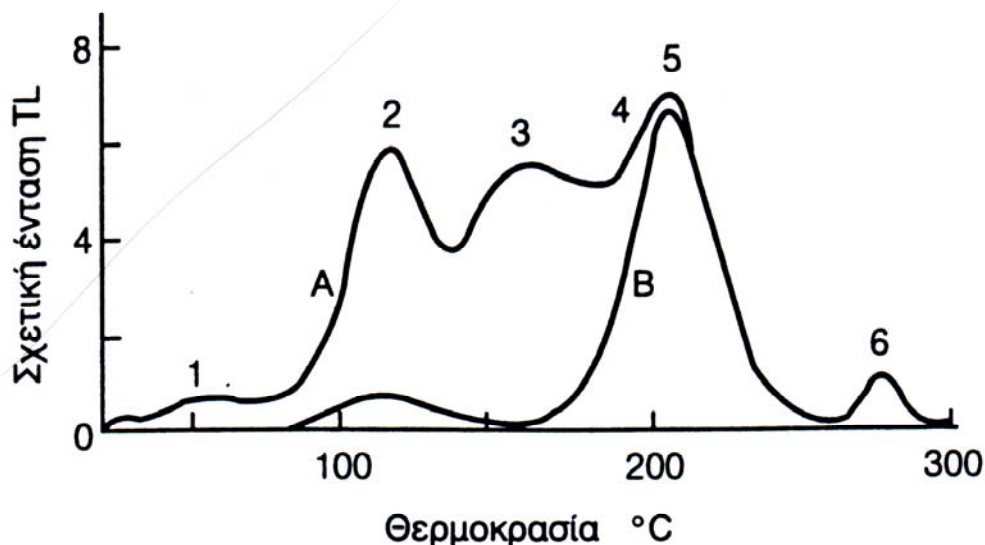
Όταν, λοιπόν, πρόκειται για υλικά με περισσότερα είδη ενεργειακών παγίδων (όπως ισχύει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων), τότε η καμπύλη αίγλης τους είναι αποτέλεσμα της σύνδεσης διαδοχικών απλών καμπυλών, όπως αυτών που εικονίζονται παραπάνω.

3.6 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΙΓΛΗΣ LiF:Mg:Ti

Το LiF, εμπλουτισμένο με προσμίξεις Mg (~300 ppm - parts per million-) και Ti (~150 ppm), είναι το κατ' εξοχήν χρησιμοποιούμενο και πιο διαδεδομένο υλικό θερμοφωταύγειας. Ανακαλύφθηκε τυχαία στο τέλος της δεκαετίας του '50, και αποτελεί, σε γενικές γραμμές, το καλύτερο φωσφορώδες υλικό. Από τότε μελετάται εντατικά, αλλά παρ' όλα αυτά δεν κατέστη δυνατή η πλήρης κατανόηση και επεξήγηση των πειραματικών δεδομένων, που το αφορούν. Η διαδικασία θερμοφωταύγειας στο υλικό είναι πολύπλοκη, ωστόσο, έχει ξεκαθαριστεί ότι εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων, όπως:

- Την ποσότητα, τον τύπο και τη χημική σύσταση των προσμίξεων, καθώς και τη μέθοδο εισαγωγής τους εντός του κρυσταλλικού πλέγματος
- Τη θερμική, οπτική και μηχανική επεξεργασία του υλικού κατά τη διάρκεια της κατασκευής, αλλά και της χρήσης αυτού.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η καμπύλη αίγλης του LiF:Mg:Ti, στην οποία διακρίνονται δύο καμπύλες, (A) και (B).



Εικόνα 3.5 Καμπύλες αίγλης (A) και (B) του LiF:Mg:Ti

Η καμπύλη (A) περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό κορυφών, και αντιστοιχεί στη θέρμανση του υλικού για 1h στους 400 °C και στην απότομη ψύξη, που ακολουθεί, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C, με ρυθμό περίπου 1000 °C/min. Περιέχει 6 κορυφές ανάμεσα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος των 20 °C και τη θερμοκρασία των 300 °C, οι οποίες ορίζονται ως:

- Κορυφή 1 → 60 °C (Χρόνος ημίσειας ζωής: 10 λεπτά)
- Κορυφή 2 → 120 °C (Χρόνος ημίσειας ζωής: 1 ημέρα)
- Κορυφή 3 → 170 °C (Χρόνος ημίσειας ζωής: 3 μήνες)
- Κορυφή 4 → 190 °C (Χρόνος ημίσειας ζωής: 8,5 έτη)
- Κορυφή 5 → 210 °C (Χρόνος ημίσειας ζωής: 80 έτη)
- Κορυφή 6 → 285 °C (Χρόνος ημίσειας ζωής: άνω των 100 ετών)

Η ακριβής θερμοκρασία κατά την ανάγνωση του σήματος εξαρτάται από το ρυθμό θέρμανσης του υλικού κατά την ανάγνωση. Οι κορυφές 4 και 5 διακρίνονται δύσκολα, και είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως στη δοσιμετρία (ιδιαίτερα η 5: κύρια δοσιμετρική καμπύλη). Οι κορυφές, που εμφανίζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπως η 2, παρουσιάζουν σημαντική εξασθένιση σήματος, ακόμη και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, πριν καν αναγνωστεί το σήμα. Κι επειδή δύναται να αποκλίνουν πολύ απ' την πραγματικότητα, δεν εξετάζονται στη δοσιμετρία.

Με κατάλληλη θερμική επεξεργασία του υλικού πριν την ακτινοβόληση, έχουμε τη δυνατότητα να μειώσουμε τον αριθμό των παγίδων, με τις οποίες σχετίζονται οι χαμηλής θερμοκρασίας κορυφές (δηλαδή, στην ουσία, οι 1, 2, 3),

γεγονός που συντελεί στην ταυτόχρονη αύξηση των κορυφών 4 και 5. Η απαλοιφή των κορυφών 1, 2, 3 κρίνεται αναγκαία και εξαιτίας των πολύ μικρών χρόνων ημίσειας ζωής τους, που αναγράφονται στο παραπάνω σχήμα, οι οποίοι συμβάλλουν άμεσα στην εξασθένηση του σήματος. Έτσι, καταλήγουμε στη δημιουργία μιας πιο ικανοποιητικής και αξιόπιστης καμπύλης αίγλης, αυτής του τύπου (B).

Η καμπύλη (B), λοιπόν, είναι πιο αξιόπιστη όσον αφορά την καταγραφή της ολικής έκθεσης, και περιλαμβάνει ανόπτηση (annealing) πριν την ακτινοβόληση του υλικού, δηλαδή θέρμανση αυτού για 1h στους 400 °C, και κατόπιν ψύξη του με αργό τώρα ρυθμό, στους 80 °C για 16-24h.

3.7 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΑΤΟΜΩΝ ΠΡΟΣΜΙΞΗΣ Mg, Ti ΣΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ ΤΟΥ LiF:Mg:Ti

Τα άτομα Mg και Ti παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη διαδικασία θερμοφωταύγειας του LiF:Mg:Ti, όπως συμβαίνει με τις προσμίξεις σε κάθε υλικό θερμοφωταύγειας. Τα ιόντα Mg συμβάλλουν στη δημιουργία παγίδων ηλεκτρονίων, με τις ήδη υπάρχουσες ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος, ενώ ο ρόλος των ιόντων Ti παραμένει ασαφής, αν και πιστεύεται πως συνεισφέρει στο σχηματισμό κέντρων επανασύνδεσης ηλεκτρονίων – οπών.

Magnesium:

Η απομάκρυνση ενός ιόντος Li^+ , δημιουργεί κενό, το οποίο χαρακτηρίζεται από περίσσεια αρνητικού φορτίου. Μια τέτοια περιοχή στο κρυσταλλικό πλέγμα θεωρείται ως ατέλεια. Η αντικατάσταση του μονοθενοφούς ιόντος Li^+ από ένα δισθενές ιόν Mg^{++} έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία περίσσειας θετικού φορτίου στη συγκεκριμένη περιοχή του κρυσταλλικού πλέγματος. Η έλξη λόγω Coulomb μεταξύ των περιοχών με διαφορετικό φορτίο, συνεπάγεται με το σχηματισμό διπόλων, που αποτελούνται από ιόντα Mg^{++} και κενά ιόντων Li^+ , τα οποία κάτω από ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας συγκεντρώνονται και σχηματίζουν διμερή, τριμερή και υψηλότερης τάξης συμπλέγματα διπόλων. Πιστεύεται ότι τα απλά δίπολα αποτελούν παγίδες ηλεκτρονίων, ευθυνόμενες για την εμφάνιση των κορυφών 2 και 3 της καμπύλης αίγλης, ενώ τα συμπλέγματα διπόλων, αντίστοιχα, για την εμφάνιση

των κορυφών 4 και 5, δηλαδή των κύριων δοσιμετρικών κορυφών. Ο σχηματισμός διπόλων έχει άμεση σχέση με τη θερμοκρασία και τους ρυθμούς ψύξης και θέρμανσης του υλικού.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η καθιερωμένη διαδικασία ανόπτησης του υλικού με υποβολή του στους 400 °C για 1h και άμεση ταχεία ψύξη του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, δημιουργεί μια καμπύλη αίγλης με έξι κορυφές. Αν η θερμοκρασία ανόπτησης διατηρείται πάνω απ' τους 180 °C, αυτό θα εξακολουθεί να ισχύει. Αν, όμως, αυξηθεί η θερμοκρασία ανόπτησης, τότε τα απλά συμπλέγματα, δηλαδή τα διμερή ή τα τριμερή διαλύονται σε απλά δίπολα, συμβάλλοντας έτσι στο σχηματισμό των κορυφών 2 και 3. Αν τώρα μετά την πρώτη θέρμανση των 400 °C, ακολουθήσει ανόπτηση σε θερμοκρασία <100 °C για 1-2h ή στους 80 °C για 16-24h, τότε παρατηρείται συγκέντρωση απλών διπόλων και δημιουργία συμπλεγμάτων, που καταλήγει στην ενίσχυση των κορυφών 4 και 5, με ταυτόχρονη μείωση των αντίστοιχων 2 και 3.

Η απότομη ψύξη του κρυστάλλου συμβάλλει στο πάγωμα των σχηματισμών απλών διπόλων, που αποτελούν ενεργειακές παγίδες που σχετίζονται με τις κορυφές 2 και 3. Αντίθετα, μικρός ρυθμός ψύξης επιτρέπει τη συγκέντρωση απλών διπόλων και το σχηματισμό συμπλεγμάτων που αποτελούν ενεργειακές παγίδες σχετιζόμενες με τις κορυφές 4 και 5. Όσο για τις κορυφές 1 και 6 δεν διαμορφώνονται από την παρουσία ή μη προσμίξεων, αλλά από άλλες ενδογενείς κρυσταλλικές ατέλειες.

Titanium:

Όλα τα κρυσταλλικά υλικά, που δημιουργούνται με τήξη παρουσία αέρα, περιέχουν ιόντα υδροξυλίου OH⁻ σε ποσότητες μερικών δεκάδων ppm. Η αποδοτικότητα στην εκπομπή θερμοφωταύγειας από μέρους του LiF:Mg:Ti, έχει παρατηρηθεί ότι αυξάνει όσο αυξάνεται η συγκέντρωση των ιόντων Ti, με μέγιστη τιμή γύρω στα 7ppm, ενώ σε κρυστάλλους με υψηλότερες συγκεντρώσεις Ti, η αποδοτικότητα καθορίζεται από τη μικρότερη συγκέντρωση των ιόντων OH⁻. Το Ti μπορεί να βρίσκεται, επίσης, και σε δισθενή κατάσταση Ti⁺⁺, σχηματίζοντας έτσι δίπολα με τα κενά που αφήνουν τα ιόντα Li⁺. Επομένως, η συγκέντρωση των ιόντων Ti δείχνει να επηρεάζει μόνο το σχετικό σχήμα της κάθε κορυφής αίγλης.

3.8 ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ (FADING)

Όταν ένα υλικό θερμοφωταύγειας εκτίθεται σε ιοντίζουσα ακτινοβολία, η μέτρηση της απορροφούμενης δόσης πραγματοποιείται με μέτρηση της έντασης της καμπύλης αίγλης του, η οποία είναι ανάλογη του αριθμού των ηλεκτρονίων που παραμένουν παγιδευμένα τη στιγμή της μέτρησης. Ωστόσο, η συγκεκριμένη τιμή δόσεως που μετράται δεν είναι η πραγματική, αλλά λανθάνουσα, καθώς σημειώνεται ακούσια αποπαγίδευση ηλεκτρονίων πριν τη στιγμή της μέτρησης, η οποία καλείται εξασθένιση ή απώλεια σήματος (fading). Και τούτο συμβαίνει διότι, κάποια ηλεκτρόνια που βρίσκονται παγιδευμένα σε 'ρηχές' ενεργειακές παγίδες, ενδέχεται να αποκτήσουν την απαιτούμενη ενέργεια διαφυγής, μέσω θέρμανσης, απορρόφησης φωτονίων ή και συνδυασμού των δύο, ακόμα και υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ελάττωση των παγιδευμένων ηλεκτρονίων, και άρα η εξασθένιση σήματος είναι πιο έντονη όσο περισσότερος χρόνος μεσολαβήσει από τη στιγμή της ακτινοβόλησης έως την αντίστοιχη της ανάγνωσης του σήματος. Είναι χαρακτηριστικό ότι όλα τα υλικά θερμοφωταύγειας 'υποφέρουν' από εξασθένιση, άλλα λιγότερο και άλλα περισσότερο.

Θερμική εξασθένιση σήματος (Thermal fading)

Η πιθανότητα διαφυγής p ενός ηλεκτρονίου εξαρτάται, όπως ήδη είδαμε, από τη θερμοκρασία του υλικού και περιγράφεται από την εξίσωση Boltzmann:

$$p = s * e^{-\left(\frac{\Delta E}{KT}\right)}$$

Ως Χρόνος Ημίσειας Ζωής $t_{1/2}$ μιας ενεργειακής παγίδας (και της σχετικής κορυφής αίγλης που της αντιστοιχεί) ορίζεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται, έως ότου ο αριθμός των παγιδευμένων ηλεκτρονίων να πέσει στο μισό της αρχικής τιμής του. Η σχέση (3.2) μπορεί να γραφεί ως:

$$- \frac{dn}{n} = s * \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) * dt,$$

και αν τη λογαριθμήσουμε, έχουμε:

$$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right) = -s * \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) * t$$

Αν n_0 ο αρχικός αριθμός των παγιδευμένων ηλεκτρονίων, τότε μετά από χρόνο $t = t_{1/2}$

θα έχουμε $n = \frac{n_0}{2}$, οπότε προκύπτει ότι:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{s} * \exp\left(\frac{\Delta E}{KT}\right) \quad (3.8)$$

Η παραπάνω εξίσωση μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, ο χρόνος ημίσειας ζωής αυξάνει εκθετικά καθώς αυξάνει το ενεργειακό βάθος της παγίδας (και άρα καθώς μειώνεται η πιθανότητα διαφυγής), ενώ μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Το φαινόμενο της θερμικής εξασθένησης σήματος είναι σημαντικό για υλικά με κορυφές χαμηλής θερμοκρασίας στην χαρακτηριστική καμπύλη αίγλης τους.

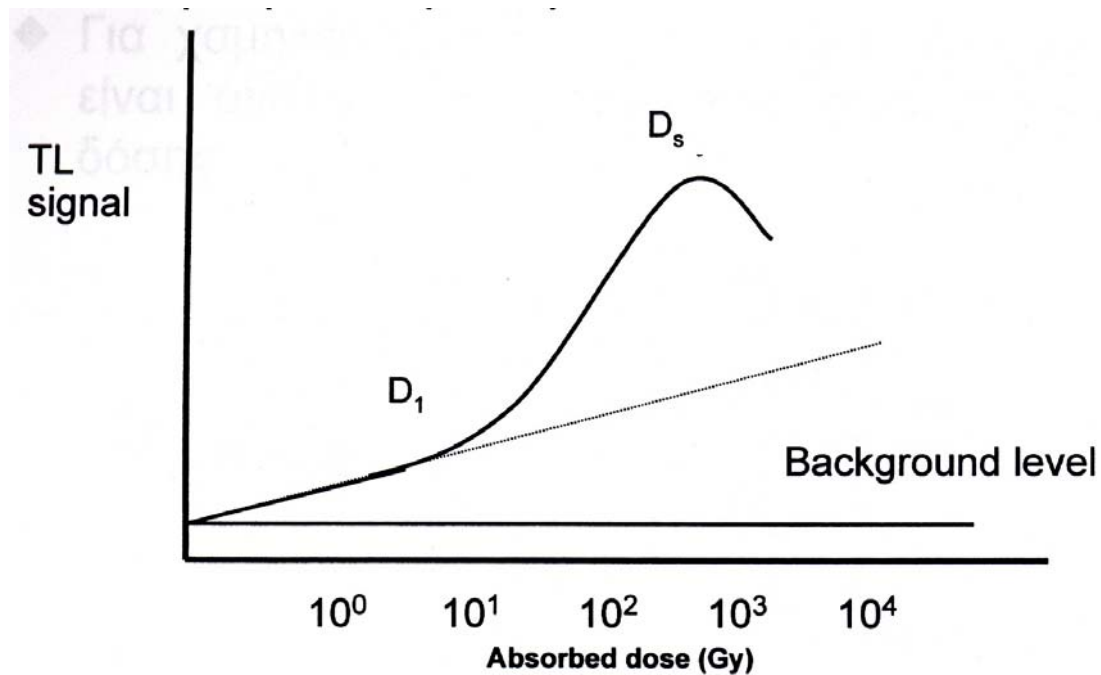
Οπτική εξασθένηση σήματος (Optical fading)

Όταν ένα υλικό θερμοφωταύγειας, που έχει ήδη ακτινοβοληθεί, εκτεθεί σε φωτόνια του ορατού και ιδιαίτερα του υπεριώδους, τότε ενδέχεται να σημειωθεί απορρόφηση τέτοιων φωτονίων από τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια του, και έτσι αυτά να απελευθερωθούν απ' τις παγίδες τους ή να μεταβούν σε άλλα ενεργειακά επίπεδα, με αποτέλεσμα την απώλεια σήματος.

Αλλά και στην περίπτωση ενός μη ακτινοβολημένου κρυστάλλου, η παρουσία των οπτικών ή υπεριωδών φωτονίων, ενδέχεται να δημιουργήσει ένα επουσιώδες, ψευδές σήμα, έπειτα από εκτεταμένη έκθεση. Συνίσταται, λοιπόν, προσεκτική φύλαξη των δοσιμέτρων θερμοφωταύγειας σε κατάλληλη τοποθεσία.

3.9 ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ / ΥΠΕΡΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ / ΚΟΡΕΣΜΟΣ / ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΣΗ

Ως σήμα θερμοφωταύγειας (TL) λαμβάνουμε το ύψος της κορυφής 4-5 ή το εμβαδόν που περικλείεται κάτω απ' την κορυφή 4-5 της καμπύλης αίγλης του υλικού, με πιο δημοφιλή επιλογή, αυτή του εμβαδού. Και στις δύο περιπτώσεις, ωστόσο, το σήμα TL είναι ανάλογο της έντασης του εκπεμπόμενου φωτός. Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζεται η γραφική παράσταση του σήματος θερμοφωταύγειας (TL) σε σχέση με την απορροφούμενη δόση, η οποία καλείται τυπική καμπύλη απόκρισης του σήματος θερμοφωταύγειας στη δόση, και η οποία αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της ποιότητας κάθε θερμοφωταυγάζοντος υλικού. Τα υλικά, με βάση το μέγεθος της ολικής απορροφούμενης δόσης, εμφανίζουν γραμμική ή υπεργραμμική απόκριση στο σήμα εκπομπής τους.



Εικόνα 3.6 Τυπική καμπύλη απόκρισης του σήματος θερμοφωταύγειας στη δόση

Γραμμικότητα (Linearity)

Σε σχετικά χαμηλές τιμές απορροφούμενης δόσης (περίπου έως 10Gy), η απόκριση του σήματος είναι γραμμική, υπάρχει δηλαδή αναλογία δόσης και σήματος, και άρα ισχύει:

$$TL = c * D + B \quad (3.9), \text{ όπου}$$

c: η εκπεμπόμενη θερμοφωταύγεια ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης, και

B: το σήμα υποβάθρου (background) ενός μη ακτινοβολημένου υλικού θερμοφωταύγειας

Υπεργραμμικότητα (Supralinearity) / Κορεσμός (Saturation)

Για τιμές απορροφούμενης δόσης μεγαλύτερες των 10Gy, μιλάμε πλέον για υπεργραμμική απόκριση του σήματος, η οποία ισχύει για δόσεις έως και $D_s = 1000\text{Gy}$ περίπου, καθώς, στη συνέχεια επέρχεται κορεσμός και κάθετη πτώση, εξαιτίας μη επαρκών διαθέσιμων παγίδων.

Στην τιμή του κόρου D_s , το δοσίμετρο αγγίζει τα όρια του, αφού απορροφά τη μέγιστη ενέργεια που μπορεί να καταγράψει ως δόση, και η οποία θεωρείται ότι είναι 20% μικρότερη του D_s . Ως ελάχιστη δόση ανίχνευσης θεωρείται το τριπλάσιο της τυπικής απόκλισης, που εμφανίζει το σήμα υποβάθρου 50 περίπου μη

ακτινοβολημένων κρυστάλλων, το οποίο οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, π.χ. φαινόμενα τριβοφωταύγειας, κ.α.

Η δόση, στην οποία εμφανίζεται υπεργραμμικότητα, παρουσιάζει εξάρτηση από τη γραμμική μεταφορά ενέργειας (LET) των σωματιδίων, καθώς έχει παρατηρηθεί πως η τιμή της είναι μεγαλύτερη για σωματίδια υψηλού LET. Τέλος, αν και η υπεργραμμική απόκριση αυξάνει την ευαισθησία και τη διακριτική ικανότητα του σήματος, εν τούτοις δημιουργεί πρόβλημα, διότι απαιτεί επιπλέον βαθμονόμηση των κρυστάλλων. Κάτι τέτοιο είναι, βέβαια, απαραίτητο στις μικρές δόσεις σε πολύ υψηλές δόσεις, όμως, η αυξημένη ευαισθησία κρίνεται περιττή.

Ευαισθητοποίηση (Sensitization)

Ευαισθητοποίηση του κρυστάλλου σημαίνει αύξηση της ευαισθησίας αυτού, και πραγματοποιείται, όταν απαιτείται υψηλή ακρίβεια του σήματος εκπομπής. Έχει παρατηρηθεί ότι, όταν ένας κρύσταλλος LiF:Mg:Ti ακτινοβοληθεί σε μεγάλο ρυθμό δόσης (300 – 1000Gy) και κατόπιν θερμανθεί για μικρό χρονικό διάστημα (~ 10min) στους 300 °C, τότε η ευαισθησία του, δηλαδή η απόδοση θερμοφωταύγειας, αυξάνει κατά έναν παράγοντα έως και 5 περίπου. Αντιθέτως, θέρμανσή του στους 400 °C για 1 – 2h, προκαλεί μείωση της ευαισθησίας του.

3.10 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΦΩΤΟΝΙΑ

Σε σχετικά χαμηλές δόσεις, όπως αναφέρθηκε προτύτερα, το σήμα θερμοφωταύγειας είναι ανάλογο της συνολικής απορροφούμενης δόσης. Η απορροφούμενη δόση σε έναν φώσφορο σχετίζεται με την έκθεση και το μαζικό συντελεστή απορρόφησης ενέργειας του υλικού, δηλαδή:

$$D_{\text{phosphor}} = c * X * \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{\text{phosphor}}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{\text{air}}} \quad (3.10), \text{ όπου}$$

D_{phosphor} : η απορροφούμενη δόση από το φώσφορο σε Gy

c: μια σταθερά που ισοδυναμεί με τη μέση ενέργεια, που απαιτείται για την παραγωγή ενός ζεύγους ιόντων στον αέρα, ανεξαρτήτως της ενέργειας φωτονίων ($c = \frac{W_{air}}{e}$)

X: η έκθεση σε C/kg

$(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{phosphor}$, $(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{air}$ οι μαζικοί συντελεστές απορρόφησης για τον φώσφορο και τον αέρα, οι οποίοι εξαρτώνται από την ενέργεια φωτονίων

Ο μαζικός συντελεστής ενέργειας απορρόφησης για ένα υλικό θερμοφωταύγειας, που αποτελείται από μεγάλο αριθμό ατόμων στο βασικό πλέγμα και από μικρές ποσότητες ατόμων άλλων προσμίξεων, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{phosphor} = \sum (\frac{\mu_{en}}{\rho})_i * W_i, \text{ όπου}$$

$(\frac{\mu_{en}}{\rho})_i$: ο μαζικός συντελεστής απορρόφησης ενέργειας του $i_{\text{οστού}}$ συστατικού στοιχείου του φωσφόρου, και

W_i : το ποσοστό του στοιχείου στο φώσφορο

Η ποσότητα $F = \{c (\mu_{en}/\rho)_{phosphor} / (\mu_{en}/\rho)_{air}\}$ είναι χαρακτηριστική της ενέργειας φωτονίων και πολύ σημαντική στη δοσιμετρία θερμοφωταύγειας. Κοινώς, καλείται μετατροπή roentgen-to-gray, καθώς πολλαπλασιάζοντας την με την έκθεση X (roentgen), αποδίδει δόση D (gray).

Η ενεργειακή απόκριση ενός υλικού θερμοφωταύγειας μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους. Συνήθως, γίνεται σύγκριση της απόκρισης κανονικοποιημένης ως προς κάποια δοσμένη ενέργεια φωτονίων (1250keV), με την αντίστοιχη ως προς τον αέρα ή τον ιστό. Η Σχετική Ενεργειακή Απόκριση (Relative Energy Response) του υλικού σε ενέργεια E, είναι:

$$RER_E = \frac{[(\mu_{en} / \rho)_{phosphor} / (\mu_{en} / \rho)_{air}]_E}{[(\mu_{en} / \rho)_{phosphor} / (\mu_{en} / \rho)_{air}]_{1250keV}} \quad (3.11)$$

Με την ποσότητα αυτή έχουμε τη δυνατότητα διαπίστωσης πιθανής απόκλισης της απορροφούμενης δόσης για φωτόνια ενέργειας E, αν οι κρύσταλλοι έχουν βαθμονομηθεί σε διαφορετική ενέργεια από την E.

3.11 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ

Τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας (TLD) δεν είναι ικανά να πραγματοποιήσουν άμεσα μια απόλυτη μέτρηση της απορροφούμενης από ακτινοβολία δόσης. Γι' αυτό το λόγο, πρέπει αρχικά να υποβληθούν σε μια διαδικασία βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση είναι απαραίτητη προκειμένου τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας να είναι σε θέση να συσχετίσουν την TL απόκριση του δοσιμέτρου με την μετρούμενη απορροφούμενη δόση από ακτινοβολία. Για τη διεκπεραίωση της βαθμονόμησης απαιτείται η χρήση ενός βαθμονομημένου θαλάμου ιονισμού.

Για συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων E και σχετικά χαμηλές τιμές απορροφούμενης δόσης, ο συντελεστής βαθμονόμησης C ενός TLD δίνεται από τη σχέση:

$$C_{(E)} = \frac{TL}{D_{phosphor}} \quad (3.12), \text{ όπου}$$

TL: το μετρούμενο σήμα θερμοφωταύγειας, εξαιτίας της απορροφούμενης δόσης $D_{phosphor}$ απ' το TLD. Αυτή η σχέση προκύπτει απ' την εξίσωση (3.9), αν αφαιρέσουμε το σήμα υποβάθρου απ' το συνολικό, όταν αυτό είναι του ίδιου μεγέθους· διαφορετικά δεν λαμβάνεται υπ' όψιν.

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία έχει ως εξής. Τα TLD τοποθετούνται πάνω στο θάλαμο ιονισμού και κατόπιν ακτινοβολούνται σε δεδομένη ενεργειακή δέσμη φωτονίων. Στη συνέχεια, το TL σήμα μετράται μέσω της συσκευής ανάγνωσης, ενώ ακολουθεί ο υπολογισμός της δόσης, μέσω της έκθεσης X που χρησιμοποιήθηκε και με τη βοήθεια της σχέσης (3.10). Έτσι, υπολογίζεται η δόση:

$$D_{phosphor} = F * X \quad (3.13), \text{ όπου}$$

F : ο παράγοντας μετατροπής roentgen σε gray για τη δεδομένη ενεργειακή δέσμη και τα συγκεκριμένα TLD.

Το κύριο πρόβλημα της διαδικασίας έγκειται στο γεγονός της εξαγωγής της τιμής του συντελεστή ευαισθησίας σε δεδομένη ενεργειακή δέσμη. Τα TLD, όμως, χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπου οι τιμές των ενεργειακών δεσμών ποικίλουν. Το σωστότερο, λοιπόν, είναι να γίνεται κάθε φορά βαθμονόμηση των TLD που θα χρειασθούν στη συγκεκριμένη εφαρμογή, σε ενέργειες παραπλήσιες εκείνων που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια αυτής.

Τέλος, βαθμονόμηση των TLD συνίσταται να γίνεται και σε μια πηγή Co^{60} με ενέργειες 1,17 και 1,33MeV (μέση ενέργεια 1,25MeV) και χρόνο ημίσειας ζωής $T_{1/2} = 5,3$ χρόνια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η ενέργεια φωτονίων είναι μεγάλη, κι έτσι απαιτείται η κάλυψη του θαλάμου ιονισμού και των TLD με κατάλληλο υλικό, ώστε να εξασφαλιστεί η ηλεκτρονική ισορροπία. Κατόπιν, γνωρίζοντας το συντελεστή βαθμονόμησης για την ενέργεια του Co^{60} , μπορεί να βρεθεί ο συντελεστής βαθμονόμησης για οποιαδήποτε ενέργεια, από την σχετική ενεργειακή απόκριση, δηλαδή κάνοντας χρήση της εξίσωσης (3.11).

3.12 ΥΛΙΚΑ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ

Τα υλικά θερμοφωταύγειας παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, διαφορετικού τύπου. Τα πιο διαδεδομένα από αυτά είναι το LiF, το CaF_2 , το CaSO_4 , το BeO (οξείδιο του βηρυλλίου) και το $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (βορικό λίθιο), καθένα εμπλουτισμένο με διάφορων ειδών προσμίξεις. Στη συνέχεια της παραγράφου, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή ορισμένων εξ αυτών. Επειδή στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δοσίμετρα LiF:Mg:Ti και CaF_2 :Dy, το βάρος της περιγραφής μας επισημαίνεται στα συγκεκριμένα είδη.

LiF:Mg:Ti

Πρόκειται για το πλέον διαδεδομένο και μελετημένο υλικό θερμοφωταύγειας, που βρίσκει ευρεία χρήση σε πολλές εφαρμογές. Ανακαλύφθηκε το 1953 από τον Daniels, κατασκευάστηκε από περισσεύματα επεξεργασίας οπτικών συστατικών, και παρουσίαζε υψηλή ευαισθησία. Κατόπιν, όμως, εγκαταλείφθηκε προς χάριν της αλουμίνας (Al_2O_3), καθώς πολλά δείγματα του υλικού παρουσίαζαν διαφορετικές ιδιότητες θερμοφωταύγειας (1957). Επανήλθε, ωστόσο, το 1961, χάρις τον Cameron που ενδιαφέρθηκε εκ νέου για το υλικό αυτό. Έτσι, η Harshaw Chemical Co δημιούργησε και προώθησε στην αγορά το πρώτο φωσφορώδες υλικό από LiF, γνωστό ως TLD100, καθώς και τα ισότοπά του TLD600 και TLD700.

Το LiF έχει πυκνότητα $\rho = 2,64 \rho_{\text{H}_2\text{O}}$, και ενεργό ατομικό αριθμό $Z_{\text{eff}} = 8,2$, ενώ στις περισσότερες εφαρμογές θεωρείται ισοδύναμος του ανθρώπινου ιστού που έχει $Z_{\text{eff}} = 7,4$. Παρουσιάζει ικανοποιητική αντοχή στις χημικές ουσίες και είναι

πρακτικώς αδιάλυτο στο νερό. Τα TLD100, TLD600 και TLD700 παρουσιάζουν παρόμοια, θα λέγαμε, ευαισθησία στη β και γ ακτινοβολία, αλλά διαφορετική στην ακτινοβολία νετρονίων, γι' αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό για μικτά πεδία νετρονίων και ακτινοβολίας γ.

Τα υλικά αυτά παράγονται με ομογενή τήξη φθοριούχου λιθίου, φθοριούχου μαγνησίου, κρυολίτη λιθίου και φθοριούχου λιθίου – τιτανίου, και διατίθενται σε διάφορες μορφές και διαστάσεις. Έτσι, συναντάμε δοσίμετρα μεμονωμένων κρυστάλλων, σκόνης, μικροράβδων και ταινίας. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, επιλέγεται η πλέον κατάλληλη μορφή δοσιμέτρων.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες για περαιτέρω αύξηση της ευαισθησίας των TLD100, αλλάζοντας τις προσμίξεις του αρχικού υλικού με άλλες (όπως Mg, Cu, P). Αν και αρχικά, η ευαισθησία του αυξήθηκε κατά 20 φορές, από τις πρώτες κιόλας χρήσεις του, φάνηκε ότι αυτή δεν διατηρείται.

Το χαρακτηριστικό φάσμα εκπομπής του LiF:Mg:Ti, παρουσιάζει κορυφή, δηλαδή μέγιστη ένταση στα 400nm (χαρακτηριστικό μπλε), και ανταποκρίνεται, έτσι, ικανοποιητικά στη μέγιστη ευαισθησία του Φ/Π, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόκρισης.

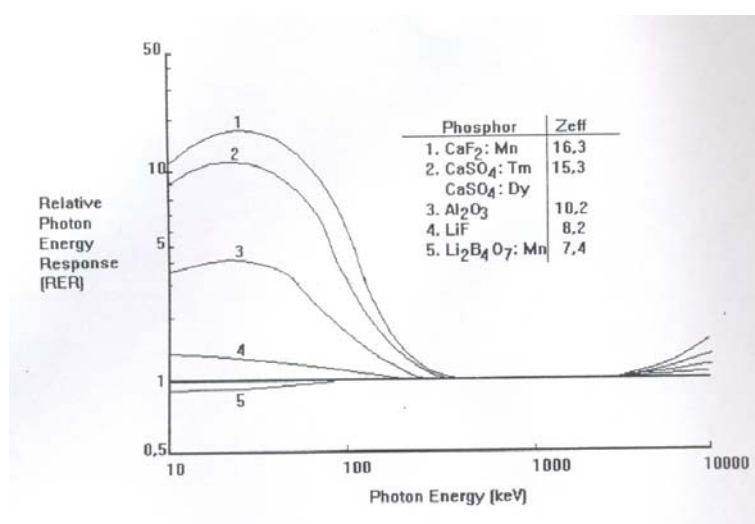
Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η καμπύλη αίγλης του LiF:Mg:Ti περιλαμβάνει δύο διαφορετικές καμπύλες, (A) και (B), ανάλογα με τη θερμική επεξεργασία που υφίσταται πριν την ακτινοβόλησή του. Μεταβολή στις συνθήκες θερμικής επεξεργασίας, συνεπάγεται με εμφάνιση και άλλων καμπυλών, διαφορετικών της (A) και (B). Συνίσταται, λοιπόν, όταν ασχολούμαστε με δοσιμετρία να αποδίδουμε την απαιτούμενη προσοχή στην επαναληψιμότητα, εφαρμόζοντας πάντα το ίδιο πρωτόκολλο ανόπτησης με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια.

Ως κύρια δοσιμετρική κορυφή επιλέγεται η 5, που έχει $T_{1/2} = 80$ χρόνια. Το LiF:Mg:Ti παρουσιάζει, λοιπόν, πολύ χαμηλό ρυθμό απώλειας σήματος, που υπολογίζεται τυπικά μικρότερος από 5% στη διάρκεια ενός έτους.

Για μικρές απορροφούμενες δόσεις η απόκριση είναι γραμμική, ενώ για μεγαλύτερες γίνεται υπεργραμμική και εξαρτάται από το LET της μετρούμενης ακτινοβολίας. Η ελάχιστη ανιχνευόμενη δόση εξαρτάται απ' τη μορφή του χρησιμοποιούμενου δοσιμέτρου και τη συσκευή ανάγνωσης του σήματος. Σε δοσίμετρα πλακιδίου, ράβδου και σκόνης η ελάχιστη δόση κυμαίνεται μεταξύ 50 και 100μGy, αλλά η μέγιστη καταγραφόμενη δόση δύναται να αγγίζει και τα 1000Gy.

Δόση άνω των 1000Gy προκαλεί, ωστόσο, μη αναστρέψιμες καταστροφές στην ευαισθησία και την κρυσταλλική δομή του υλικού.

Η ενεργειακή απόκριση του LiF στα φωτόνια είναι γραμμική στις περισσότερες ενέργειες. Σε ενέργειες (~30-80keV), όμως, πολύ μικρότερες των 1,25MeV, όπου έχει βαθμονομηθεί το υλικό, η απόκριση παύει να' ναι γραμμική, εμφανίζεται απόκλιση της τάξης του 30%, και το RER έχει τιμή 1,3. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί ενδεχόμενο πρόβλημα αυτής της μορφής στη δοσιμετρία, απαιτείται βαθμονόμηση των δοσιμέτρων σε ενέργεια παραπλήσια εκείνων, που θα χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη εφαρμογή.



Εικόνα 3.7 Θεωρητικές ενεργειακές αποκρίσεις ορισμένων υλικών θερμοφωταύγειας, συμπεριλαμβανομένου και του LiF

Το LiF:Mg:Ti, λόγω των ιδιοτήτων του, που μόλις αναφέρθηκαν, χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές εφαρμογές, όπως στη ιατρική, στη δοσιμετρία προσωπικού, στην ακτινοπροστασία, στη δοσιμετρία νετρονίων περιβάλλοντος, κ.α.

Al₂O₃

Το Al₂O₃ είναι ένα ακόμη υλικό θερμοφωταύγειας, το οποίο συναντάται σε πολλές μορφές. Παρουσιάζει ποικίλες ατέλειες, είναι αρκετά δύστηκτο και ικανό να θεωρηθεί ως ισοδύναμο ιστού, με εξαίρεση τις περιπτώσεις όπου οι ενέργειες φωτονίων είναι χαμηλές. Το φάσμα εκπομπής θερμοφωταύγειας του υλικού διαφέρει ανάλογα με το είδος του Al₂O₃. Οι κρύσταλλοι με προσμίξεις Ti παρουσιάζουν κορυφή εκπομπής στα 420nm (μπλε περιοχή), ενώ οι κρύσταλλοι με προσμίξεις Cl παρουσιάζουν κορυφή στα 700nm (κόκκινη περιοχή).

CaSO₄

Ένα ακόμη υλικό θερμοφωταύγειας είναι το CaSO₄, το οποίο είναι το χαρακτηριστικότερο των λεγόμενων συμβατικών υλικών υψηλής ευαισθησίας, που παρουσιάζουν ευαισθησία 15 φορές μεγαλύτερη της αντίστοιχης των TLD100 και συνάμα δεν είναι ισοδύναμα ιστού. Το CaSO₄ παράγεται σε πολλά σημεία στον κόσμο, ενώ το CaSO₄:Dy, γνωστό και ως TLD900, παρασκευάζεται από την Harshaw, με μορφή σκόνης ή πεπιεσμένου chip. Το CaSO₄:Mn είναι το πιο ευαίσθητο έναντι των υπολοίπων υλικών θερμοφωταύγειας, καθώς παρουσιάζει ευαισθησία έως και 70 φορές μεγαλύτερη απ' την ευαισθησία των TLD100, γεγονός που επιτρέπει μετρήσεις χαμηλών δόσεων της τάξεως των 50nGy μόλις, με σταθερή απόκλιση 10%. Παρ' όλα αυτά, εμφανίζει δοσιμετρική καμπύλη στη χαμηλή θερμοκρασία των 70 °C, γεγονός που συνεπάγεται με γρήγορη εξασθένηση σήματος (περίπου 60% την ημέρα), και που αποτελεί βασικό μειονέκτημα του υλικού.

Mg₂SiO₄

Το υλικό αυτό κατέχει τη δεύτερη υψηλότερη ευαισθησία απ' όλα τα υπόλοιπα υλικά θερμοφωταύγειας, η οποία, σε μερικές περιπτώσεις, γίνεται έως και 50 φορές μεγαλύτερη της αντίστοιχης των TLD100. Τα χαρακτηριστικά της ενεργειακής του απόκρισης για τα φωτόνια είναι ίδια με του Al₂O₃, ωστόσο, παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία στο φως, με αποτέλεσμα τη παραγωγή σήματος υποβάθρου και την εξασθένηση σήματος, πράγμα που αποτελεί βασικό μειονέκτημά του.

CaF₂

Μια ακόμη σημαντική οικογένεια υλικών θερμοφωταύγειας είναι αυτή του CaF₂. Το CaF₂ υπάρχει στη φύση ως ορυκτό και έχει μελετηθεί σε πολλούς τύπους και μορφές, ως δοσίμετρο θερμοφωταύγειας. Η ευαισθησία του φυσικού CaF₂ είναι τυπικά 20 φορές μεγαλύτερη απ' την αντίστοιχη των TLD100, ωστόσο, αυτό εξαρτάται απ' την προέλευση του υλικού, με αποτέλεσμα να αναφέρεται μια ευρεία γκάμα κατωφλίων δόσης, μεταξύ 1-10μGy. Η απώλεια σήματος είναι υψηλή και φτάνει έως και 25% μετά από 4 ώρες, ενώ η απόκρισή του είναι γραμμική ακόμα και σε μεγάλο εύρος απορροφούμενης δόσης (μέχρι τα 50Gy).

Τα παράγωγα του CaF₂ προκύπτουν με προσμίξεις δυσπροσίου, CaF₂:Dy, θουλίου, CaF₂:Tm, και μαγγανίου, CaF₂:Mn, και αναφέρονται ως TLD200, TLD300 και TLD400 αντίστοιχα, με βάση την ορολογία της Harshaw που τα κυκλοφορεί στην αγορά. Τα TLD200 και TLD300 έχουν πολύπλοκη καμπύλη αίγλης και εμφανίζουν

δοσιμετρικές κορυφές στους 150-250 °C. Κάθε καμπύλη αίγλης παρουσιάζει διαφορετική απόκριση δόσης και διαφορετική εξάρτηση απ' το LET, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μικτά πεδία.

Τα TLD200 χάνουν γρήγορα το σήμα τους, ακόμα και κάτω απ' τις καλύτερες συνθήκες φύλαξής τους, εξαιτίας της εμφάνισης των κορυφών τους σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα TLD400 έχουν ευαισθησία 5 φορές μεγαλύτερη αυτής των TLD100, και τα TLD200 15 φορές μεγαλύτερη. Γενικά, σε φωτόνια χαμηλής ενέργειας, όλα τα είδη CaF₂ υπερανταποκρίνονται κατά έναν παράγοντα 15 έως 20.

Ο πίνακας που ακολουθεί είναι ενδεικτικός των χαρακτηριστικών ορισμένων άλλων υλικών θερμοφωταύγειας.

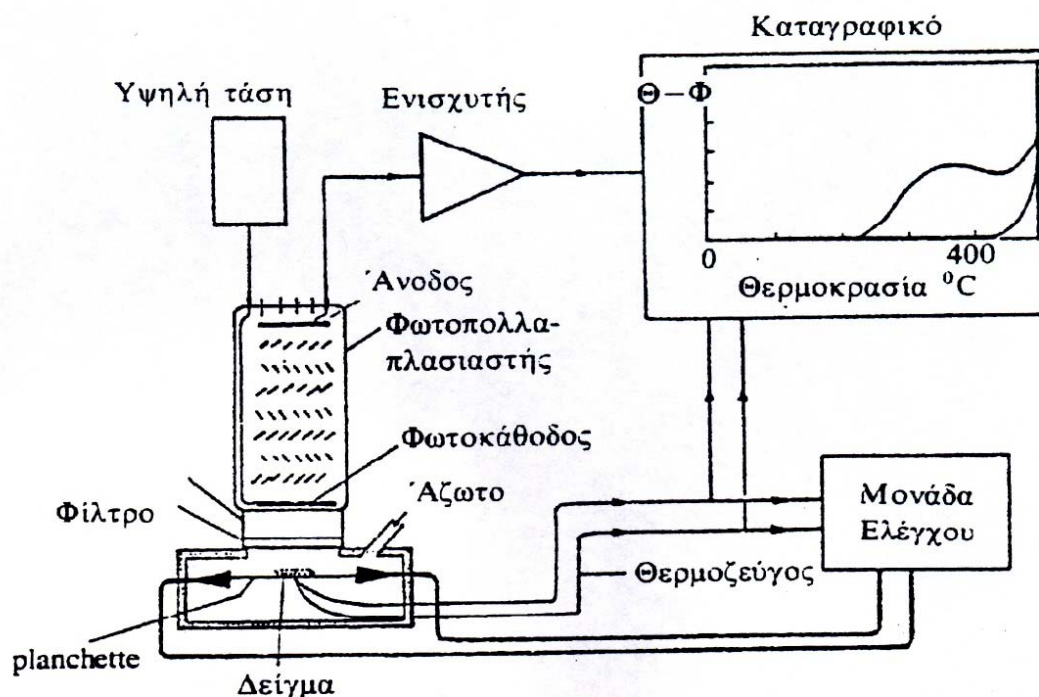
	Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn	CaF ₂ :Na	CaF ₂ :Mn	CaF ₂ :Dy	CaSO ₄ :Mn	CaSO ₄ :Tm	CaSO ₄ :Dy	BeO
Πυκνότητα σε gr/cm ³	2,3	3,18	3,18	3,18	2,61	2,61	2,61	3,01
Ενεργός ατομικός αριθμός Z _{eff}	7,4	16,3	16,3	16,3	15,3	15,3	15,3	7,1
Θερμοκρασία της κύριας κορυφής δοσιμετρίας σε °C	210	200, 275	260	200, 240	110	220, 250	220, 250	180, 220
Εξασθένιση κορυφής σε κανονική θερμοκρασία	5-10% σε 3 μήνες	<3% σε 9 μήνες	15% σε 2-4 εβδομάδες	25% σε 2-4 εβδομάδες	35% σε 24 ώρες	6% σε 6 μήνες	6% σε 6 μήνες	>5% σε 5 μήνες
RER (ως προς το ⁶⁰ Co με E=1,25MeV)	0,9	13-15	13-15	13-15	10-12	10-12	10-12	10
Εύρος απορροφούμενης δόσης (Gy)	10 ⁻⁴ - 10 ⁴	<10 ⁻¹ - 10 ²	10 ⁻⁵ – 2*10 ³	10 ⁻⁶ -10 ³	10 ⁻⁷ - 10 ²	10 ⁻⁶⁷ - 10 ²	10 ⁻⁶ - 10 ³	10 ⁻⁴ - 10 ³
Μήκος κύματος εκπομπής της κύριας κορυφής (nm)	600	380	500	480, 577	500	452	478, 571	330
Χημική σταθερότητα	Υγροσκοπική	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
Διαθέσιμες φυσικές μορφές	Σκόνη, πλακίδια, PTFE μικροράβδοι	Μεμονωμένοι κρύσταλλοι	Σκόνη, πλακίδια, μικροράβδοι	Κρύσταλλοι, σκόνη, πλακίδια	Σκόνη	Μεμονωμένοι κρύσταλλοι	Σκόνη, πλακίδια	Κεραμικό
Κύριες εφαρμογές	Δοσιμετρία ακτινοδιαγνωστικής - ακτινοθεραπείας	Μέτρηση μικρών δόσεων	Μέτρηση μικρών ή μεγάλων δόσεων	Μέτρηση μικρών ή μεγάλων δόσεων	Περιβαλλοντική δοσιμετρία	Περιβαλλοντική δοσιμετρία	Περιβαλλοντική δοσιμετρία	Προσωπική δοσιμετρία
Τοξικότητα	Υψηλή αν απορροφηθεί	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή αν απορροφηθεί

Πίνακας 3.2 Βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων υλικών θερμοφωταύγειας

3.13 ΑΝΑΓΝΩΣΤΗΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ (TLD READER)

Η μέτρηση του σήματος των δοσιμέτρων θερμοφωταύγειας, αμέσως μετά την έκθεσή τους σε ιοντίζουσα ακτινοβολία, πραγματοποιείται με τη βοήθεια ειδικών συσκευών ανάγνωσης, που καλούνται αναγνώστες θερμοφωταύγειας, η κοινώς TLD Readers. Τα δομικά μέρη μιας τέτοιας συσκευής είναι:

- Η συσκευή θέρμανσης του TLD (TLD Heating system)
- Η συσκευή ανίχνευσης και συλλογής της ακτινοβολίας θερμοφωταύγειας (Light collection system)
- Το σύστημα μέτρησης του εκπεμπόμενου σήματος (Signal measuring system)
- Η οθόνη λειτουργίας και το σύστημα καταγραφής (Display system)



Εικόνα 3.8 Διάταξη συσκευής ανάγνωσης σήματος θερμοφωταύγειας

Συσκευή θέρμανσης

Σκοπός της συγκεκριμένης συσκευής είναι η προσφορά θερμότητας, δηλ. θερμικής ενέργειας, στα παγιδευμένα ηλεκτρόνια του κρυστάλλου προκειμένου ν' απελευθερωθούν, εκπέμποντας έτσι το σήμα θερμοφωταύγειας, που θέλουμε να μετρήσουμε. Παράλληλα, χρησιμοποιείται, μερικές φορές, και για την εξάλειψη των

ασταθών κορυφών των χαμηλών θερμοκρασιών, μέσω ανόπτωσης σε χαμηλή θερμοκρασία, πριν την ανάγνωση του σήματος απ' τις κύριες πλέον δοσιμετρικές καμπύλες. Ο κρύσταλλος τοποθετείται πάνω σε μεταλλικό δίσκο, που βρίσκεται στο εσωτερικό ενός θαλάμου, και τότε λαμβάνει χώρα η διαδικασία θέρμανσής του, που μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους, όπως:

- *Θέρμανση με τη βοήθεια ωμικής αντίστασης.* Η διαρροή του ηλεκτρικού ρεύματος θερμαίνει άμεσα ή έμμεσα το TLD. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας γίνεται με τη βοήθεια θερμικού ζεύγους, που βρίσκεται σε επαφή με το δίσκο ή συγκολλημένο σ' αυτόν. Πρόκειται για τη πιο διαδεδομένη μέθοδο.
- *Θέρμανση με διοχέτευση θερμού αδρανούς αερίου* στο χώρο μέτρησης (κυρίως αζώτου N), που συνεπάγεται με θέρμανση του TLD. Η θέρμανση είναι γρήγορη και δραστική, ενώ η μέθοδος χρησιμοποιείται σε πολλούς αυτόματους Readers, και πάντα για δοσίμετρα στερεάς μορφής.
- *Θέρμανση με υπέρυθρη ακτινοβολία.* Εδώ, γίνεται χρήση ενός στοιχείου που εκπέμπει στο υπέρυθρο, θερμαίνοντας το δίσκο τοποθέτησης του TLD, και άρα και το ίδιο. Ωστόσο, σημειώνεται διαρροή φωτός, που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα, καθώς επηρεάζει το καθαρό σήμα θερμοφωταύγειας, με αποτέλεσμα η μέθοδος να έχει περιορισμένο πεδίο εφαρμογής.
- *Θέρμανση με ραδιοσυχνότητες.* Στην περίπτωση αυτή, η θέρμανση του TLD πραγματοποιείται με ρεύμα εξ επαγωγής, μέσω ενός επαγωγικού θερμαντικού πηνίου ραδιοσυχνοτήτων. Πρόκειται για αξιόπιστη μέθοδο, που εμφανίζει όμως δυσκολίες στον έλεγχο του κύκλου θέρμανσης.

Σύστημα ανίχνευσης και συλλογής ακτινοβολίας θερμοφωταύγειας

Σκοπός της συσκευής αυτής είναι η ανίχνευση και συγκέντρωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας θερμοφωταύγειας, που ακολουθεί την αποπαγίδευση των ηλεκτρονίων. Αυτή η διαδικασία συνοδεύεται από ταυτόχρονη απόρριψη οποιαδήποτε άλλης μορφής ακτινοβολίας, όπως και από μετατροπή του φωτός θερμοφωταύγειας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Το συγκεκριμένο ρόλο, σε όλες τις συσκευές ανάγνωσης, αναλαμβάνει μια συσκευή που λέγεται φωτοπολλαπλασιαστής Φ/Π (photo multiplier).

Η λειτουργία του Φ/Π βασίζεται σε φαινόμενα φωτοεκπομπής και δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων. Φωτοεκπομπή είναι η εξαγωγή ηλεκτρονίων από ένα υλικό, εξαιτίας της έκθεσής του σε οπτική ακτινοβολία. Στην περίπτωση μας,

το υλικό ονομάζεται φωτοκάθοδος. Τα ηλεκτρόνια αυτά επιταχύνονται μέσω κατάλληλων διαφορών δυναμικού και κατόπιν προσκρούουν σε άλλες επιφάνειες εκπομπής, που καλούνται δύνοδοι, με αποτέλεσμα την εκπομπή περισσότερων ηλεκτρονίων. Με λίγα λόγια, ο Φ/Π λειτουργεί ως πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων, και έτσι, πραγματοποιείται σημαντική ενίσχυση του αρχικού φωτορεύματος, η οποία αυξάνεται με αύξηση της ευαισθησίας του Φ/Π, που εξαρτάται με τη σειρά της, από τον αριθμό των δυνοδών που διαθέτει ο Φ/Π, όπως και απ' την εφαρμογή υψηλής τάσης μεταξύ φωτοκαθόδου – ανόδου (~650 – 1100 Volts).

Οι Φ/Π ποικίλουν όσον αφορά τη σύσταση της φωτοκαθόδου τους (Καίσιο, Cs ή αντιμόνιο, Sb), και κατά συνέπεια και του φάσματος εκπομπής τους, παράγοντες που καθορίζουν επίσης την ευαισθησία τους. Στα συστήματα δοσιμετρίας χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον φωτοκάθοδοι με μέγιστη ευαισθησία γύρω στα 400 nm.

Τέλος, για την αποτελεσματική μείωση οποιασδήποτε άλλης μορφής ανεπιθύμητης ακτινοβολίας, χρησιμοποιούνται φίλτρα διέλευσης υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων (High pass filters, Band pass filters).

Σύστημα μέτρησης και ενίσχυσης του σήματος

Το συνολικό ρεύμα που δημιουργεί ο Φ/Π είναι ανάλογο της θερμοφωταύγειας που έκπεμψε ο κρύσταλλος κατά τη διάρκεια της θέρμανσής του, και μετράται με τη βοήθεια ενός ηλεκτρόμετρου, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί μια διαδικασία, κατά την οποία επιτυγχάνεται η ενίσχυση του τελικού σήματος.

Οθόνη λειτουργίας και σύστημα καταγραφής

Τα μετρητικά συστήματα συνοδεύονται από κατάλληλα προγράμματα και φθορίζουσα οθόνη, που μας επιτρέπουν την απεικόνιση της καμπύλης αίγλης του δοσιμέτρου, την απεικόνιση της τιμής του συνολικού φορτίου, και τη δυνατότητα μιας πληθώρας επιλογών που σχετίζονται με την ανάλυση και την επεξεργασία της καμπύλης και των αναγραφόμενων στοιχείων της οθόνης (π.χ. επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος, καναλιού μέτρησης, κ.α.). Τέλος, ορισμένοι TLD Readers διαθέτουν και συστήματα εκτύπωσης των δεδομένων μέτρησης, ανάλυσης και επεξεργασίας.

3.14 ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ TLD (ANNEALING)

Κάθε υλικό θερμοφωταύγειας, που χρησιμοποιείται στη δοσιμετρία, είναι απαραίτητο μετά από κάθε ακτινοβόλησή του, και προτού ξαναχρησιμοποιηθεί, να ακολουθεί μια διαδικασία, που σε γενικές γραμμές έχει ως σκοπό να επαναφέρει τις βασικές ιδιότητες του. Αυτή η διαδικασία καλείται θερμική επεξεργασία, και πραγματοποιείται με τη βοήθεια ειδικών συσκευών, που θα περιγράψουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Πιο συγκεκριμένα, η θερμική επεξεργασία αποβλέπει σε δύο βασικούς σκοπούς:

- Στο ολοκληρωτικό άδειασμα των παγίδων του υλικού μετά το πέρας της ακτινοβόλησης και της ανάγνωσης του σήματος
- Στη σταθεροποίηση των παγίδων ηλεκτρονίων, ώστε να επιτυγχάνονται οι ίδιες περίπου καμπύλες αίγλης, ακόμα και μετά από μεγάλο αριθμό επανειλημμένων ακτινοβολήσεων και θερμικών επεξεργασιών.

3.15 ΣΗΜΑ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ (BACKGROUND)

Όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο, η ανάγνωση του σήματος θερμοφωταύγειας γίνεται με τη βοήθεια ειδικών συσκευών, των TLD Readers. Η τιμή του σήματος TL που λαμβάνουμε, ωστόσο, δεν αντιστοιχεί στο πραγματικό σήμα. Κι αυτό διότι, το σήμα που διαβάζουμε δεν είναι άλλο παρά το άθροισμα του σήματος που οφείλεται στην ιοντίζουσα ακτινοβολία TL(D), και του σήματος TL(B) που οφείλεται σε άλλες αιτίες, πλην της επίδρασης της ακτινοβολία. Δηλαδή:

$$TL = TL(D) + TL(B)$$

Η ύπαρξη του σήματος TL(B) οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως π.χ. σε φαινόμενα τριβοφωταύγειας, χημειοφωταύγειας, και άλλων, που δημιουργούν ένα ψευδές σήμα στο δοσίμετρο, στο ρεύμα σκότους από την θερμιονική εκπομπή της φωτοκαθόδου και των δυνόδων του Φ/Π, στη θερμιονική εκπομπή της θερμαινόμενης μεταλλικής επιφάνειας, στην οποία τοποθετείται το δοσίμετρο, κατά την ανάγνωσή

του. Έτσι, το σήμα που μας ενδιαφέρει, και το οποίο αποτελεί το καθαρά προερχόμενο από ακτινοβολία σήμα, είναι το TL(D):

$$TL(D) = TL - TL(B) \quad (3.14)$$

3.16 ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ

Η δοσιμετρία θερμοφωταύγειας είναι μια διαδικασία καθορισμού δόσεων, προερχόμενων από επίδραση ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, ωστόσο, υπεισέρχονται ορισμένοι παράγοντες, που αποτελούν πηγές σφαλμάτων και επηρεάζουν την ακρίβεια και την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Οι παράγοντες αυτοί είναι τυχαίας ή συστηματικής φύσεως, και προέρχονται απ' τα ίδια τα δοσίμετρα, τη συσκευή ανάγνωσης, τη διαδικασία εκπομπής του σήματος και τη θερμική επεξεργασία των κρυστάλλων. Οι σημαντικότερες πηγές σφαλμάτων αναφέρονται στη συνέχεια.

Σφάλματα προερχόμενα απ' τα δοσίμετρα

- Απόκλιση της απόκρισης των δοσιμέτρων από την ενέργεια
- Εξάρτηση της απόκρισης των δοσιμέτρων από την κατεύθυνση της ακτινοβολίας
- Ευαισθησία στο φως
- Απώλεια σήματος (fading)
- Μεταβολές στη μάζα του δοσιμέτρου
- Απόκλιση στην ευαισθησία μιας παρτίδας δοσιμέτρων
- Ελλιπής καθαρισμός του δοσιμέτρου
- Επίδραση της θερμοκρασίας
- Μη έκθεση δοσιμέτρου στην ακτινοβολία (λόγω θέσης, διαστάσεων πεδίου, κ.τ.λ.)
- Αλλαγές στην ευαισθησία του δοσιμέτρου λόγω βλάβης από ακτινοβολία (δόση άνω του επιτρεπτού ορίου)
- Μεταβολές στην επιφάνεια και τις οπτικές ιδιότητες του δοσιμέτρου, λόγω μη προσεκτικής μεταχείρισής του

Σφάλματα προερχόμενα απ' τη συσκευή ανάγνωσης και τη διαδικασία εκτίμησης του TL σήματος

- Επίδραση του σήματος υποβάθρου, ιδιαίτερα σε μετρήσεις χαμηλών δόσεων
- Μη κατάλληλη θέση του δοσιμέτρου στη συσκευή ανάγνωσης, που επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας από τη πηγή θέρμανσης στο δοσίμετρο
- Αλλαγή στις οπτικές ιδιότητες της συσκευής ανάγνωσης, εξαιτίας μεταβολών της ανακλαστικότητας της θερμαινόμενης επιφάνειας
- Αστάθεια της απόδοσης των παραμέτρων της συσκευής ανάγνωσης (π.χ. του Φ/Π, του περιφερειακού εξοπλισμού)
- Αστάθεια στο θερμικό κύκλο ανάγνωσης κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης και των μετρήσεων
- Μεταβολές στο ρεύμα σκότους και στο σήμα μηδενικής δόσης (μετρήσεις χωρίς δοσίμετρα)

Σφάλματα προερχόμενα από θερμική επεξεργασία

- Μη αναπαραγωγισιμότητα της θερμικής επεξεργασίας, κατά τη διάρκεια της ανόπτησης
- Μη αναπαραγωγισιμότητα της θερμικής επεξεργασίας (θέρμανσης και ψύξης), κατά τη διάρκεια της μέτρησης του δοσιμέτρου

Τα σφάλματα, που γεννούνται απ' τις προαναφερθείσες πηγές, είναι, ωστόσο, δυνατό να ελαχιστοποιηθούν ή ακόμα και να αποφευχθούν, αν αντιμετωπίσουμε με ιδιαίτερη προσοχή το συνολικό κύκλο μέτρησης των δοσιμέτρων (π.χ. έλεγχος ομοιογένειας παρτίδας TLD, σωστή φύλαξη TLD, προθέρμανση συσκευής ανάγνωσης, βαθμονόμηση TLD σε ενέργεια παρόμοια με αυτή που θα χρησιμοποιηθεί, κ.τ.λ.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ - ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία αποτελεί έναν απ' τους πολλούς βλαπτικούς παράγοντες του περιβάλλοντος, καθώς η ενέργεια που μεταφέρει, χαρακτηρίζεται από μια εξαιρετικά μεγάλη βλαπτική ικανότητα.

Ειδικά, ο ιονισμός της οργανικής ύλης προκαλεί μεταβολές, έστω και παροδικές, στα άτομα και τα μόρια των χημικών ενώσεων, με αποτέλεσμα τη συνήθη εμφάνιση βλαβών στα κύτταρα -και κατά προέκταση στο σύνολο του οργανισμού-, οι οποίες αν δεν επιδιορθωθούν, οδηγούν στην τροποποίηση των κυττάρων, στην αναστολή της αναπαραγωγικής τους ικανότητας, ή στη χειρότερη περίπτωση, στη θανάτωσή τους. Τα περισσότερα όργανα και ιστοί αντέχουν ακόμη και σε σημαντικές απώλειες του αριθμού των κυττάρων τους, αλλά αυτό μέχρι ένα βαθμό, καθώς πάνω από αυτό, παρατηρείται βλάβη του οργανισμού, οφειλόμενη σε απώλεια της λειτουργικότητας του εν λόγω ιστού ή οργάνου.

4.2 DNA: Η ΑΙΤΙΑ ΤΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΚΤΙΝΟΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΎΛΗΣ

Ο επί χρόνια αναζητούμενος ευαίσθητος στόχος που προκαλεί την αυξημένη ευπάθεια της ζώσας ύλης στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες, είναι το DNA.

Τι είναι όμως το DNA; Πρόκειται για ένα μακρομόριο διπλής έλικας, διαμέτρου $30 \cdot 10^{-10}$ m, το οποίο βρίσκεται στον πυρήνα των κυττάρων και περιέχει το γενετικό κώδικα (δηλαδή το γενετικό υλικό που μεταφέρεται στους απογόνους), όπως και μια σειρά εντολών για την παραγωγή πρωτεϊνών, ενζύμων και άλλων χημικών ουσιών, απαραίτητων για την λειτουργία και την αναπαραγωγή των κυττάρων.

Πρόκειται για έναν πολύ σημαντικό στόχο, αν αναλογιστεί κανείς ότι σε κάθε μόριο DNA αντιστοιχούν περίπου 1.200.000 μόρια νερού, 7.000 μόρια λιπών, 4.000

μόρια οργανικών ουσιών, 700 μόρια πρωτεϊνών και 700.000 μόρια άλλων ανόργανων ουσιών. Μπορούμε, λοιπόν, να φανταστούμε τις επώδυνες επιδράσεις της ακτινοβολίας στο DNA, καθώς οποιαδήποτε παρέμβαση σ' αυτό είναι δυνατό να προκαλέσει:

- δυσλειτουργία που δύναται να επιφέρει ακόμα και το θάνατο του κυττάρου
- μετάδοση γενετικού υλικού, αλλοιωμένου ως προς κάποια στοιχεία του, αν πρόκειται για γενετικό κύτταρο, με καταστροφικές, όπως αντιλαμβανόμαστε, συνέπειες.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου, θα παρουσιαστεί αναλυτικά ο τρόπος επίδρασης της ακτινοβολίας στο DNA, και οι επιπτώσεις αυτού του γεγονότος στο μόριό του.

4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ – ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΥΛΗΣ

Η ακτινοβόληση οποιουδήποτε βιολογικού υλικού συνεπάγεται με μια αλληλουχία διαδικασιών, ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τη βιολογική ύλη, οι οποίες χωρίζονται σε τρία στάδια, το φυσικό, το χημικό και το βιολογικό, τα οποία και θα συνοψίσουμε παρακάτω.

A.ΦΥΣΙΚΟ

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία, κατά τη διέλευσή της μέσω της ύλης, με φυσικούς μηχανισμούς αλληλεπιδράσεων (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, φαινόμενο Compton, φαινόμενο διδύμου γενέσεως), αποδίδει ενέργεια σ' αυτήν, μέσω ιοντισμών και διεγέρσεων. Η χρονική διάρκεια αυτής της διαδικασίας εκτιμάται στα 10^{-13} sec.

Η κατανομή των ιοντισμών είναι ανομοιογενής, και εξαρτάται από το είδος και την ενέργεια της ακτινοβολίας. Αντιλαμβανόμαστε, ότι η ενέργεια που μεταφέρεται στην ύλη δεν είναι η ίδια για όλα τα κύτταρα και τα μόρια που τα αποτελούν. Παρουσιάζει μια μέση τιμή, που αντιστοιχεί στην απορροφούμενη δόση, και μια κατανομή (Poisson) περί αυτήν. Φυσικά, οι επιπτώσεις για κάθε κύτταρο διαφέρουν, καθώς είναι ανάλογες της απορροφούμενης δόσης.

B.ΧΗΜΙΚΟ

Τα άτομα που ακτινοβολήθηκαν κατά το προηγούμενο στάδιο, αντιδρούν με άλλα συστατικά των κυττάρων, με ταχείς χημικές αντιδράσεις, πράγμα που οφείλεται

στο ότι οι ιοντισμοί και οι διεγέρσεις προκαλούν ρήξη χημικών δεσμών και δημιουργία ελεύθερων ριζών.

Το μεγαλύτερο μέρος των βιολογικών συστημάτων αποτελείται από H_2O , γι' αυτό και ο μεγαλύτερος αριθμός των ιοντισμών επιτελείται στα μόρια του H_2O . Τα μόρια του H_2O , λοιπόν, βρίσκονται σε κατάσταση ιονισμού (H_2O^- , H_2O^+), γεγονός που συντελεί στη δημιουργία δραστικών ριζών (ραδιόλυση ύδατος), οι οποίες με τη σειρά τους τείνουν να αντιδράσουν είτε μεταξύ τους ή με O_2 , οδηγώντας έτσι στη δημιουργία πιο δραστικών ριζών, είτε με οργανικά μόρια. Αποτέλεσμα αυτών, η παρουσία του O_2 στο περιβάλλον των κυττάρων να δρα προς μονιμοποίηση των βλαβών. Το χημικό στάδιο διαρκεί περίπου 10^{-16} sec.

Γ.ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ

Το βιολογικό στάδιο ακολουθεί αμέσως μετά το χημικό. Διαρκεί από μερικά λεπτά έως μερικά χρόνια, και περιλαμβάνει την επιδιορθωτική δράση κάποιων φυσιολογικών μηχανισμών, κυρίως ενζύμων, στους μοριακούς σχηματισμούς που έχουν υποστεί βλάβη κατά το χημικό στάδιο, με σκοπό την αποκατάσταση των αλλοιώσεων.

Οι προκληθείσες βλάβες ενισχύονται κατά τη διάρκεια μεταβολικών διεργασιών και εκδηλώνονται αφού παρέλθει κάποιο χρονικό διάστημα (λανθάνουσα περίοδος).

4.4 ΠΡΟΣΒΟΛΗ DNA ΑΠΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Όπως είπαμε παραπάνω, η αυξημένη ακτινοευαισθησία των βιολογικών συστημάτων οφείλεται στο DNA τους. Έτσι, είναι σημαντικό στο σημείο αυτό, να αναλύσουμε την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – βιολογικής ύλης μικροσκοπικά, δηλαδή σε κυτταρικό επίπεδο.

Οι δύο επικρατέστερες θεωρίες για την ερμηνεία της δράσεως της ιοντίζουσας ακτινοβολίας στο DNA είναι:

- η θεωρία της άμεσης δράσης, με βάση την οποία οι βλάβες μπορεί να προκληθούν απευθείας από την απορρόφηση της ακτινοβολίας

- η θεωρία της έμμεσης δράσης, κατά την οποία οι βλάβες οφείλονται στη δράση των ελεύθερων ριζών που παράγονται κατά το χημικό στάδιο

Μικροσκοπικά, λοιπόν, οι δραστικές ρίζες, που δημιουργήθηκαν κατά το χημικό στάδιο, επιτίθενται στη φυσιολογική αλυσίδα του DNA και προκαλούν:

- ακτινική βλάβη αυτού
- ακτινοπροκλητές μεταλλάξεις
- ακτινοπροκλητές χρωματοσωμιακές αλλοιώσεις

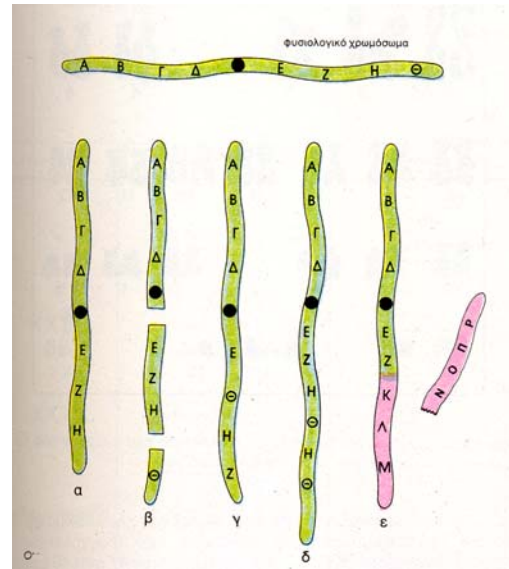
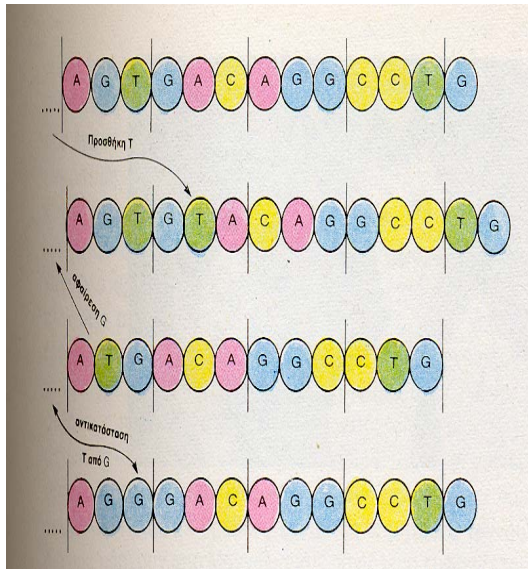
Οι παραπάνω βλάβες είναι δυνατό να προκληθούν και απευθείας (άμεση δράση).

Ας εξετάσουμε παρακάτω την κάθε περίπτωση αναλυτικότερα, ξεκινώντας απ' την ακτινική βλάβη στο DNA. Η αρχική έρευνα επί των ακτινικών βλαβών είχε να επιδείξει την ελάττωση του ιξώδους σε διάλυμα DNA, πράγμα που στη συνέχεια αποδείχθηκε ότι οφειλόταν στη θραύση της αλυσίδας αυτού. Διακρίνουμε δύο κατηγορίες θραύσεως, το μονό σπάσιμο της έλικας (SSB, single strand break) και το διπλό σπάσιμο έλικας (DSB, double strand break).

Παρουσιάζονται, βέβαια, και άλλου είδους ακτινικές βλάβες στο DNA, αλλά η θραύση των αλυσίδων είναι, αναμφισβήτητα, η βασικότερη εξ αυτών, και μάλιστα οι βλάβες του τύπου DSB είναι αυτές που σχετίζονται κατ' εξοχήν με το θάνατο του κυττάρου, καθώς είναι αυτές που δεν υφίστανται επιδιόρθωση τις περισσότερες φορές. Έτσι, το κρίσιμο στοιχείο που καθορίζει τη θανάτωση των κυττάρων, είναι η ακτινική βλάβη στο DNA, αφού οι συνέπειες για το κύτταρο είναι καταστροφικότερες όταν ακτινοβολείται ο κυτταρικός του πυρήνας, παρά το κυτταρόπλασμα του, και με υψηλότερη ακόμα δόση ακτινοβολίας.

Οι κληρονομήσιμες αλλαγές του γενετικού υλικού ονομάζονται μεταλλάξεις. Φυσιολογικά, τα γονίδια αυτοδιπλασιάζονται και τα χρωμοσώματα διαχωρίζονται με μαθηματική ακρίβεια, κατά τη διάρκεια της ζωής ενός κυττάρου, και κατά προέκταση, ενός οργανισμού. Κάτω υπό την επίδραση διαφόρων παραγόντων ωστόσο, όπως χημικών ουσιών ή ακτινοβολίας, που μας ενδιαφέρει και στην προκείμενη περίπτωση, ή και εξαιτίας του παράγοντα τύχη, παρατηρούνται κάποιες μόνιμες αλλαγές του γενετικού υλικού και πρόκληση μεταλλάξεων, οι οποίες ανάλογα με το σημείο που παρουσιάζονται, διακρίνονται σε:

- γονιδιακές μεταλλάξεις
- χρωμοσωμικές ανωμαλίες



Εικόνα 4.1 Διάφορες περιπτώσεις γονιδιακών και χρωμοσωμικών μεταλλάξεων

Οι γονιδιακές μεταλλάξεις προέρχονται από κάποια αλλαγή των βάσεων στο μόριο του DNA. Αυτή η αλλαγή μπορεί να έχει είτε ποιοτικό χαρακτήρα (αντικατάσταση μιας βάσης από άλλη, αφαίρεση ή προσθήκη μιας βάσης) με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η γενετική πληροφορία που περιέχεται στο συγκεκριμένο τμήμα του DNA, είτε ποσοτικό χαρακτήρα, οπότε και αλλάζει ο αριθμός των γονιδίων.

Γενικά, το αποτέλεσμα ενός τέτοιου είδους μετάλλαξης είναι, συνήθως, η δημιουργία ενός υπολειπόμενου αλληλόμορφου γονιδίου, το οποίο μεταφέρεται στους απογόνους, με πιθανή τη περίπτωση, κάποιος από αυτούς να εμφανίσει την τροποποιημένη ιδιότητα. Στην χειρότερη περίπτωση, παρατηρείται κυτταρικός μετασχηματισμός, με το εν λόγω μεταλλαγμένο γονίδιο να ευθύνεται για την καταστολή των φυσιολογικών μηχανισμών ελέγχου του κυτταρικού πολλαπλασιασμού. Οι ακτινοπροκλητές μεταλλάξεις των κυττάρων είναι συχνό φαινόμενο σε χαμηλούς ρυθμούς δόσεων, και συνήθως, μη θανατηφόρες γι' αυτά.

Η τρίτη κατηγορία ακτινοπροκλητών βλαβών είναι οι χρωμοσωμικές αλλοιώσεις. Πρόκειται για ορατές, με κατάλληλο μικροσκόπιο, αλλαγές στην κατασκευή ή τον αριθμό των χρωμοσωμάτων. Ένα μικρό κομμάτι χρωμοσώματος μπορεί να χαθεί (έλλειψη), να διπλασιαστεί στο αρχικό χρωμόσωμα (διπλασιασμός), να μεταφερθεί σ' ένα σημείο ενός άλλου χρωμοσώματος (μετατόπιση) ή να

αναστραφεί πάνω στο ίδιο του το χρωμόσωμα (αναστροφή). Το τελικό αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός ατόμου με τροποποιημένες ιδιότητες.

Όσο αφορά την αλλαγή του αριθμού των χρωμοσωμάτων, αυτή γίνεται είτε στα αυτοσωμικά είτε στα φυλετικά χρωμοσώματα. Οι αλλοιώσεις αυτού του τύπου μπορούν να ταξινομηθούν σε χρωματοσωμικές ή χρωματιδιακές, ανάλογα με τη φάση του κυτταρικού κύκλου, κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η ακτινοβόληση. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα χρωμοσωμικών αλλοιώσεων είναι η ανευπλοειδία (ένα λιγότερο ή περισσότερο χρωμόσωμα απ' τον κανονικό αριθμό), η πολυπλοειδία (διπλασιασμός ή τριπλασιασμός όλων των χρωμοσωμάτων), το φαινόμενο της χιασματυπίας (επιχιασμός), και κάποια σύνδρομα (Turner, Triplo-X, Klinefelter, Down).

ΓΟΝΟΤΥΠΟΣ	ΣΥΝΔΡΟΜΟ	ΦΥΛΟ	ΦΑΙΝΟΤΥΠΟΣ
XO	Turner	♀	Γεννητικά όργανα παιδικής εμφάνισης, μικρό μέγεθος στήθους
XXX	Triplo-X	♀	Ατελής ανάπτυξη δευτερευόντων χαρακτηριστικών φύλου
XXY	Klinefelter	♂	Γυναικομαστία, αζωοσπερμία
Τρισωμία 21	Down	♀, ♂	Διανοητική καθυστέρηση, μογγολοειδές πρόσωπο

Πίνακας 4.1 Συνήθεις χρωμοσωμικές ανωμαλίες του ανθρώπου

Τα κύτταρα εμφανίζουν αρκετή ανοχή στις αλλοιώσεις των χρωμοσωμάτων. Σε ακτινοβολήσεις ατόμων παρατηρήθηκε ότι οι αλλοιώσεις αυτής της μορφής, άλλοτε διατηρούνται καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του, χωρίς παρατηρούμενες επιπτώσεις, και άλλοτε μεταφέρονται με πολλές επόμενες κυτταρικές διαιρέσεις στους απογόνους, ενώ σπανιότερα, οι σοβαρότερες απ' αυτές καταλήγουν σε κυτταρικό θάνατο (δημιουργία κεντροσωμάτων χωρίς κεντρομερίδιο, ακεντρικά θραύσματα, εμφάνιση μικροπυρήνων σε διπλοειδικά κύτταρα, κ.τ.λ.).

Μετά τη προσβολή του DNA από ακτινοβολία, όπως προαναφέρθηκε, ακολουθεί ένα βιολογικό στάδιο, κατά το οποίο διάφοροι φυσιολογικοί μηχανισμοί προσπαθούν να επιδιορθώσουν τις βλάβες που έχει υποστεί. Πιο συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις απλού σπασίματος, η αποκατάσταση είναι πολύ αποδοτική και γίνεται

μέσω του μηχανισμού επανόρθωσης με αποκοπή (excision repair), ενώ στις περιπτώσεις διπλού σπασίματος της έλικας, ο μηχανισμός δεν έχει ερμηνευτεί πλήρως και η αποκατάσταση είναι λιγότερο αποδοτική, πράγμα που δικαιολογεί και το γεγονός ότι τέτοιου είδους βλάβες είναι οι σοβαρότερες και οι καταστροφικότερες· αυτές που οδηγούν συχνά σε κυτταρικό θάνατο. Τέλος, σε περιπτώσεις καταστροφής βάσης, η αποκατάσταση γίνεται με επανόρθωση αποκοπής και είναι εξαιρετικά αποτελεσματική, ενώ σε περιπτώσεις δεσμού αλυσίδων (cross linkage), ο μηχανισμός αποκατάστασης δεν έχει επίσης ερμηνευτεί.

4.5 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΠΙΒΙΩΣΗΣ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

Η μελέτη της απόκρισης των κυττάρων στην ιοντίζουσα ακτινοβολία πραγματοποιείται με την πειραματική κατασκευή των λεγόμενων καμπυλών επιβίωσης των κυττάρων, που δεν είναι τίποτα άλλο παρά οι γραφικές παραστάσεις του κλάσματος επιβίωσης ως συνάρτηση της δόσεως.

Το κλάσμα επιβίωσης παριστά το ποσοστό του κυτταρικού πληθυσμού που επιβιώνει μετά από την ακτινοβολήση αυτού με κάποια δόση ακτινοβολίας ή αλλιώς, παριστά το ποσοστό διατήρησης μιας συγκεκριμένης βιολογικής λειτουργίας σε σχέση με τη δόση.

Υπάρχουν πολλά πρότυπα καμπυλών επιβίωσης, καθένα απ' τα οποία προσεγγίζει και ερμηνεύει τη μορφή των καμπυλών με το δικό του τρόπο. Ενδεικτικά, αναφέρουμε τα πρότυπα της θεωρίας του στόχου, τα πρότυπα επιδιορθώσεως-κορεσμού, το γραμμικό-τετραγωνικό πρότυπο, και το θανατηφόρο-δυναμικά θανατηφόρο.

4.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ

Οι παράγοντες που αυξάνουν ή ελαττώνουν τις βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας, χαρακτηρίζονται ως τροποποιητικοί μηχανισμοί, και διακρίνονται σε φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς.

A. ΦΥΣΙΚΟΙ

- Το είδος της ακτινοβολίας ή καλύτερα, η ευθύγραμμη μετάδοση ενέργειας

Οι ακτινοβολίες με υψηλή LET παρουσιάζουν μεγάλη RBE, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται η LET, μέχρι 100KeV/μm. Απ' το σημείο αυτό και πάνω, η RBE ελαττώνεται, καθώς η εναποτιθέμενη ενέργεια που απαιτείται για τη θανάτωση του κυττάρου είναι υπεραρκετή, κι έτσι μεγάλο ποσοστό της δόσεως δε χρησιμοποιείται.

- Κατάτμηση δόσης

Έχει διαπιστωθεί ότι όταν μια δόση ακτινοβολίας D, χαμηλής LET, χορηγηθεί σε κλάσματα ($D/2+D/2$), με διαφορά χρόνου λίγων ωρών (4-6h), οι βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας είναι ασθενέστερες, λόγω της ικανότητας των κυττάρων να επιδιορθώνουν τις προκληθείσες βλάβες, στο διάστημα που μεσολαβεί έως την επόμενη χορήγηση (κυτταρική ανάνηψη). Το ίδιο συμβαίνει και σε ακτινοβολίες υψηλής LET, καθώς ελαχιστοποιείται η διαφοροποίηση της ακτινοευαισθησίας μεταξύ των κυττάρων (υποξικών ή οξυγονωμένων, ομοιογενών ή ανομοιογενών).

- Ρυθμός δόσης

Η ελάττωση του ρυθμού δόσης αντιστοιχεί σε μείωση του βαθμού ακτινοευαισθησίας των κυττάρων. Γενικά, λοιπόν, χαμηλός ρυθμός δόσης σημαίνει και χαμηλή δραστηριότητα από μέρους των κυττάρων.

- Θερμοκρασία

Αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος συνεπάγεται με αύξηση των μεταβολικών δραστηριοτήτων, και άρα και της ακτινοευαισθησίας αυτού.

B. ΧΗΜΙΚΟΙ

- Τάση οξυγόνου στους ιστούς

Η απόκριση των κυττάρων στην ακτινοβολία εξαρτάται σημαντικά από το βαθμό οξυγόνωσής τους. Έχει, λοιπόν, διαπιστωθεί ότι η έντονη παρουσία O_2 (μεγάλη τάση O_2) στον ακτινοβολούμενο πληθυσμό κυττάρων, αυξάνει την ακτινοευαισθησία του, κατά έναν παράγοντα που μπορεί να ξεπερνά το 2 (oxygen effect).

- Χημειοευαισθητοποίηση και Χημειοπροφύλαξη

Έχει παρατηρηθεί ότι η παρουσία ορισμένων χημικών ουσιών είναι ικανή να συμβάλλει στην αύξηση ή την μείωση της ακτινοευαισθησίας.

Γ. ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ

- Το είδος του κυττάρου

Είναι αξιοσημείωτο ότι τα κύτταρα ενδογενώς παρουσιάζουν διαφορά στην ακτινοευαισθησία τους, η οποία είναι ανάλογη της μεταβολικής τους δραστηριότητας. Σε επίπεδο ιστών, τώρα, η ακτινοευαισθησία είναι ανάλογη του ρυθμού πολλαπλασιασμού των κυττάρων, και άρα του ρυθμού ανάπτυξης του ίδιου του ιστού, αλλά αντιστρόφως ανάλογη της διαφοροποίησης των κυττάρων, με κάποιες εξαιρέσεις (π.χ. λεμφοκύτταρα και ωκύτταρα, που παρά τη διαφοροποίησή τους, είναι ιδιαίτερα ακτινοευαίσθητα).

- Η φάση του κυτταρικού κύκλου

Η διαδικασία της διαίρεσης του κυττάρου περιλαμβάνει μια σειρά από αλληλένδετα γεγονότα, που εκτυλίσσονται εντός του κυττάρου, και χωρίζονται στο στάδιο της μίτωσης Μ που διαρκεί περίπου 2h, και στο στάδιο της μεσόφασης. Η μεσόφαση είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από το τέλος κάθε κυτταρικής διαίρεσης έως την έναρξη της επόμενης (κυτταρικός κύκλος), καταλαμβάνει χρονικά το μεγαλύτερο μέρος της ζωής του κυττάρου (90-95%), έχει διάρκεια περίπου 24-28h ανά φορά, και υποδιαιρείται στις φάσεις G₁, S και G₂.

Η ακτινοευαισθησία των κυττάρων παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές στις διάφορες φάσεις του κυτταρικού κύκλου, και μάλιστα επικρατούν ισχυρές ενδείξεις, παρά τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των κυττάρων που μελετήθηκαν, ότι κατά τη φάση S, τα κύτταρα εμφανίζονται πιο ανθεκτικά, πράγμα που ίσως σχετίζεται με τη σύνθεση του DNA που πραγματοποιείται στο στάδιο αυτό. Αντίθετα, στις φάσεις G₂ και Μ, τα κύτταρα εμφανίζονται πιο ευαίσθητα, γεγονός που οφείλεται μάλλον στη μικρή διάρκεια τους, που δεν επιτρέπει την πλήρη δράση των επιδιορθωτικών μηχανισμών.

- Το φύλο

Παλαιότερα, υπερίσχυε η άποψη ότι τα άρρενα θηλαστικά (συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου) είναι πιο ευαίσθητα στην ακτινοβολία. Σήμερα, το φύλο φαίνεται ότι έχει μικρότερη σημασία από αυτή που του αποδιδόταν παλαιότερα, καθώς θεωρείται ότι τα αποτελέσματα από την ακτινοβολήση είναι τα ίδια και για τα δύο φύλα.

- Ενδοκρινικοί και μεταβολικοί παράγοντες

Το αποτέλεσμα της ακτινοβολίας εξαρτάται σε κάποιο βαθμό και από τη δράση των ορμονών. Π.χ. στα ζώα, η χειμερία νάρκη μειώνει τις βιολογικές επιδράσεις, ενώ στον άνθρωπο, στη πρόκληση κακοήθειας του μαστού δρουν σημαντικά κάποιες ορμόνες, όπως η προλακτίνη και τα οιστρογόνα.

- Ηλικία

Τα άτομα πολύ νεαρής ηλικίας, όπως και τα πολύ ηλικιωμένα άτομα, εμφανίζονται πιο ευαίσθητα στην ακτινοβολία.

- Το μέγεθος και η περιοχή του σώματος που ακτινοβολείται

Η ολόσωμη έκθεση, όπως είναι προφανές, προκαλεί μεγαλύτερο αποτέλεσμα από την ακτινοβολήση τμήματος του σώματος, καθώς ακτινοβολείται μεγαλύτερος αριθμός κυττάρων. Σημαντικός παράγοντας είναι και η ακτινοβλούμενη περιοχή. Χαρακτηριστικά, αναφέρεται ότι τα άκρα εμφανίζονται πιο ακτινοάντοχα έναντι της περιοχής που περιλαμβάνει τις ωθήκες.

- Η ύπαρξη ορισμένων κληρονομικών συνδρόμων οδηγούν σε αυξημένη ακτινοευαισθησία (όπως π.χ. η τηλαγγειεκτασική αταξία).

- Άλλοι βιολογικοί παράγοντες

Η ώρα της ακτινοβολήσης (πρωί / βράδυ), το περιβάλλον, οι διατροφικές συνήθειες, η γενική κατάσταση του οργανισμού, οι λοιμώξεις, η λήψη αντιβιοτικών, και κάποιες συνήθειες, όπως η δίαιτα και το κάπνισμα, μεταβάλλουν κατά ένα ποσοστό το αποτέλεσμα.

4.7 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ

Η ακτινοβολία δύναται να επιφέρει βλάβη στα κύτταρα των ιστών και των οργάνων, η οποία αν δεν επιδιορθωθεί επαρκώς, έχει ως αποτέλεσμα να χάνουν τη δυνατότητα αναπαραγωγής τους (αναπαραγωγικός θάνατος), να επιβιώνουν τροποποιημένα ή στην χειρότερη περίπτωση, να καταλήγουν σε θάνατο. Τα αποτελέσματα αυτά προκαλούν, ασφαλώς, διαφορετικές συνέπειες ως σύνολο, αναφερόμενο επί του οργανισμού.

Ο μεγαλύτερος αριθμός των ιστών και των οργάνων εξακολουθεί να λειτουργεί φυσιολογικά, ακόμη και με σημαντική απώλεια αριθμού κυττάρων. Αυτό, όμως, ισχύει μέχρι ενός σημείου, καθώς σε περιπτώσεις αυξημένου ποσοστού

φονευμένων κυττάρων, παρατηρούνται βλάβες οφειλόμενες στην απώλεια της φυσιολογικής λειτουργίας του ακτινοβοληθέντος ιστού. Η πιθανότητα εμφάνισης βλαβών αυτής της μορφής είναι σχεδόν μηδενική για μικρή τιμή δόσης. Όταν, όμως, η τιμή δόσης υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, τη δόση κατώφλιου ή δόση ουδού, τότε η επίδραση της ακτινοβολίας γίνεται αισθητή, και μάλιστα η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου, η σοβαρότητα και η ένταση αυτού αυξάνονται όσο αυξάνεται και το επίπεδο της δόσης. Οι βιολογικές επιδράσεις αυτού του τύπου ονομάζονται καθορισμένες, ντετερμινιστικές ή μη στοχαστικές. Παραδείγματα τέτοιων επιδράσεων είναι η εμφάνιση καταρράκτη, το ερύθημα, οι διαταραχές στη γονιμότητα και άλλες πολλές που θα αναφέρουμε σε επόμενη παράγραφο.

Στην περίπτωση που η ακτινοβολία έχει οδηγήσει σε βιώσιμα αλλά τροποποιημένα σωματικά κύτταρα, τότε οι κλώνοι τους, παρά τους αποτελεσματικούς αμυντικούς μηχανισμούς που υπάρχουν, σε κάποιο χρονικό διάστημα (λανθάνουσα περίοδο) μπορεί να εμφανίσουν κάποιες βιολογικές επιδράσεις. Οι επιδράσεις αυτής της μορφής καλούνται στοχαστικές, είναι δηλαδή αποτελέσματα τυχαίας ή στατιστικής φύσεως, και περιγράφονται με όρους πιθανοτήτων. Έχουν συγκεκριμένη πιθανότητα εμφάνισης, ανάλογη της δόσης. Είναι δυνατό να εμφανιστούν όσο μικρή και αν είναι η δόση, συνεπώς δεν υπάρχει κατώφλι δόσης (δηλαδή δεν υπάρχει τιμή δόσης, κάτω απ' την οποία να μηδενίζεται η εμφάνισή τους), ενώ η σοβαρότητα της βλάβης δεν έχει να κάνει με το μέγεθος της δόσης. Στην κατηγορία αυτή υπάγεται η εμφάνιση διαφόρων μορφών καρκίνου και η εμφάνιση γενετικών επιδράσεων.

Όσο αφορά τις τελευταίες, θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι εάν η βλάβη αφορά γενετικά κύτταρα, μέσω των οποίων μεταφέρονται γενετικές πληροφορίες σε επόμενες γενιές, τα αποτελέσματα, που μπορεί να' ναι διαφόρων ειδών και βαρύτητας (γενετικές επιδράσεις), ονομάζονται κληρονομικά, αλλά είναι επίσης στοχαστικά ως προς τη φύση τους.

Η παραπάνω διάκριση των βιολογικών επιδράσεων είναι η σημαντικότερη από σκοπιά ακτινοπροστασίας. Οφείλουμε, όμως, να αναφέρουμε και άλλον έναν διαχωρισμό των φαινομένων σε:

- πρώιμα, τα οποία λαμβάνουν χώρα μέσα στις πρώτες εβδομάδες και μήνες μετά την ακτινοβολία. Π.χ. λύση συνεχείας δέρματος, απόπτωση επιθηλιακών κυττάρων λεπτού εντέρου, βλάβες στο αιμοποιητικό σύστημα.

- απώτερα ή καθυστερημένα, τα οποία λαμβάνουν χώρα σε μεταγενέστερο χρονικό διάστημα (3 μήνες έως έτη) απ' τη στιγμή της ακτινοβολήσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα: ίνωση, ενδεχόμενη βλάβη νωτιαίου μυελού σπονδυλικής στήλης, βλάβες αγγείων, καρκινογένεση.

4.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η μορφή των καμπυλών επιβίωσης για τα κύτταρα καθορίζεται από το αποτέλεσμα πειραματικών δεδομένων, που συγκεντρώνονται από καλλιέργειες κυττάρων. Κάθε κύτταρο δρα ανεξάρτητα από τα γειτονικά του, ενώ έχει επαληθευτεί ότι ο βαθμός δυσκολίας στην αναγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων αυξάνεται, όσο αυξάνει και η πολυπλοκότητα του βιολογικού συστήματος, που μελετάται. Χαρακτηριστικό είναι ότι όσο πιο πολύπλοκο είναι ένα βιολογικό σύστημα τόσο πιο ευαίσθητο εμφανίζεται ως προς την ακτινοβολία. Για τον καθορισμό της ακτινοευαισθησίας των βιολογικών συστημάτων χρησιμοποιείται η παράμετρος LD₅₀ (lethal dose 50%), η οποία έχει τις τιμές που καταγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί, για κάθε κατηγορία συστήματος.

	LD ₅₀ (rad)
Άνθρωπος	500
Θηλαστικά	400 – 800
Έντομα	80000
Ιοί, Βακτήρια	300000

Πίνακας 4.2 Τιμές LD₅₀ για διάφορα βιολογικά συστήματα

Αναμφισβήτητα, αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο είναι ο καθορισμός των επιδράσεων της ακτινοβολίας στο ανθρώπινο είδος, γι' αυτό και στη συνέχεια του κεφαλαίου θα αναφερθούμε αποκλειστικά στο συγκεκριμένο θέμα.

4.9 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΙΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

Η διατήρηση του μεγέθους και της λειτουργικότητας των υγιών ιστών εξαρτάται από την ύπαρξη ενός μικρού αριθμού κυττάρων, των αρχηγόνων ή ριζικών (stem cells) όπως ονομάζονται, τα οποία έχουν την ιδιότητα να διατηρούν τον αριθμό τους και, ταυτόχρονα, να παράγουν νέα κύτταρα, που διαφοροποιούνται κατάλληλα και πολλαπλασιάζονται ώστε να αναπληρούν το πληθυσμό των κυττάρων του ιστού.

Σε φυσιολογικές συνθήκες, οι ιστοί βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των απωλειών και της αντικατάστασης των κυττάρων τους. Γενικά, οι ιστοί ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το βαθμό οργάνωσής τους:

- στους ιστούς τύπου H (Hierarchical), που παρουσιάζει μια ιεραρχημένη οργάνωση από συνεχόμενα διαμερίσματα κυττάρων και χαρακτηρίζεται από ταχύ ρυθμό ανανέωσης του πληθυσμού των κυττάρων, δηλαδή από υψηλό μιτωτικό δείκτη
- στους ιστούς τύπου F (Flexible), στους οποίους η ιεραρχία μεταξύ των κυττάρων δεν είναι σημαντικά καθορισμένη, και ταυτόχρονα χαρακτηρίζονται από χαμηλό ρυθμό ανανέωσης, και άρα χαμηλό μιτωτικό δείκτη.

Έχει διαπιστωθεί ότι η ακτινοευαισθησία ενός πληθυσμού κυττάρων εξαρτάται σημαντικά από την αναπαραγωγική τους δραστηριότητα, γεγονός που καθορίζεται από το μιτωτικό δείκτη MI (mitotic index). Ιστοί και όργανα με αναπτυσσόμενα κύτταρα εμφανίζονται σχετικά πιο ακτινοευαίσθητα. Οι πίνακες που ακολουθούν είναι ενδεικτικοί των όσων ισχύουν στην πραγματικότητα.

ΜΙΤΩΤΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ		
ΜΗΔΕΝ	ΧΑΜΗΛΟΣ	ΥΨΗΛΟΣ
Κύτταρα ΚΝΣ Ωοκύτταρα Μυελός επινεφριδίων	Ήπαρ Νεφροί Πνεύμονες Φλοιός επινεφριδίων Χόνδροι Οστά Ενδοθήλια αγγείων Πάγκρεας Σιελογόνοι αδένες Προστάτης Θυρεοειδής	Δέρμα Αιμοποιητικό σύστημα οργάνων Όρχεις Ενδοθήλια πεπτικού, αναπνευστικού και ουροποιητικού συστήματος Βλεννογόνο

Πίνακας 4.3 Χαρακτηρισμός μιτωτικού δείκτη για ορισμένα όργανα και ιστούς

ΑΚΤΙΝΟΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΝ	
Ιστός ή Όργανο	Ακτινοευαισθησία
Δέρμα, επιθήλιο γαστρεντερικού και ουροποιητικού συστήματος, λεμφοποιητικά όργανα, μυελός των οστών, φακός οφθαλμού	Πολύ υψηλή
Αναπτυσσόμενοι χόνδροι και οστά, μικρά αγγεία	Υψηλή
Ωριμοί χόνδροι και οστά, σιελογόνοι αδένες, νεφροί, πνεύμονες, πάγκρεας, θυρεοειδής, υπόφυση, επινεφρίδια	Μέτρια
Μύες, εγκέφαλος, νωτιαίος μυελός	Χαμηλή

Πίνακας 4.4 Χαρακτηρισμός ακτινοευαισθησίας για ορισμένα όργανα και ιστούς

4.10 ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

4.10.1 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Η ακτινοπροστασία αποτελεί νόμο του κράτους και αποσκοπεί στην προστασία των ανθρώπων, των αγαθών και του περιβάλλοντος απ' τις επιβλαβείς επιδράσεις των ιοντιζουσών ακτινοβολιών, που προέρχονται από την ειρηνική χρήση τους.

Πεδίο εφαρμογής των κανονισμών ακτινοπροστασίας είναι η παραγωγή, η εισαγωγή, η επεξεργασία, η χρησιμοποίηση, η κατοχή, η αποθήκευση, η μεταφορά, η απόρριψη ραδιενεργών ουσιών, φυσικών και τεχνητών, όπως και η χρήση μηχανημάτων παραγωγής ιοντίζουσας ακτινοβολίας, καθώς και οποιαδήποτε άλλη δραστηριότητα που εγκυμονεί κίνδυνο, προερχόμενο από τη συγκεκριμένη αιτία.

Ειδικότερα, πρωταρχικός σκοπός της ακτινοπροστασίας κατά τη χρήση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών, εφόσον αυτή επιβάλλεται, είναι να συμβάλλει στον αποκλεισμό της εμφάνισης των καθορισμένων αποτελεσμάτων, και να περιορίζει τα στοχαστικά σε επίπεδα που καθορίζονται ως αποδεκτά.

4.10.2 ΑΡΧΕΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Οι βασικές αρχές ακτινοπροστασίας διατυπώθηκαν από την ICRP και εφαρμόζονται κατά τη χρήση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών, προκειμένου να περιορίζονται οι ατομικές και συλλογικές δόσεις.

- *Αρχή Αιτιολόγησης:* Δεν επιτρέπεται καμία δραστηριότητα με ιοντίζουσα ακτινοβολία, εκτός αν η επιδιωκόμενη ωφέλεια είναι μεγαλύτερη από το πιθανό δυσμενές βιολογικό αποτέλεσμα

- *Αρχή Βελτιστοποίησης* (γνωστή και ως ALARA: As Low As Reasonably Achievable): Κάθε έκθεση, περιλαμβανομένων και των ιατρικών, πρέπει να διατηρείται στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους κοινωνικο-οικονομικούς παράγοντες που επικρατούν

- *Αρχή Ορίων Δόσεων:* Δεν επιτρέπεται υπέρβαση των ορίων δόσεων που καθορίζει ο κανονισμός ακτινοπροστασίας. Η αρχή αυτή δεν περιλαμβάνει τις ιατρικές εφαρμογές για τους ασθενείς

Τα όρια επιτρεπτών δόσεων αποφασίζονται από Διεθνείς και Ευρωπαϊκούς οργανισμούς, με τη λογική να τίθενται στην περιοχή μεταξύ αποδεκτού και ανεκτού κινδύνου. Σύμφωνα με τις τρέχουσες τιμές, στις οποίες κατέληξε η ICRP, η επιτρεπτή ενεργός δόση ανά έτος ορίζεται για τους επαγγελματικά εκτιθέμενους στα 20mSv, και για το γενικό πληθυσμό στο 1mSv. Βέβαια, προβλέπονται και επιμέρους όρια για ειδικές ομάδες ατόμων, όπως είναι οι επαγγελματικά εκτιθέμενες γυναίκες σε κατάσταση εγκυμοσύνης (2mSv) και η άκρως ακτινοευαίσθητη κατηγορία του πληθυσμού, τα παιδιά. Είναι, τέλος, χαρακτηριστικό ότι τα τελευταία χρόνια, τα όρια των δόσεων μειώνονται διαρκώς.

4.10.3 ΜΕΤΡΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Είναι χαρακτηριστικό ότι, στις μέρες μας, διπλασιάστηκε η μέση δόση ακτινοβολίας που δέχεται ο άνθρωπος. Ο άνθρωπος ανέκαθεν υφίσταται ακτινοβολία από το περιβάλλον, εξαιτίας της φυσικής ακτινοβολίας, κοσμικής και γήινης, που προέρχεται από το διάστημα και την ίδια τη γη αντίστοιχα.

Αυτό που ευθύνεται, λοιπόν, για την συγκεκριμένη εξέλιξη, σχετίζεται κυρίως με την τεχνητή ακτινοβολία. Η χρήση των τεχνητών πηγών ακτινοβολίας είναι εξαιρετικά χρήσιμη, ειδικά αν αναλογιστούμε τα οφέλη που αποκομίζουμε από την ιατρική εφαρμογή τους (στην ακτινοδιαγνωστική, στην πυρηνική ιατρική και στην ακτινοθεραπεία). Ωστόσο, άλλαξε, και μάλιστα αυξήθηκε ο ρυθμός δόσης, με την έννοια ότι ο άνθρωπος υποβάλλεται σε έκθεση ακτινοβολίας πολύ συχνότερα απ' ό τι στο παρελθόν, για ιατρικούς σκοπούς. Και συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος της κατασκευής, της δοκιμής και της χρήσης πυρηνικών όπλων, όπως και της σημείωσης διαρροών και πυρηνικών ατυχημάτων, αντιλαμβανόμαστε τους λόγους που οδήγησαν στην αύξηση του βαθμού ακτινοβολίας του πληθυσμού.

Με βάση τα παραπάνω, κρίνεται ολοένα και πιο απαραίτητη η λήψη μέτρων ελέγχου και προστασίας από τις ακτινοβολίες, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η

έκθεση του ανθρώπου, δεδομένου ότι καμία έκθεση σε ακτινοβολία, όσο μικρή κι αν είναι, δεν πρέπει να θεωρείται ακίνδυνη.

Έτσι, αρχικά, για την καλύτερη οργάνωση και έλεγχο των μέτρων ακτινοπροστασίας, γίνεται ταξινόμηση των περιοχών εργασίας στις οποίες υπάρχουν πηγές ιοντιζουσών ακτινοβολιών, σε ελεγχόμενες, επιβλεπόμενες και περιοχές χωρίς ειδική πρόβλεψη.

Σημαντικότερα είναι και τα μέτρα που στηρίζονται στην εκμετάλλευση των παραμέτρων χρόνου, απόστασης και θωράκισης. Πιο συγκεκριμένα:

- Χρόνος έκθεσης

Η απορροφούμενη δόση είναι ανάλογη του χρόνου έκθεσης. Έτσι, ο ρυθμός και ο χρόνος ακτινοβολήσης θα πρέπει να διατηρούνται στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα

- Απόσταση

Η απορροφούμενη δόση είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. Όσο, λοιπόν, απομακρυνόμαστε από την πηγή τόσο ελαττώνεται η ένταση της ακτινοβολίας.

- Θωράκιση

Η χρησιμοποίηση κατάλληλης θωράκισης οδηγεί σε εξασθένιση της ακτινοβολίας, καθώς η ένταση της μειώνεται εκθετικά με το πάχος προστατευτικού πετάσματος.

- Αποφυγή εισαγωγής ραδιενεργών ουσιών στον οργανισμό

Τέλος, οφείλουμε να αναφέρουμε και την πιθανότητα εσωτερικής ακτινοβολήσης. Σ' αυτήν την περίπτωση, το μοναδικό μέτρο προστασίας είναι η πρόληψη. Η απορροφούμενη δόση από εσωτερικές πηγές είναι μεγάλη, ακόμα και αν η ενεργότητα αυτών των πηγών είναι μικρή. Έτσι, πρέπει να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα εισόδου ραδιοϊσοτόπων στον οργανισμό μέσω της τροφής, του νερού, της αναπνοής.

ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αναμφισβήτητα, η επίδραση της ακτινοβολίας έχει σοβαρές επιπτώσεις στη ζώσα βιολογική ύλη, και κυρίως στον άνθρωπο. Η χρήση των ακτίνων Χ έχει εισέλθει έντονα στη ζωή του σύγχρονου ανθρώπου, ιδίως μέσα από το χώρο της ιατρικής. Δεν είναι τυχαίο ότι η Διαγνωστική και Θεραπευτική Ακτινολογία αποτελούν σήμερα τη μεγαλύτερη πηγή έκθεσης του μέσου πληθυσμού σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Κάτι τέτοιο, βέβαια, δικαιολογείται και είναι αποδεκτό, αν το όφελος υπερσχέει των κινδύνων που συνοδεύουν κάθε είδος έκθεσης σε ακτινοβολία, και αν κάθε φορά λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα, σύμφωνα με τις βασικές αρχές της Ακτινοπροστασίας.

Οι σκοποί της συγκεκριμένης μελέτης, ήταν:

- Ο έλεγχος της πιθανής επίδρασης της κατεύθυνσης της δέσμης ακτινοβολίας στη τιμή του συντελεστή ευαισθησίας (ή βαθμονόμησης) των TLD100 και TLD200.
- Ο υπολογισμός του εύρους και της μέσης τιμής της ληφθείσας δόσης, σε νεογνά, τα οποία υποβλήθηκαν σε εξέταση οισοφαγογραφήματος, όπως και η εκτίμηση του συνεπαγόμενου κινδύνου για εμφάνιση καρκινογένεσης σ' αυτά, καθώς και η μέτρηση της δόσης, λόγω σκέδασης, στους συνοδούς των νεογνών που παραβρίσκονταν στο χώρο της εξέτασης (στο χέρι και στο θώρακα).
- Η εκτίμηση του εύρους και της μέσης τιμής της ληφθείσας δόσης, σε μικρά παιδιά και νεογνά -κατά πλειοψηφία νεογνά-, τα οποία υποβλήθηκαν σε εξέταση κυστεογραφίας, όπως και η εκτίμηση του συνεπαγόμενου κινδύνου για εμφάνιση καρκινογένεσης.

Η γνώση της τιμής της απορροφούμενης δόσης κάθε εξέτασης είναι ουσιαστική και σημαντική, εφόσον αποτελεί ποσότητα άμεσα συνδεδεμένη με τα στοχαστικά αποτελέσματα της ακτινοβολίας, και απαιτείται τόσο για την αιτιολόγηση όσο και για τη βελτιστοποίηση των συγκεκριμένων εξετάσεων, πόσο μάλλον όταν αυτές αφορούν νεογνά και μικρά παιδιά. Κι αυτό διότι, άτομα αυτής της ηλικίας ανήκουν στη κατηγορία του πληθυσμού, που χαρακτηρίζεται από αυξημένη ακτινοευαισθησία έναντι των υπολοίπων ομάδων.

Πιο συγκεκριμένα, τα νεογνά και τα παιδιά αποτελούν μόλις ένα μικρό ποσοστό (γύρω στο 10%) των ατόμων του συνολικού πληθυσμού, που υποβάλλεται σε ακτινοδιαγνωστικές εξετάσεις. Όμως, εκτίθενται σε υψηλότερο κίνδυνο, καθώς

επαγόμενοι κίνδυνοι, λόγω έκθεσης, είναι περίπου 3 έως 4 φορές μεγαλύτεροι σε σχέση με αντίστοιχη έκθεση ατόμων ηλικίας μεταξύ 30 και 40 ετών, και 5 έως 7 φορές μεγαλύτεροι σε σχέση με αντίστοιχη έκθεση ατόμων ηλικίας άνω των 50 ετών.

Η αυξημένη ακτινοευαισθησία των παιδιών, οφείλεται στους παρακάτω λόγους:

- Οι ιστοί των παιδιών είναι πολύ πιο ευαίσθητοι και ευάλωτοι στην ακτινοβολία, έναντι των ιστών των ενηλίκων, καθώς βρίσκονται σε φάση ανάπτυξης και χαρακτηρίζονται από την αυξημένη μιτωτική δραστηριότητα των κυττάρων τους
- Ο σκελετός τους περιέχει σε πολύ μεγαλύτερη κατανομή απ' ότι στους ενήλικες, μυελό των οστών, μια ουσία που χαρακτηρίζεται άκρως ακτινοευαίσθητη
- Λόγω ηλικίας, η πιθανότητα να εκτεθούν ξανά σε ακτινοβολία είναι μεγάλη, πράγμα που συνεπάγεται με λήψη μεγαλύτερης συνολικής δόσης
- Το χρονικό διάστημα για εκδήλωση τυχόν καθυστερημένων αποτελεσμάτων της ακτινοβολίας (στοχαστικά αποτελέσματα) είναι πολύ μεγαλύτερο απ' ότι στους ενήλικες
- Λόγω κατασκευής και μεγέθους του σώματος, το ανατομικό μέρος των παιδιών, που εκτίθεται στο πεδίο ακτινοβολίας, περιλαμβάνει περισσότερα όργανα απ' το αντίστοιχο των ενηλίκων, και ταυτόχρονα, η απόσταση μεταξύ του σώματός τους και του σημείου εισόδου της ακτινοβολίας είναι πολύ μικρότερη
- Λόγω ηλικίας, τέλος, υπάρχει έλλειψη συνεργασίας στη διάρκεια της εξέτασης, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να αυξηθεί ο χρόνος έκθεσής τους στην ακτινοβολία, έως ότου υπάρξει η επιθυμητή απεικόνιση

Όλα τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τις επιπλέον τεχνικές δυσκολίες που υπεισέρχονται κατά την εξέταση ατόμων τέτοιας ηλικίας, μας υποχρεώνει σε αυστηρότερη και εντατικότερη εφαρμογή κανόνων ακτινοπροστασίας και ελαχιστοποίησης δόσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης, όπως ήδη αναφέρθηκε στην εισαγωγή του πειραματικού μέρους, είναι ο υπολογισμός της δόσης, την οποία λαμβάνουν παιδιά και ιδιαίτερα νεογνά, όταν υποβάλλονται στις ακτινοδιαγνωστικές εξετάσεις του οισοφαγογραφήματος και της κυστεογραφίας, όπως επίσης και η διαπίστωση της εξάρτησης ή μη του συντελεστή ευαισθησίας των TLD100 και TLD200 από την γωνία της ακτινοβολίας, και επομένως από την κατεύθυνση της ακτινοβολίας.

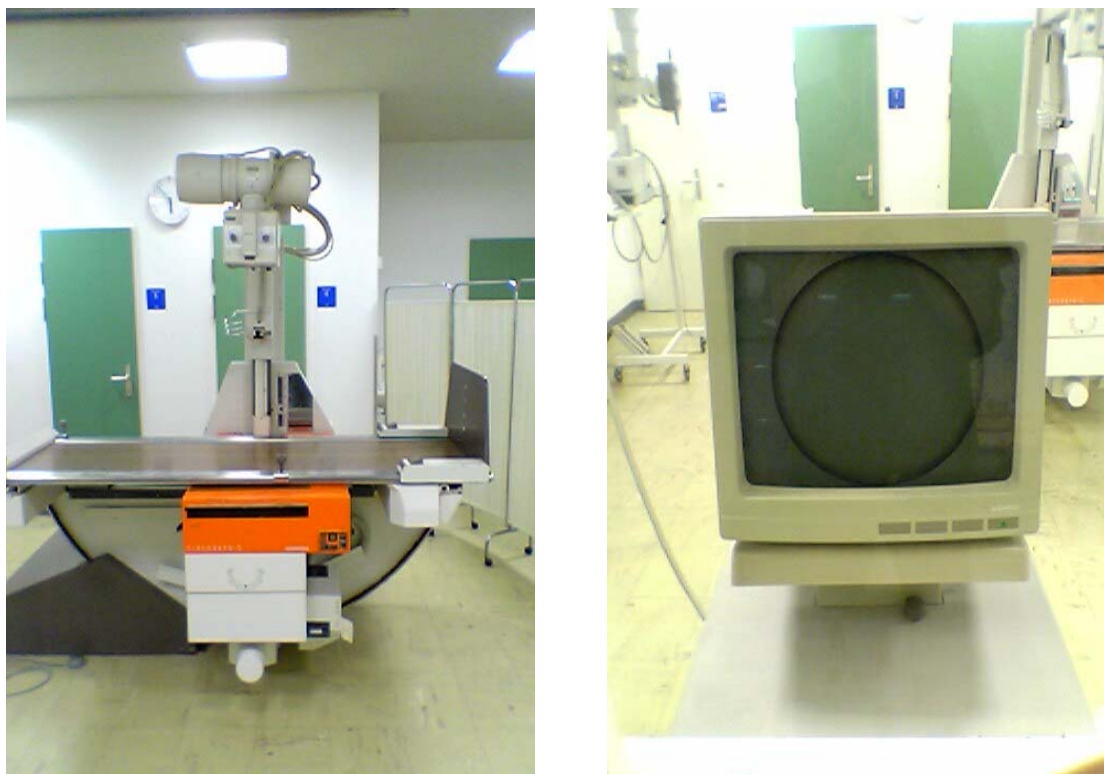
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, περιγράφεται η φιλοσοφία των εν λόγω εξετάσεων, οι μέθοδοι και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθ' όλη τη διάρκεια της συλλογής και επεξεργασίας των μετρήσεων και των υπόλοιπων πειραματικών δεδομένων.

5.1 ΑΚΤΙΝΟΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ

Όλη η διαδικασία συλλογής πειραματικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια ιατρικής απεικόνισης, και πιο συγκεκριμένα στις 3 μονάδες γενικής ακτινοδιαγνωστικής των εγκαταστάσεων του Περιφερειακού Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Ηρακλείου (ΠΕ.ΠΑ.ΓΝΗ).

Πιο συγκεκριμένα, οι εξετάσεις οισοφαγογραφήματος έγιναν με τη βοήθεια ενός τηλεχειριζόμενου ακτινοσκοπικού μηχανήματος (Siregraph C, Siemens, Enlargen, Germany) με γεννήτρια ακτίνων X (Pollydoros 80, Siemens, Enlargen, Germany). Το μηχάνημα διαθέτει λυχνία ακτίνων X, η οποία είναι συναρμολογημένη πάνω από το τραπέζι, ενώ κάτω από αυτό υπάρχει μια ελεγχόμενη συσκευή φιλμ, μέσω πλήκτρων, η οποία μαζί με έναν ενισχυτή εικόνας συνδέεται με την οθόνη. Πρόκειται για ακτινοσκοπικό μηχάνημα συμβατικής τεχνολογίας, το οποίο έχει τη δυνατότητα λήψης ακτινογραφιών με στοιχεία που επιλέγει ο τεχνολόγος ή ο γιατρός ακτινολόγος. Αντίθετα, το σύστημα ακτινοσκόπησης είναι αυτόματο. Στο πίνακα ελέγχου του μηχανήματος (κονσόλα) απεικονίζονται κάθε φορά τα στοιχεία της ακτινοσκόπησης, αλλά και της λήψης ακτινογραφιών (kV, mAs, χρόνος διάρκειας). Η

απόσταση λυχνίας-κρεβατιού διατηρήθηκε σταθερή στα 1.15m, ενώ το συνολικό φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις εξετάσεις ήταν ίσο με 3.5 mmAl.



**Εικόνα 5.1 Ακτινοσκοπικό μηχάνημα Pollydoros 80, Siemens
(Αριστερά: Ακτινοσκοπικό Κρεβάτι, Δεξιά: Οθόνη)**

Οι εξετάσεις κυστεογραφίας πραγματοποιήθηκαν σε διπλανή αίθουσα του τακτικού ακτινολογικού, αίθουσα προορισμένη κατ' εξοχήν για ακτινοδιαγνωστικές εξετάσεις ουροποιητικού συστήματος. Το ακτινοσκοπικό μηχάνημα είναι και αυτό συμβατικής τεχνολογίας, όπως και αυτό της αίθουσας για πραγματοποίηση ακτινοδιαγνωστικών εξετάσεων πεπτικού συστήματος, που αναφέρθηκε στην παραπάνω παράγραφο, και παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά με αυτό. Πρόκειται για το ακτινοσκοπικό μηχάνημα (Siregraph C, Siemens, Enlengen, Germany) με γεννήτρια ακτίνων X (Pollydoros 50, Siemens, Enlengen, Germany).



**Εικόνα 5.2 Ακτινοσκοπικό μηχάνημα Pollydoras 50, Siemens
(Αριστερά: Ακτινοσκοπικό Κρεβάτι, Δεξιά: Λυχνία)**



Εικόνα 5.3 Κονσόλα Ακτινοσκοπικού μηχανήματος Pollydoras 50, Siemens

Και στα δύο είδη εξετάσεων χρησιμοποιήθηκαν ακτινογραφικά φιλμ των εταιρειών Kodak και Agfa.

Τέλος, το σύνολο των βαθμονομήσεων των TLD100 και TLD200 για έλεγχο της ενδεχομένης επιρροής της κατεύθυνσης της ακτινοβολίας στο συντελεστή ευαισθησίας των παραπάνω ομάδων, πραγματοποιήθηκε στην 3η αίθουσα του τακτικού ακτινολογικού τμήματος, όπου είναι εγκατεστημένο το ακτινολογικό μηχάνημα Siemens Multix Up, στο οποίο δεν υπάρχει δυνατότητα ακτινοσκόπησης, παρά μόνο ακτινογραφιών, οι οποίες λαμβάνονται έπειτα από τη χειροκίνητη επιλογή στοιχείων από μέρος των τεχνολόγων στον πίνακα ελέγχου του μηχανήματος (mAs, kV, μέγεθος εστίας, χρόνος ακτινοβολήσης).



**Εικόνα 5.4 Ακτινολογικό μηχάνημα Siemens Multix Up.
Αριστερά: Ακτινογραφικό Κρεβάτι, Δεξιά: Κονσόλα**

5.2 ΔΟΣΙΜΕΤΡΑ, ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΥΤΩΝ

5.2.1 ΔΟΣΙΜΕΤΡΑ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ (TLDs)

Για τον υπολογισμό της δόσης χρησιμοποιήθηκαν δοσίμετρα θερμοφωταύγειας, τύπου TLD100 και TLD200, της εταιρείας Harshaw, τα οποία είναι τα πιο διαδεδομένα δοσίμετρα, ιδιαίτερα στο χώρο της ιατρικής, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο 3^ο κεφάλαιο.



Εικόνα 5.5 TLDs

Πιο συγκεκριμένα, τα TLD100 (LiF:Mg:Tl) χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση πρωτογενούς ακτινοβολίας, και μάλιστα για τον προσδιορισμό της δόσεως σε νεογνά και παιδιά, κατά την υποβολή τους σε εξετάσεις κυστεογραφίας και οισοφαγογραφήματος.

Αντίστοιχα, τα TLD200 ($\text{CaF}_2\text{:Dy}$) χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση δευτερογενούς ακτινοβολίας, προερχόμενης από σκέδαση, και πιο συγκεκριμένα για τον υπολογισμό της δόσεως που έλαβαν οι συνοδοί των παιδιών, που υποβλήθηκαν σε εξέταση οισοφαγογραφήματος. Κι αυτό διότι, τα TLD200 παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ευαισθησία, και είναι έτσι κατάλληλα για την καταγραφή πολύ μικρής δόσης.

Τέλος, στο πειραματικό μέρος που αφορά την εξακρίβωση της επίδρασης ή μη της κατεύθυνσης της ακτινοβολίας στον συντελεστή ευαισθησίας των TLDs, χρησιμοποιήθηκαν και TLD100 και TLD200.

Όλα τα TLDs που χρησιμοποιήθηκαν στις παραπάνω εφαρμογές, ήταν σε μορφή πλακιδίου (chip), διαστάσεων $3,2 * 3,2 * 0,9$ mm. Οι δύο τύποι TLDs, και τα

χαρακτηριστικά αυτών αναφέρονται αναλυτικά στην παράγραφο 3.12 προηγούμενου κεφαλαίου.

Η μεταχείριση των δοσιμέτρων είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τη διασφάλιση της ευαισθησίας, και γενικότερα της συμπεριφοράς των δοσιμέτρων, αλλά και για την αποφυγή των τυχαίων σφαλμάτων που δύναται να υπεισέλθουν στη διάρκεια της χρήσης τους. Γι' αυτό και αποδόθηκε η απαιτούμενη προσοχή και σχολαστικότητα στη χρήση τους. Ειδικότερα, όταν δεν χρησιμοποιούνταν, αποθηκεύονταν σε ειδικές γυάλινες θήκες, ανάλογα με το είδος και την ομάδα στην οποία ανήκαν, και φυλάσσονταν σε σκοτεινό μέρος. Επίσης, ο χειρισμός τους γινόταν με ειδικές λαβίδες, προς αποφυγή της χάραξής τους, που θα οδηγούσε σε λανθασμένο αποτέλεσμα, κατά την μέτρηση.

5.2.2 ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ (TLD READER)

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την ανάγνωση του σήματος των TLDs, ήταν το μοντέλο 2800M της εταιρείας VICTOREEN. Ο φωτοπολλαπλασιαστής (Φ/Π) της εν λόγω συσκευής χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση, ρεύμα λειτουργίας χαμηλής εντάσεως και χρονική σταθερότητα. Έτσι, η συσκευή έχει σχετικά μειωμένο υπόβαθρο, και ταυτόχρονα είναι πολύ ευαίσθητη· ανταποκρίνεται, δηλαδή, με ακρίβεια ακόμη και στη μέτρηση πολύ μικρών δόσεων. Η ευαισθησία της όφειλε να διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της χρήσης της, γεγονός που έκρινε επιτακτική την ανάγκη για έλεγχο της λειτουργίας του Φ/Π και του ηλεκτρονικού της συστήματος σε καθημερινή βάση, ή καλύτερα, κάθε φορά που γινόταν χρήση της.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε φορά, πριν από κάθε πακέτο μετρήσεων, πραγματοποιούνταν 3 μετρήσεις χωρίς δοσίμετρο, προκειμένου να θερμανθούν τα ηλεκτρονικά της μέρη, να επέλθει μια θερμική ισορροπία στο εσωτερικό της, και γενικά να εξασφαλιστεί η σταθεροποίηση της απόκρισης του μετρητικού της συστήματος. Ο έλεγχος της ευαισθησίας συνεχιζόταν με τη μέτρηση κατάλληλου φωτός αναφοράς, και πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια μιας πηγής φωτός, που ήταν προσαρμοσμένη στη συσκευή και αποτελούνταν από δύο δοσίμετρα $\text{CaF}_2:\text{Mn}$, τα οποία περιείχαν ανάμεσά τους μια ραδιενεργή πηγή β, σωματιδίων ^{14}C χαμηλής ενέργειας. Πραγματοποιούνταν, λοιπόν, άλλες 3 μετρήσεις στην πηγή, και καταγραφόταν η μέση τιμή αυτών. Η συσκευή παρέμενε σε κατάσταση αναμονής

(stand by) ακόμη και τις ώρες που δε χρησιμοποιούνται, για την εξασφάλιση της καλύτερης λειτουργίας της.

Μετά τον έλεγχο για καλή λειτουργία της συσκευής, και τη μέτρηση της τιμής του υποβάθρου, ακολουθούσε η μέτρηση των δοσιμέτρων, αφού καθορίζαμε αρχικά το πρωτόκολλο ανάγνωσης της συσκευής, το οποίο εξαρτιόταν από το είδος των προς μέτρηση TLDs. Ως πρωτόκολλο ανάγνωσης χαρακτηρίζεται η επιλογή ενός συνόλου συγκεκριμένων παραμέτρων. Αναλυτικότερα, ένα πρωτόκολλο ανάγνωσης περιλαμβάνει την υψηλή τάση (High Voltage), τη θερμοκρασία προθέρμανσης (Preheat Temperature), το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας (Temperature Rate), τη μέγιστη θερμοκρασία (Maximum Temperature), το χρόνο κύκλου (Cycle Time) και την οριοθέτηση της περιοχής ενδιαφέροντος (Region of Interest-ROI) εντός της οποίας εμφανίζεται η κύρια δοσιμετρική κορυφή, και άρα το εύρος της εν λόγω περιοχής (δηλαδή του παραθύρου ανάγνωσης). Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων είναι άλλες για τα TLD100 και άλλες για τα TLD200, διατηρούνται σταθερές, όμως, για κάθε ένα από τα παραπάνω είδη TLDs, εξαιτίας της ανάγκης για απόλυτη επαναληψιμότητα. Στον πίνακα που ακολουθεί, αναγράφονται τα πρωτόκολλα ανάγνωσης των TLD100 και TLD200.

Παράμετροι Πρωτοκόλλου	TLD100	TLD200
Θερμοκρασία προθέρμανσης	100 °C	200 °C
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας	10 °C/sec	10 °C/sec
Υψηλή τάση	900 V	650 V
Μέγιστη θερμοκρασία	400 °C	400 °C
Χρόνος κύκλου	25 sec	25 sec
1 ^η Περιοχή ενδιαφέροντος	(90-190) °C	(20-160) °C
2 ^η Περιοχή ενδιαφέροντος	(95-195) °C	(25-165) °C
Εύρος παραθύρου ανάγνωσης	100	140

Πίνακας 5.1 Πρωτόκολλο ανάγνωσης των TLD100 και TLD200

Είναι γνωστό από προηγούμενο κεφάλαιο, ότι η αποπαγίδευση των ηλεκτρονίων επιτυγχάνεται με προσφορά θερμότητας στους κρυστάλλους θερμοφωταύγειας, κι έτσι η διαδικασία ανάγνωσης των TLDs ξεκινούσε με προθέρμανση αυτών. Πιο συγκεκριμένα, κάθε TLD τοποθετούνταν πάνω σε μια

μεταλλική επιφάνεια, που περιείχε η ειδική θήκη ανάγνωσης της συσκευής. Κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος, γινόταν μεταφορά θερμότητας στο TLD, μέσω αυτής της επιφάνειας. Η μεταφορά θερμότητας στο TLD είναι μια κρίσιμη λεπτομέρεια στη διαδικασία ανάγνωσης, που πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα. Ειδικότερα, για να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη θέρμανση του TLD και η διατήρηση της κορυφής θερμοφωταύγειας εντός των αναμενόμενων θερμοκρασιακών περιοχών, απαιτείται σχολαστικός καθαρισμός της μεταλλικής πλάκας πριν από κάθε χρήση, καθώς συσσωρεύεται σκόνη και διάφορα υπολείμματα που εμποδίζουν την αρμονική μεταφορά θερμότητας. Το ίδιο καθαρά θα πρέπει να διατηρούνται, επίσης, και τα TLDs.

Όταν το TLD τοποθετούνταν στην ειδική θήκη ανάγνωσης, βρισκόταν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Αμέσως, ξεκινούσε προσφορά θερμότητας σ' αυτό, ενώ μέχρι το πέρας της προθέρμανσης του TLD, που ορίστηκε με βάση το πρωτόκολλο, στους $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ για τα TLD100 και στους $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ για τα TLD200, δε πραγματοποιούνταν ανάγνωση του σήματος. Μόλις η θερμοκρασία άγγιζε τη θερμοκρασία προθέρμανσης, άρχιζε η σταδιακή αύξησή της, με σταθερό ρυθμό $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$, έως ότου έπαιρνε τη μέγιστη τιμή της ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$), πράγμα που διαρκούσε συνολικά 25sec. Καθ' όλη τη διάρκεια του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, ο Φ/Π μετρούσε την ένταση της εξερχόμενης οπτικής ακτινοβολίας θερμοφωταύγειας, ενώ ταυτόχρονα, σχηματιζόταν στην οθόνη της συσκευής η καμπύλη αίγλης. Στο τέλος της ανάγνωσης, εμφανιζόταν στην οθόνη και η ακριβής τιμή του σήματος του Φ/Π (σε nC), για την περιοχή ενδιαφέροντος που είχαμε ορίσει.

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος στη διαδικασία ανάγνωσης είναι η εφαρμοζόμενη υψηλή τάση στον Φ/Π, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τόσο αυξάνει η ευαισθησία του. Συγχρόνως, όμως, αυξάνει και το σήμα υποβάθρου, και άρα και ο θόρυβος. Για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής μέτρησης του σήματος θερμοφωταύγειας, επιλέχθηκε εφαρμοζόμενη τάση 900V και 650V για τα TLD100 και TLD200, αντίστοιχα.

Κατά την ανάγνωση των TLD100, παρατηρήθηκαν 2 φωτοκορυφές, μια μικρότερης και μια μεγαλύτερης εντάσεως. Η δεύτερη εξ αυτών θεωρήθηκε ως η κύρια δοσιμετρική κορυφή, και έτσι ορίστηκε ως περιοχή ενδιαφέροντος, η περιοχή που την περιελάμβανε ($90\text{ }^{\circ}\text{C} - 190\text{ }^{\circ}\text{C}$). Αντιθέτως, κατά την ανάγνωση των TLD200, παρατηρήθηκε μια φωτοκορυφή σε χαμηλότερη θερμοκρασιακή περιοχή, κι έτσι ορίστηκε ως περιοχή ενδιαφέροντος, η περιοχή $20\text{ }^{\circ}\text{C} - 160\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Τέλος, οφείλουμε να διευκρινίσουμε ότι η κορυφή που παρατηρήθηκε σε υψηλές θερμοκρασιακά περιοχές (300 °C - 400 °C), οφειλόταν είτε στον αυξημένο θόρυβο των περιοχών αυτών είτε στην εκπομπή ‘μελανού σώματος’ από τον κρύσταλλο, που άρχιζε σ’ αυτήν την περίπτωση να ‘ερυθροπυρώνεται’.



Εικόνα 5.6 TLD READER

5.2.3 ΦΟΥΡΝΟΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ (ANNEALING OVEN)

Η διαδικασία της θερμικής επεξεργασίας των TLDs γινόταν είτε αμέσως μετά τη μέτρηση του σήματος θερμοφωταύγειας αυτών είτε λίγο πριν τη ξαναχρησιμοποίησή τους σε νέες εφαρμογές. Για την παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιήθηκε συσκευή ανόπτησης, μοντέλου 2600-62 της εταιρείας VICTOREEN.



Εικόνα 5.7 ANNEALING OVEN

Η διαδικασία ανόπτησης είχε ως εξής. Αρχικά, απαιτούνταν προθέρμανση του φούρνου έως ότου η θερμοκρασία του σταθεροποιούνταν στην επιθυμητή τιμή, η οποία εξαρτιόταν από το είδος των TLDs που θα υποβάλλονταν σε θερμική επεξεργασία κάθε φορά. Πρακτικά, για το σκοπό αυτό χρειάζονταν περίπου 20-30 λεπτά. Κατόπιν, τα TLDs τοποθετούνταν πάνω σ' ένα ειδικό μεταλλικό πλέγμα, που λειτουργούσε ως βάση και εφάρμοζε στο εσωτερικό του φούρνου, με τη βοήθεια ειδικής μεταλλικής λαβίδας, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που είχαν αναπτυχθεί σ' αυτόν. Η τοποθέτηση των TLDs πάνω στο πλέγμα έπρεπε να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς ήταν σημαντικό τα δοσίμετρα να μην επικαλύπτονται μεταξύ τους, για την αποτελεσματική επεξεργασία τους.

Ο κύκλος της θερμικής επεξεργασίας ήταν για τα:

- TLD100: 1h στους 400 °C και αμέσως μετά 20h στους 80 °C
- TLD200: 10min στους 320 °C

Η θερμική επεξεργασία για τα TLD100 ήταν, βεβαίως, χρονοβόρα, αλλά το πρωτόκολλο έπρεπε να τηρείται αυστηρά για τη διασφάλιση της επαναληψιμότητας στη συμπεριφορά τους. Για τη διευκόλυνσή μας, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος χρονοδιακόπτης, που θέτονταν σε λειτουργία μετά το πέρας της 1^{ης} ώρας και ως τη συμπλήρωση των 20 ωρών.

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση του κύκλου ανόπτησης των δοσιμέτρων, και αφού θέταμε εκτός λειτουργίας τη συσκευή, ανοίγαμε το καπάκι της και περιμέναμε να κρυώσουν λίγο τα TLDs. Στην συνέχεια, και πάντα με τη βοήθεια της λαβίδας -για προληπτικούς πλέον λόγους- βγάζαμε εκτός φούρνου το μεταλλικό πλέγμα με τα TLDs και τα αφήναμε στον αέρα, ώσπου να κρυώσουν τελείως και να τα τοποθετήσουμε στις θέσεις τους.

5.2.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ

Η βαθμονόμηση των δοσιμέτρων είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία, η οποία πρέπει να γίνεται πριν από κάθε εφαρμογή τους, και μάλιστα σε συνθήκες που, αν όχι να είναι ίδιες, να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις συνθήκες στις οποίες θα διεξαχθεί η συγκεκριμένη εφαρμογή.

Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία που ακολουθήσαμε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης για τον υπολογισμό του συντελεστή ευαισθησίας των TLDs, είχε ως εξής. Καθοριστική ήταν η χρήση του θαλάμου ιονισμού, ο οποίος εμφανίζει απευθείας στην οθόνη του, την τιμή της δόσεως σε mGy, έπειτα από ακτινοβόληση αυτού. Έτσι, λοιπόν, τα TLDs τοποθετήθηκαν με προσοχή σε σειρά πάνω στην ενεργή περιοχή του θαλάμου, ώστε να βρίσκονται μεν κοντά το ένα στο άλλο, χωρίς ωστόσο να επικαλύπτονται. Κατόπιν, η όλη διάταξη (θάλαμος-TLDs) τοποθετήθηκε πάνω στο ακτινοδιαγνωστικό κρεβάτι, σε απόσταση όσο το δυνατό μεγαλύτερη από την εστία της λυχνίας, και ρυθμίστηκε το πεδίο ακτινοβόλησης με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι ακριβώς ίσο με το μέγεθος της επιφάνειας του θαλάμου. Αφού ορίσαμε στον θάλαμο ιονισμού να εμφανίζει ως ένδειξη τη δόση σε mGy, ρυθμίσαμε τις παραμέτρους της δέσμης ακτινοβολίας, χειροκίνητα, στο ακτινολογικό μηχάνημα. Η επιλογή των τιμών δεν ήταν τυχαία, αλλά έγινε βασιζόμενη στις ανάγκες, τα δεδομένα και τις συνθήκες της εφαρμογής, στην οποία θα χρησιμοποιούνταν τα προς βαθμονόμηση TLDs. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι τιμές των mAs, των kV, και το μέγεθος της εστίας (μεγάλο, μεσαίο, μικρό).

Μετά από την παραπάνω προετοιμασία, ακολούθησε η ακτινοβόληση των δοσιμέτρων και η σημείωση της αναγραφόμενης ένδειξης του θαλάμου ιονισμού. Στην συνέχεια, υπολογίστηκε η τιμή του υποβάθρου (σε nC), και η μέτρηση του φορτίου καθενός TLD, με τη βοήθεια του TLD Reader. Φροντίσαμε, με ειδική

τοποθέτηση των TLDs πάνω σε έναν αυτοσχέδιο πίνακα σε χαρτί, να εξασφαλίσουμε τη δυνατότητα αντιστοιχίας του κάθε TLD με το μετρούμενο φορτίο, που προέκυψε κατά την ανάγνωση του συγκεκριμένου. Μετά την ολοκλήρωση της ανάγνωσης όλων των TLDs, αφαιρέθηκε το υπόβαθρο από το σήμα κάθε δοσιμέτρου, ώστε να προκύψει έτσι το πραγματικό σήμα (σε nC). Εν συνεχεία, διαιρέσαμε την ένδειξη του θαλάμου προς το πραγματικό σήμα κάθε TLD, και προέκυψε μια τιμή συντελεστή βαθμονόμησης για κάθε δοσίμετρο (σε mGy/nC). Με τη βοήθεια του νόμου του Sturges, ή πρακτικά, με επεξεργασία των τιμών που προέκυψαν, χωρίσαμε τα TLDs σε ομάδες. Βασική προϋπόθεση, ο συντελεστής ευαισθησίας κάθε TLD της ίδιας ομάδας, να έχει περίπου την ίδια τιμή με τους αντίστοιχους των υπόλοιπων, ώστε να παρουσιάζεται μεταξύ τους μια τυπική απόκλιση μικρότερη του 3%. Τέλος, ο κοινός συντελεστής ευαισθησίας κάθε ομάδας διεξήχθη απ' τη μέση τιμή των συντελεστών ευαισθησίας των TLDs που την αποτελούσαν.

Η διαδικασία βαθμονόμησης είναι ίδια και για τα TLD100 και για τα TLD200. Στην συγκεκριμένη εργασία, πραγματοποιήθηκε σειρά διαδικασιών βαθμονόμησης TLD100 και TLD200, με τη βοήθεια της λυχνίας Siemens Multix, στα πλαίσια του πειράματος για τη διαπίστωση του ενδεχομένου επίδρασης της κατεύθυνσης ακτινοβολίας στο συντελεστή ευαισθησίας αυτών των κατηγοριών δοσιμέτρων θερμοφωταύγειας. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παραθέτονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Το ίδιο συμβαίνει και με τα TLD200 που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της δόσης στους συνοδούς των παιδιών, κατά την εξέταση του οισοφαγογράφηματος, καθώς τα TLD200 που χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτή την εφαρμογή, είναι τα ίδια με αυτά που έλαβαν μέρος στη διεξαγωγή του πειράματος. Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι για τα TLD200 των συνοδών, ορίστηκε:

- **Συντελεστής Ευαισθησίας TLD200: 0.00278mGy/nC**

Η βαθμονόμηση των TLD100, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της δόσης στα υποβαλλόμενα σε κυστεογραφία ή οισοφαγογράφημα παιδιά ή νεογνά, δε χρειάστηκε να γίνει, καθώς είχε γίνει νωρίτερα και είχε αναδείξει 4 ομάδες, Α, Β, Γ και Δ, με συντελεστή ευαισθησίας η κάθε μια:

- **Συντελεστής Ευαισθησίας TLD100, Ομάδας Α: 0.091891981mGy/nC**
- **Συντελεστής Ευαισθησίας TLD100, Ομάδας Β: 0.083653538mGy/nC**
- **Συντελεστής Ευαισθησίας TLD100, Ομάδας Γ: 0.087524mGy/nC**
- **Συντελεστής Ευαισθησίας TLD100, Ομάδας Δ: 0.061225mGy/nC**

5.2.5 ΘΑΛΑΜΟΣ ΙΟΝΙΣΜΟΥ

Η βαθμονόμηση των δοσιμέτρων, είναι όπως ήδη αναφέρθηκε, πολύ σημαντική και απαραίτητη διαδικασία, πριν τη χρήση τους σε διάφορες εφαρμογές. Πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός θαλάμου ιονισμού. Ο θάλαμος ιονισμού, που χρησιμοποιήσαμε για τις βαθμονομήσεις των εφαρμογών μας, ήταν το μοντέλο Radcal-Model 398K, ο οποίος έχει τη δυνατότητα της απευθείας εμφάνισης της τιμής της δόσης σε mGy, στην οθόνη του. Πρόκειται για μια συσκευή με σταθερή απόκριση ως προς την ενέργεια της δέσμης φωτονίων του ακτινογραφικού μηχανήματος, πράγμα που διαπιστώθηκε από διαδοχικές μετρήσεις που έγιναν με τον εν λόγω θάλαμο, για συγκεκριμένα στοιχεία (kV, mAs) του ακτινογραφικού μηχανήματος, οι οποίες παρουσίαζαν μικρές διακυμάνσεις.

5.2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ ΚΑΙ ΔΟΣΗΣ

Η εκτίμηση του σήματος υποβάθρου κάθε μέτρησης γίνεται με διάφορες μεθόδους. Στην παρούσα μελέτη, η διαδικασία που χρησιμοποιήσαμε είχε ως εξής. Διατηρώντας κενή τη θήκη του TLD Reader, όπου τοποθετούνταν τα προς μέτρηση TLDs, και πριν την έναρξη κάθε πακέτου μετρήσεων, λαμβάναμε τρεις τιμές του background, απ' τις οποίες παίρναμε τη μέση τιμή, την οποία και θεωρούσαμε ως την ουσιαστική τιμή υποβάθρου.

Στο τέλος των μετρήσεων του φορτίου των TLDs, κατά την επεξεργασία των δεδομένων και πριν εξάγουμε τη τιμή δόσης που αναγραφόταν σε κάθε δοσίμετρο, αφαιρούσαμε τη τιμή υποβάθρου απ' τη τιμή σήματος του κάθε δοσιμέτρου όπως αυτή δινόταν στην οθόνη ανάγνωσης, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να αγγίζει όσο το δυνατό την πραγματικότητα, και άρα να αφορά αποκλειστικά το σήμα που καταγράφηκε ως συνέπεια της επίδρασης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Το υπόλοιπο της παραπάνω αριθμητικής πράξης αποτελούσε το πραγματικό σήμα του κάθε TLD, και ο υπολογισμός της δόσης D στο σημείο που αυτό είχε τοποθετηθεί, προέκυπτε από τον πολλαπλασιασμό του καθαρού σήματος TL αυτού, επί του συντελεστή βαθμονόμησης του, C. Δηλαδή:

$$D \text{ (mGy)} = \text{TL (nC)} * C \text{ (mGy/nC)} \quad (5.1)$$

5.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΕΤΑΣΕΩΝ

Στην συγκεκριμένη παράγραφο, περιλαμβάνονται λεπτομέρειες σχετικά με τη φιλοσοφία των εξετάσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, όπως και πληροφορίες που αφορούν τα μέτρα ακτινοπροστασίας που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια των εξετάσεων, την τοποθέτηση των ασθενών και των δοσιμέτρων θερμοφωταύγειας σε αυτούς, προκειμένου να ληφθούν τα απαραίτητα πειραματικά δεδομένα για την επεξεργασία των μετρήσεων και την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων.

5.3.1 ΟΙΣΟΦΑΓΟΓΡΑΦΗΜΑ

Το οισοφαγογράφημα είναι μια σύνθετη εξέταση, που πραγματοποιείται έπειτα από σειρά ενδείξεων, όπως επεισόδια πνιγμονής, παρατεινόμενο wheezing (συριγμός), και έμετοι (τροφώδεις,χολώδεις). Σκοπός του, η απεικόνιση του πεπτικού συστήματος, προκειμένου να εξακριβωθεί αν το νεογνό εμφανίζει:

- Συνέργεια κατάποσης
- Τραχειοοισοφαγικό συρίγγιο και αγγειακά εντυπώματα
- Μορφολογικές ανωμαλίες - malrotation (διαταραχές καθήλωσης εντέρου)
- Γαστροοισοφαγική Παλινδρόμηση (ΓΟΠ), δηλαδή επιστροφή του στομαχικού περιεχομένου προς τον οισοφάγο

Για τη διεξαγωγή της εξέτασης χρησιμοποιείται μη ιονικό, υδατοδιαλυτό σκιαγραφικό σκεύασμα, το οποίο αναμιγνύεται, με αναλογία 1 προς 3, με γάλα ή νερό μέσα στο μπιμπερό του νεογνού. Η σκιαγραφική ουσία έχει την ιδιότητα να αυξάνει τεχνητά την απορρόφηση της ακτινοβολίας, χάρη του μεγάλου συντελεστή εξασθένισής της, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά τη πραγματοποίηση της εξέτασης, καθώς με τη βοήθειά της, και πιο συγκεκριμένα με την κίνησή της μέσα στο σώμα του βρέφους, δίνεται η δυνατότητα στο παιδοακτινολόγο, μέσω ακτινοσκόπησης, να παρακολουθήσει τη λειτουργία των οργάνων (και ιδιαίτερα του οισοφάγου), να κάνει τις απαραίτητες παρατηρήσεις, να καταλήξει στα ανάλογα συμπεράσματα, και να προβεί έτσι στη διάγνωση της κατάστασης. Σημαντική λεπτομέρεια για την αρμονική διεξαγωγή της εξέτασης είναι το νεογνό να είναι νηστικό, ώστε να ανταποκρίνεται στη λήψη τροφής, την οποία λαμβάνει με τη

βοήθεια των συνοδών, συνήθως γονέων, που παραβρίσκονται στο χώρο της εξέτασης, καθ' όλη τη διάρκεια αυτής.

Όσο αφορά τη διαδικασία της εξέτασης, περιλαμβάνει ακτινοσκόπηση και λήψη ακτινογραφιών σε συγκεκριμένες στιγμές, που ο γιατρός θεωρεί απαραίτητη τη καταγραφή της εικόνας, την οποία παρακολουθεί στην οθόνη κατά τη διάρκεια της ακτινοσκόπησης. Η εξέταση χωρίζεται σε δύο μέρη, την προφίλ όψη (πλάγια θέση) και την όψη σε φάση (ύπτια θέση). Κάθε μέρος περιλαμβάνει το μέγιστο 3 ακτινοσκοπήσεις και 3 ακτινογραφίες, χωρίς, βέβαια, αυτό να σημαίνει πως δεν υπάρχουν και εξαιρέσεις ως προς την υπέρβαση του μέγιστου αριθμού τους, όταν το απαιτούν οι συνθήκες, πράγμα που εξαρτάται απ' την κρίση του γιατρού ακτινολόγου.

Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα που ακολουθούνται κατά τη διάρκεια του οισοφαγογραφήματος, είναι τα εξής. Αρχικά, το νεογνό τοποθετείται πάνω στο τραπέζι του ακτινολογικού μηχανήματος, σε σταθερή απόσταση από τη λυχνία FID = 1,15m (Focus to Image Distance), σε πλάγια, αριστερή συνήθως, θέση. Αφού τοποθετηθεί η πρώτη τετράδα TLDs στο αριστερό ημιθωράκιο του, ακολουθεί ακτινοσκόπηση κατάποσης και οι απαιτούμενες ακτινογραφίες οισοφάγου σε καλή έκπτυξη ανώτερου οισοφάγου (σε profile θέση). Έπεται κατάποση μέτριας ποσότητας σκιαγραφικού, και κατόπιν, αφού αδειάσει το άντρο (αριστερή λοξή-face θέση), ολοκληρώνεται το πρώτο μέρος της εξέτασης. Αφαιρείται η πρώτη τετράδα TLDs και τοποθετείται αμέσως η δεύτερη στο θώρακα του παιδιού, το οποίο τοποθετείται τώρα σε ύπτια θέση, οπότε και λαμβάνεται ακτινογραφία στομάχου απολύτως face, κατά την διέλευση του πρώτου βλωμού σκιαγραφικού από την δωδεκαδακτυλονηστιδική συμβολή. Μετά τη κατάποση της συνήθους ποσότητας γεύματος, έχουμε μετακίνηση του παιδιού και ακτινοσκόπηση για ΓΟΠ σε face θέση, με ή χωρίς ακτινογραφία. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται 2 ή 3 φορές, ανάλογα με τη σοβαρότητα του περιστατικού, και έτσι ολοκληρώνεται και το δεύτερο μέρος της εξέτασης, και άρα η εξέταση του οισοφαγογραφήματος.

Το minimum της εξέτασης περιλαμβάνει ακτινοσκόπηση σε πλάγια και κατά μέτωπο θέση, κι ενδιάμεσα 1 ακτινογραφία πλάγια οισοφάγου και 1 ακτινογραφία κατά μέτωπο στομάχου.

Εάν η υποψία για τραχειοοισοφαγικό συρίγγιο είναι ισχυρή, απαιτείται εξέταση, με το νεογνό σε πρηνή θέση και οριζόντια δέσμη ακτινοβολίας κατά την

κατάποση ή κατά την πλήρωση του οισοφάγου, με σκιαγραφικό μέσω βραδέως ανασυρόμενου ρινογαστρικού καθετήρα.

Η συλλογή πειραματικών δεδομένων βασίστηκε, κατά κύριο λόγο, σε οισοφαγογραφήματα νεογνών. Καταγράφηκαν, ωστόσο, και δεδομένα που αφορούσαν διάφορες παραλλαγές του οισοφαγογραφήματος, όπως βαριούχα γεύματα, διαβάσεις και οισοφαγογραφήματα για αχαλασία οισοφάγου, τα οποία και συμπεριλήφθηκαν στη παρούσα μελέτη.

Σε παιδιά μεγαλύτερης ηλικίας προτιμάται η εξέταση βαριούχου γεύματος, η οποία γίνεται με την παραπάνω διαδικασία, με τη διαφορά ότι περιλαμβάνει και επιπλέον ακτινογραφίες οισοφάγου σε πρηνή θέση για τον έλεγχο της οισοφαγογαστρικής συμβολής, ή και ακτινογραφίες δωδεκαδάκτυλου σε οπίσθια αριστερή λοξή θέση. Στον συγκεκριμένο τύπο εξέτασης, χορηγείται από το στόμα σκιαγραφική ουσία Βαρίου (Iopamiro Gastro ή Gastrografin), η οποία διαλύεται σε νερό, σε ποσότητα που εξαρτάται από την ηλικία και το βάρος του παιδιού. Στην περίπτωση του βαριούχου γεύματος, τα TLDs μετακινήθηκαν στο λιγότερο εξαρτώμενο μέρος του σώματος.

Αν υπάρχει υποψία για malrotation (παραλλαγή στην καθήλωση του εντέρου, που προδιαθέτει σε συστροφή εντέρου) ή άλλο ερώτημα, μπορεί η εξέταση του οισοφαγογραφήματος να μετατραπεί σε διάβαση ανώτερου πεπτικού, κατά την οποία λαμβάνονται και ακτινογραφίες κοιλίας σε δεύτερο χρόνο, μέχρι να απεικονιστεί σκιαγραφημένο μεγάλο τμήμα του γαστρεντερικού σωλήνα.

Τέλος, το οισοφαγογράφημα για αχαλασία γίνεται με το παιδί όρθιο, σε δεξιά οπίσθια λοξή θέση και τη λήψη ακτινογραφιών. Μπορεί να συμπληρωθεί με το παιδί ξαπλωμένο και με ακτινογραφίες σε ύπτια ή πρηνή θέση, ή με ακτινογραφίες στον στόμαχο, αν ο γιατρός θελήσει να εξετάσει και το ενδεχόμενο παλινδρόμησης.

Παρά τη παρακολούθηση των παραλλαγών του οισοφαγογραφήματος, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν έως το πέρας αυτού, χωρίς δηλαδή να ληφθούν υπ' όψιν οι επιπλέον ακτινοσκοπήσεις και ακτινογραφίες, ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο συμβατά σε σχέση με τα αντίστοιχα των απλών οισοφαγογραφημάτων, και να ανταποκρίνονται όσο το δυνατό περισσότερο στην πραγματικότητα.

Είναι σημαντικό, να αναφέρουμε ότι κατά τη διεξαγωγή των εξετάσεων, τοποθετήθηκαν 2 δοσίμετρα θερμοφωταύγειας, τύπου TLD 200, 1 στο γυμνό χέρι και 1 στο θώρακα (πάνω απ' τη μόλυβδινη στολή) του συνοδού, προκειμένου να

διευκρινιστεί η δόση ακτινοβολίας, την οποία έλαβε λόγω σκέδασης (δευτερογενής ακτινοβολία) κατά τη παραμονή του στο χώρο της εξέτασης.

5.3.2 ΚΥΣΤΕΟΓΡΑΦΙΑ

Η κυστεογραφία είναι μια εξέταση, που πραγματοποιείται με σκοπό την απεικόνιση του ουροποιητικού συστήματος, και πιο συγκεκριμένα, για να ελεγχθεί:

- Η μορφολογία της ουροδόχου κύστεως, και να επισημανθεί, έτσι, η τυχόν ύπαρξη διαφόρων ανωμαλιών, όπως εκκολπώματα, ουρηθροκήλη, κ.α.
- Η μορφολογία της ουρήθρας, και να διαπιστωθεί το ενδεχόμενο εμφάνισης πιθανών ανωμαλιών, όπως βαλβίδες, δυσπλασίες, εκκολπώματα
- Η πιθανή ύπαρξη κυστεοουρηθρικής παλινδρόμησης (ΚΟΠ) και ο προσδιορισμός του βαθμού αυτής. ΚΟΠ είναι η μη φυσιολογική, βεβαίως, επιστροφή των ούρων προς την ουροδόχο κύστη.

Πρόκειται για μια εξέταση που πραγματοποιείται σε όλες τις ηλικίες: στην παρούσα μελέτη, όμως, επικεντρώσαμε το ενδιαφέρον μας στα νεογνά και στα μικρά παιδιά. Πραγματοποιείται όταν παιδιά, μικρότερα των 5 ετών, παρουσιάσουν επεισόδιο ή επαναλαμβανόμενα επεισόδια ουρολοίμωξης, όταν είναι ήδη γνωστή η εμφάνιση ανωμαλίας από εξέταση υπερηχογραφήματος που έχει προηγηθεί, όταν απαιτείται επανέλεγχος γνωστής ΚΟΠ (follow-up), όταν υπάρχουν συγγενείς 1^{ου} βαθμού με γνωστή ΚΟΠ, όταν το παιδί εμφανίζει ενούρηση, και σπανιότερα σ' αυτές τις ηλικίες, όταν απαιτείται προμοσχευτικός ή μεταμοσχευτικός έλεγχος.

Η προετοιμασία της εξέτασης περιλαμβάνει την εφαρμογή ρινογαστρικού καθετήρα στην ουρήθρα του παιδιού ή του νεογνού. Κατόπιν, τοποθετείται στο τραπέζι του ακτινολογικού μηχανήματος, και γίνεται η τοποθέτηση 2 δυάδων TLDs 100. Η τοποθέτηση των TLDs είναι διαφορετική στα δύο φύλα. Έτσι, όταν εξετάζεται κορίτσι, και οι 2 δυάδες τοποθετούνται πάνω απ' τα γεννητικά του όργανα, στο ύψος της ουροδόχου κύστεως, ενώ όταν εξετάζεται αγόρι, η 1 δυάδα τοποθετείται πάνω απ' τα γεννητικά του όργανα, στο ύψος της ουροδόχου κύστεως, όπως και στα θήλαα, και η δεύτερη πάνω στα γεννητικά όργανα, και πιο συγκεκριμένα στους όρχεις, καθώς εδώ ενδιαφέρει και η ταυτόχρονη απεικόνιση και εξέταση της κατάστασης της ουρήθρας. Στην συνέχεια, μέσω του καθετήρα, διοχετεύεται ιωδιούχο, μη ιονικό σκιαγραφικό (Ultravist 300), στην ουροδόχο κύστη. Όταν γεμίσει η ουροδόχος

κύστη, δημιουργείται στο παιδί η επιθυμία ούρησης. Όταν το παιδί ή το νεογνό ουρήσει, ολοκληρώνεται η εξέταση της κυστεογραφίας, και αφαιρούνται τα προς μέτρηση TLDs και ο καθετήρας.

Η εξέταση περιλαμβάνει ακτινοσκόπηση και λήψη ακτινογραφιών, όταν το θεωρήσει απαραίτητο ο ακτινολόγος, ο οποίος έχει τη δυνατότητα, μέσω της κίνησης του σκιαγραφικού υλικού, να παρακολουθεί τη λειτουργία και τη μορφολογία του ουροποιητικού συστήματος, και να καταλήγει έτσι σε ανάλογα συμπεράσματα. Ο αριθμός των ακτινογραφιών που λαμβάνονται, διαφοροποιείται, ανάλογα με το φύλο του παιδιού που εξετάζεται. Συνήθως, λαμβάνονται 2 ακτινογραφίες για τα θήλεα και 3 για τα άρρενα, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν εξαιρέσεις, ανάλογα με τις απαιτήσεις του περιστατικού και τη κρίση του γιατρού ακτινολόγου.

Έτσι, πιο αναλυτικά, για τα θήλεα, η εξέταση της κυστεογραφίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: ακτινοσκόπηση διαλείποντος κατά την πλήρωση της ουροδόχου κύστεως με σκιαγραφικό παλίνδρομα μέσω ρινογαστρικού καθετήρα και κατά την ούρηση, και ενδιάμεσα, λήψη 1 ακτινογραφίας στο πέρας της πλήρωσης και 1-2 ακτινογραφίες μετά την ούρηση. Εναλλακτικά, 1 ακτινογραφία μετά την ούρηση.

Αντίθετα, η διαδικασία της εξέτασης στα άρρενα, περιλαμβάνει: ακτινοσκόπηση διαλείποντος κατά την πλήρωση της ουροδόχου κύστεως με σκιαγραφικό παλίνδρομα μέσω ρινογαστρικού καθετήρα και κατά την ούρηση, αλλά στην περίπτωση αυτή, η ακτινογραφία κατά την πλήρωση γίνεται κατά μέτωπο, ενώ οι ακτινογραφίες (1-2) κατά την κένωση γίνονται σε δεξιά οπίσθια λοξή θέση, ώστε να ελεγχθεί και η κατάσταση της ουρήθρας.

Τέλος, πρέπει να σημειώσουμε ότι η εξέταση πραγματοποιείται με τη βοήθεια των συνοδών (συνήθως γονέων) των εξεταζόμενων, που παραβρίσκονται στο χώρο της εξέτασης καθ' όλη τη διάρκεια αυτής, και συμβάλλουν με τον τρόπο τους στην αρμονική και επιτυχή έκβασή της.

5.3.3 ΜΕΤΡΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΣΕΩΝ ΚΥΣΤΕΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΟΙΣΟΦΑΓΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

Στην παράγραφο αυτή, θα γίνει αναφορά στα μέτρα ακτινοπροστασίας που τηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των εξετάσεων, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια

της παρούσας μελέτης. Η όλη μελέτη αφορά παιδιά, και κυρίως νεογνά. Για τις συγκεκριμένες εξετάσεις, λοιπόν, το ιατρικό προσωπικό έκανε ειδική επιλογή στοιχείων λυχνίας (kV, mAs, ms, total screening time), μειώνοντας τις τιμές τους, προκειμένου να εξασφαλιστεί η όσο το δυνατό χαμηλότερη απορροφούμενη δόση, και να τηρηθούν τα προβλεπόμενα όρια δόσεων, καθώς τα άτομα αυτής της ηλικίας εμφανίζονται ιδιαίτερα ακτινοευαίσθητα.

Η ηλικία των εξεταζόμενων αιτιολογεί και την παρουσία συνοδών (κυρίως των γονέων) στο χώρο της εξέτασης, η οποία ήταν καθοριστική και για την απαραίτητη ακινητοποίηση των εξεταζόμενων, ώστε να διεκπεραιωθεί η εξέταση στον λιγότερο δυνατό χρόνο, με ταυτόχρονη εξασφάλιση της ποιότητας των ακτινοδιαγνωστικών εικόνων. Σημαντικός, επίσης, παράγοντας για την μείωση του χρόνου έκθεσης εξεταζόμενων και συνοδών ήταν ο χειρονακτικός καθορισμός του πεδίου ακτινοβολίας, αντί του αυτόματου που απαιτεί ακτινοσκόπηση και άρα επιπλέον έκθεση σε ακτινοβολία. Όσο αφορά το πεδίο ακτινοβολίας, αυτό περιοριζόταν στο εντελώς απαραίτητο, προκειμένου να περιοριστεί η ακτινοβολία αποκλειστικά στην περιοχή ενδιαφέροντος, αποφεύγοντας να ακτινοβοληθούν άσκοπα και άλλα όργανα και ιστοί του εξεταζόμενου.

Το ιατρικό και παραϊατρικό προσωπικό απομακρυνόταν σε κάθε χρήση ακτινοβολίας απ' τον ακτινοδιαγνωστικό θάλαμο, που κατατάσσεται στις ελεγχόμενες περιοχές, και περιοριζόταν στο χειριστήριο της ακτινοδιαγνωστικής μονάδας, εκεί, δηλαδή, όπου ο χώρος είναι επιβλεπόμενος, τηρώντας έτσι τα μέτρα του κανονισμού ακτινοπροστασίας περί απόστασης, θωράκισης και χρόνου έκθεσης. Οι συνοδοί, υποχρεούνταν να φορέσουν μολύβδινη ποδιά, προκειμένου να αυξηθεί η προσωπική τους θωράκιση και να προστατευτούν περισσότερο απ' τις βλαβερές συνέπειες της ακτινοβολίας. Ορισμένες φορές μάλιστα, τους δόθηκαν και προστατευτικά για το θυρεοειδή, ενώ οι υπεύθυνοι φρόντιζαν να απομακρύνουν από το χώρο της εξέτασης οποιαδήποτε συνοδό βρισκόταν σε κατάσταση εγκυμοσύνης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ ΣΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ (C) ΤΩΝ TLD100 ΚΑΙ TLD200

Στα πλαίσια του συγκεκριμένου πειραματικού μέρους, πραγματοποιήθηκε μια σειρά βαθμονομήσεων 20 TLD100 και 18 TLD200 σε καθορισμένες συνθήκες, ίδιες και για τα δύο είδη. Πιο αναλυτικά, τα πακέτα των παραπάνω δοσιμέτρων ακτινοβολήθηκαν σε οριζόντια (0°), κάθετη (90°) και πλάγια θέση (υπό γωνίες 25° , 45° , 70°), με διάφορες τιμές στοιχείων λυχνίας, ώστε τα αποτελέσματα να προσεγγίζουν όσο το δυνατό τη πραγματικότητα και να αναφέρονται σε ένα ευρύ φάσμα περιοχών ακτινοβολήσης. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 26 διαδικασίες βαθμονόμησης, 13 για τα TLD100 και άλλες 13 για τα TLD200.

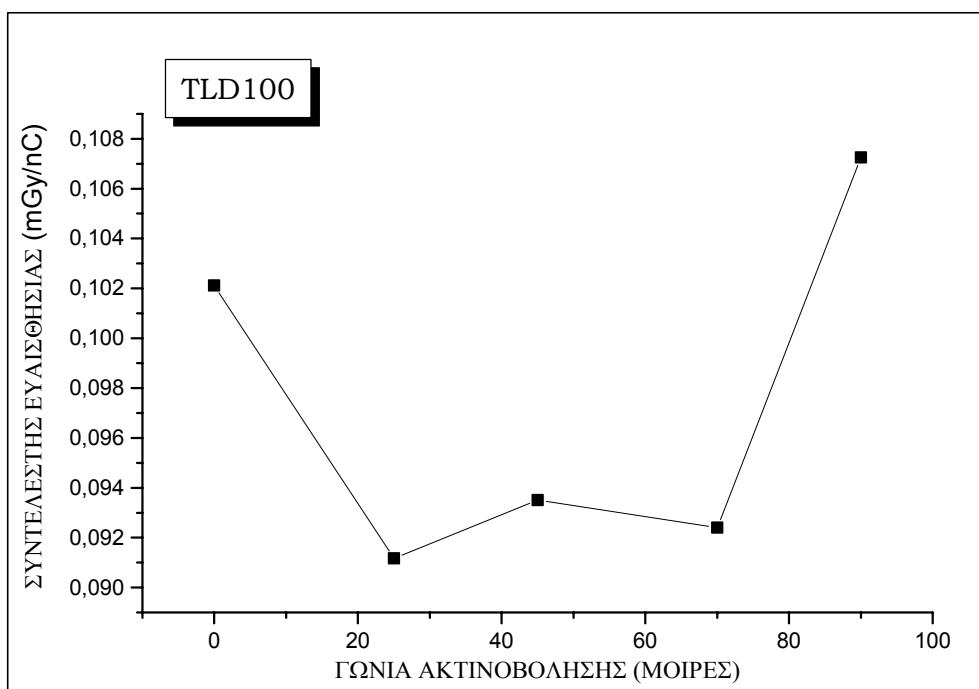
Θα πρέπει να αναφέρουμε, επίσης, ότι όλες οι βαθμονομήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ακτινογραφικό μηχάνημα Siemens Multix Up, ότι η σύμπτωση του φωτεινού πεδίου με το πεδίο ακτινοβολήσης διατηρήθηκε σταθερό για όλες τις βαθμονομήσεις στα 110cm, και ότι για όλες τις ακτινοβολήσεις επιλέχθηκε μεσαία εστία λυχνίας, με μια εξαίρεση λόγω λάθους, πράγμα που ωστόσο δε φάνηκε να παίζει ουσιαστικό ρόλο στη ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Τέλος, για την ακτινοβολήση των TLDs σε πλάγια θέση, και υπό γωνίες 25° , 45° και 70° χρησιμοποιήθηκαν αυτοσχέδιες επίπεδες επιφάνειες με την αντίστοιχη κάθε φορά κλίση, πάνω στις οποίες τοποθετήθηκαν τα προς βαθμονόμηση TLDs. Κατόπιν, η όλη διάταξη τοποθετήθηκε στην ενεργό περιοχή του θαλάμου ιονισμού, για να ακολουθήσει η ακτινοβολήσή τους.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου παραθέτονται πίνακες με τα στοιχεία λυχνίας, τις ενδείξεις του θαλάμου ιονισμού, και τα αποτελέσματα (μέση τιμή φορτίου δοσιμέτρων κατά την ανάγνωση, συντελεστής βαθμονόμησης, τυπική απόκλιση) της κάθε βαθμονόμησης ξεχωριστά, και για τις δύο κατηγορίες.

TLD100					
	0°	25°	45°	70°	90°
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΥΧΝΙΑΣ	50mAs 60KV	50mAs 60KV	50mAs 60KV	50mAs 60KV	50mAs 60KV
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ	1,449mGy 124,4ms	1,422mGy 124,1ms	1,417mGy 124,3ms	1,327mGy 124,1ms	1,461mGy 124,5ms
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ TLDs (nC)	14,871	16,251	15,5865	14,9095	14,078
STDEV	1,1028	0,8286	1,0117	1,2438	0,4477
C (mGy/nC)	0,10211	0,091175	0,09351	0,0924	0,10725
STDEV	0,00666	0,00491	0,006379	0,007528	0,00355

Πίνακας 6.1 Αναλυτικά στοιχεία βαθμονόμησης των TLD100 υπό γωνίες 0°, 25°, 45°, 70° και 90°

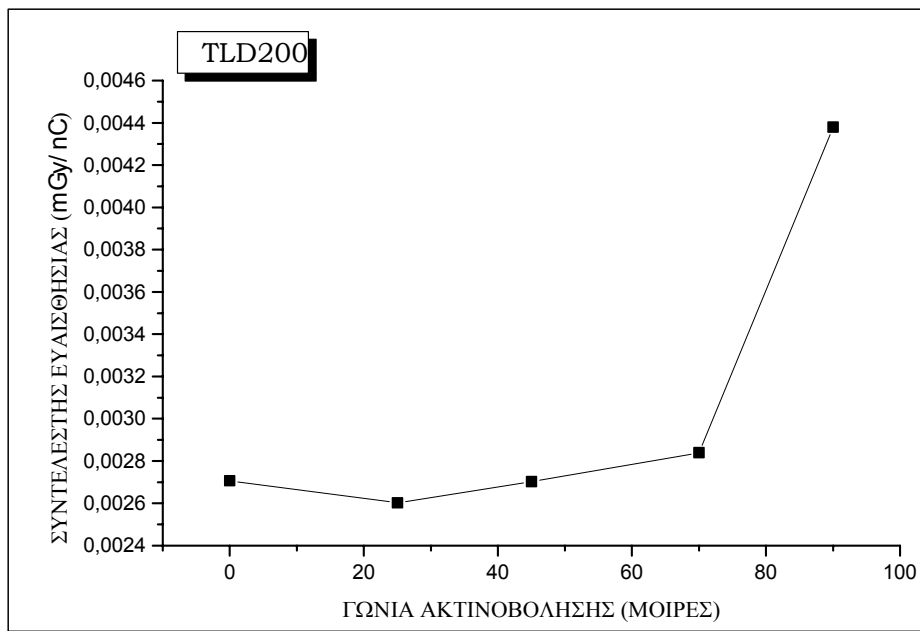


Γράφημα 6.1. Διάγραμμα του συντελεστή ευαισθησίας σε σχέση με τη γωνία ακτινοβολήσης για τα TLD100

Τα πρώτα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι τα TLD100 είναι μάλλον ανεπηρέαστα από τις διάφορες αλλαγές της κατεύθυνσης της δέσμης ακτινοβολίας. Υπάρχουν, βέβαια, κάποιες διακυμάνσεις στις τιμές, οι οποίες, ωστόσο, δεν είναι ικανές να οδηγήσουν σε κάποιο άλλο ασφαλές συμπέρασμα.

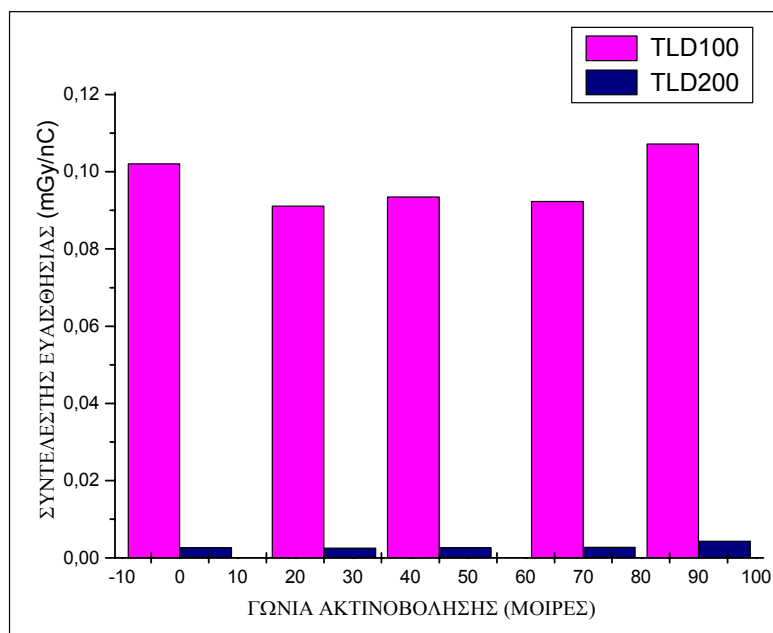
TLD200					
	0°	25°	45°	70°	90°
ΣΤΟΙΧΕΙΑ	50mAs	50mAs	50mAs	50mAs	50mAs
ΛΥΧΝΙΑΣ	60KV	60KV	60KV	60KV	60KV
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ	1,401mGy	1,363mGy	1,346mGy	1,266mGy	1,422mGy
ΘΑΛΑΜΟΥ					
ΙΟΝΙΣΜΟΥ	124,8ms	124,2ms	124,2ms	124,2ms	124,6ms
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ					
ΦΟΡΤΙΟΥ TLDs	518,526	525,78	498,94	448	325,21
(nC)					
STDEV	18,4191	28,725	26,264	27,4954	13,0579
C (mGy/nC)	0,002706	0,002602	0,002703	0,00284	0,00438
STDEV	0,00009726	0,000142	0,00014	0,000175	0,000179

Πίνακας 6.2 Αναλυτικά στοιχεία βαθμονόμησης των TLD200 υπό γωνίες 0°, 25°, 45°, 70° και 90°



Γράφημα 6.2 Διάγραμμα του συντελεστή ευαισθησίας σε σχέση με τη γωνία ακτινοβολήσης για τα TLD200

Όσο αφορά τα TLD200, φαίνεται ότι για μεγάλες γωνίες, ο συντελεστής ευαισθησίας τους επηρεάζεται. Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η γωνία ακτινοβολήσης τόσο αυξάνεται και ο συντελεστής, ο οποίος, μάλιστα, σχεδόν διπλασιάζεται κατά την κάθετη ακτινοβολήση (90°).

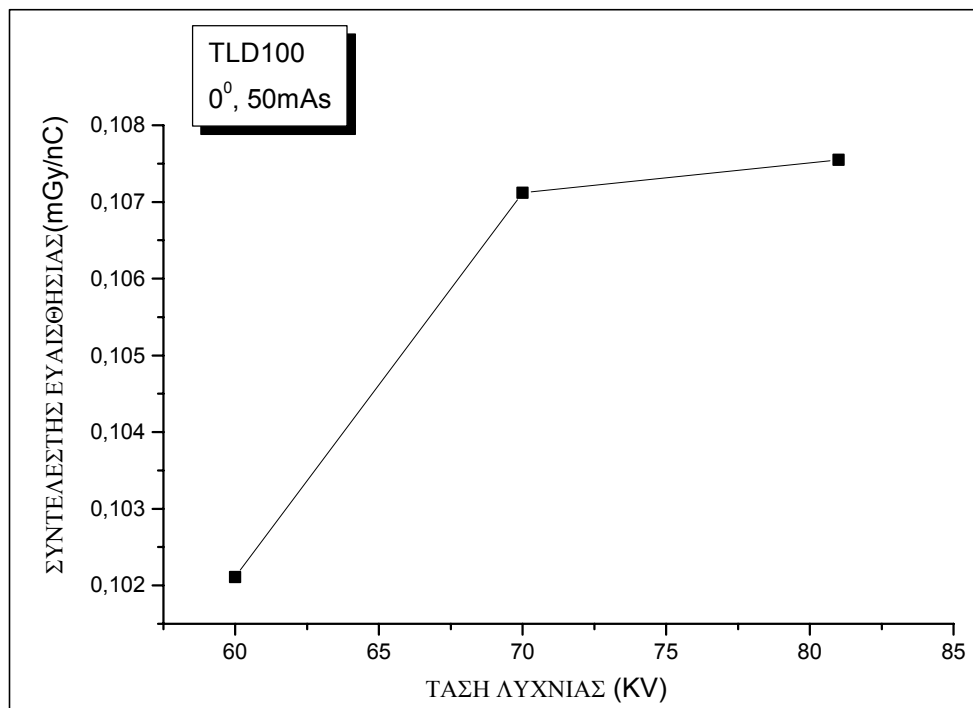


Γράφημα 6.3 Σύγκριση των συντελεστών ευαισθησίας σε σχέση με τη γωνία ακτινοβολήσης για τα TLD100 και TLD200

Πραγματοποιήσαμε, επίσης, κάποιες επιπλέον βαθμονομήσεις, ακτινοβολώντας τα δύο είδη TLDs σε οριζόντια και κάθετη θέση, μεταβάλλοντας τη μια φορά τα KV, και την άλλη τα mAs, προκειμένου να επιβεβαιώσουμε τα παραπάνω συμπεράσματά μας.

TLD100 (50mAs, 0°)			
	60KV	70KV	81KV
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ	1,449mGy	2,059mGy	2,784mGy
ΘΑΛΑΜΟΥ			
ΙΟΝΙΣΜΟΥ	124,4ms	146,4ms	171ms
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			
ΦΟΡΤΙΟΥ TLDs	14,871	19,912	26,675
(nC)			
STDEV	1,1028	2,2377	3,2303
C (mGy/nC)	0,10211	0,10712	0,10755
STDEV	0,00666	0,0091	0,01043

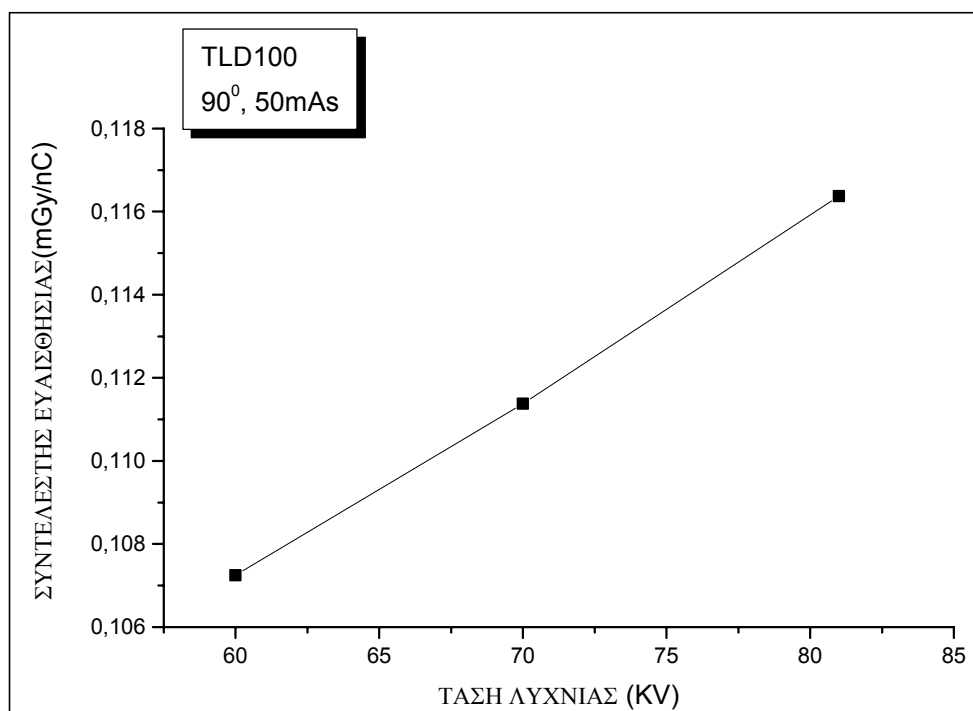
Πίνακας 6.3 Αναλυτικά στοιχεία βαθμονόμησης των TLD100 υπό γωνία 0° διατηρώντας σταθερά τα mAs και μεταβάλλοντας τα KV



Γράφημα 6.4 Διάγραμμα του συντελεστή ευαισθησίας για τα TLD100 σε σχέση με την τάση της λυχνίας, υπό γωνία ακτινοβολήσης 0° και ένταση δέσμης 50 mAs

TLD100 (50mAs, 90°)			
	60KV	70KV	81KV
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ	1,461mGy	2,054mGy	2,274mGy
	124,5ms	146,3ms	170,7ms
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ TLDs (nC)	14,078	19,215	20,3365
STDEV	0,4477	2,6833	1,88
C (mGy/nC)	0,10725	0,11138	0,116375
STDEV	0,00355	0,01073	0,00908

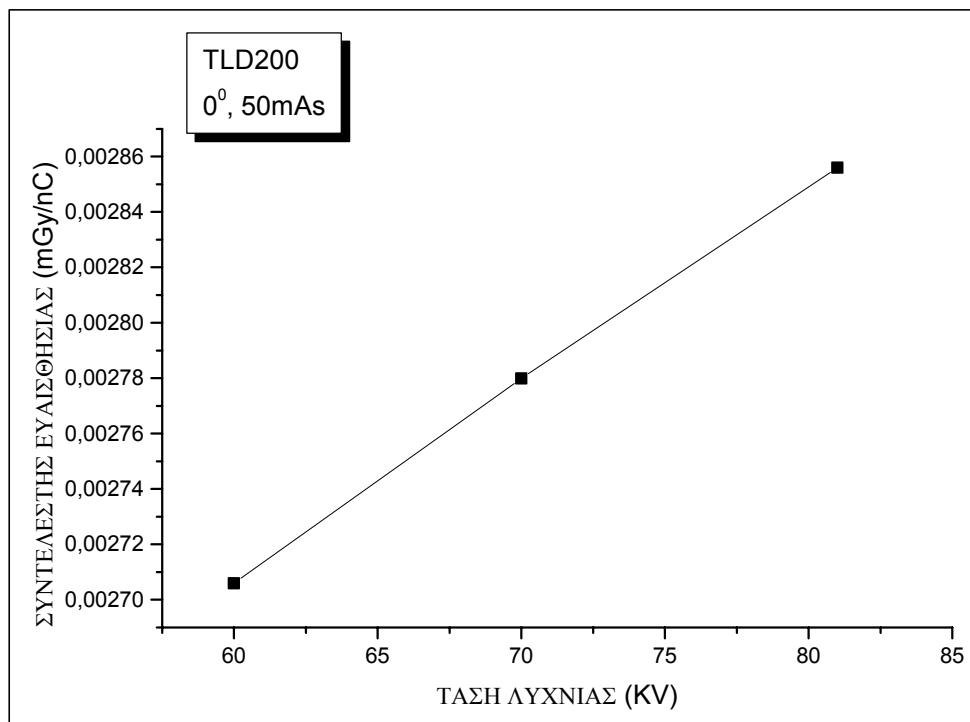
Πίνακας 6.4 Αναλυτικά στοιχεία βαθμονόμησης των TLD100 υπό γωνία 90° διατηρώντας σταθερά τα mAs και μεταβάλλοντας τα KV



Γράφημα 6.5 Διάγραμμα του συντελεστή ευαισθησίας για τα TLD100 σε σχέση με την τάση της λυχνίας, υπό γωνία ακτινοβολήσης 90° και ένταση δέσμης 50 mAs

TLD200 (50mAs, 0°)			
	60KV	70KV	81KV
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ	1,401mGy	1,980mGy	2,661mGy
	124,8ms	86,7ms	171,3ms
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ TLDs (nC)	518,526	712,895	932,421
STDEV	18,4191	25,7075	32,3545
C (mGy/nC)	0,002706	0,00278	0,002856
STDEV	0,00009726	0,000106	0,000101

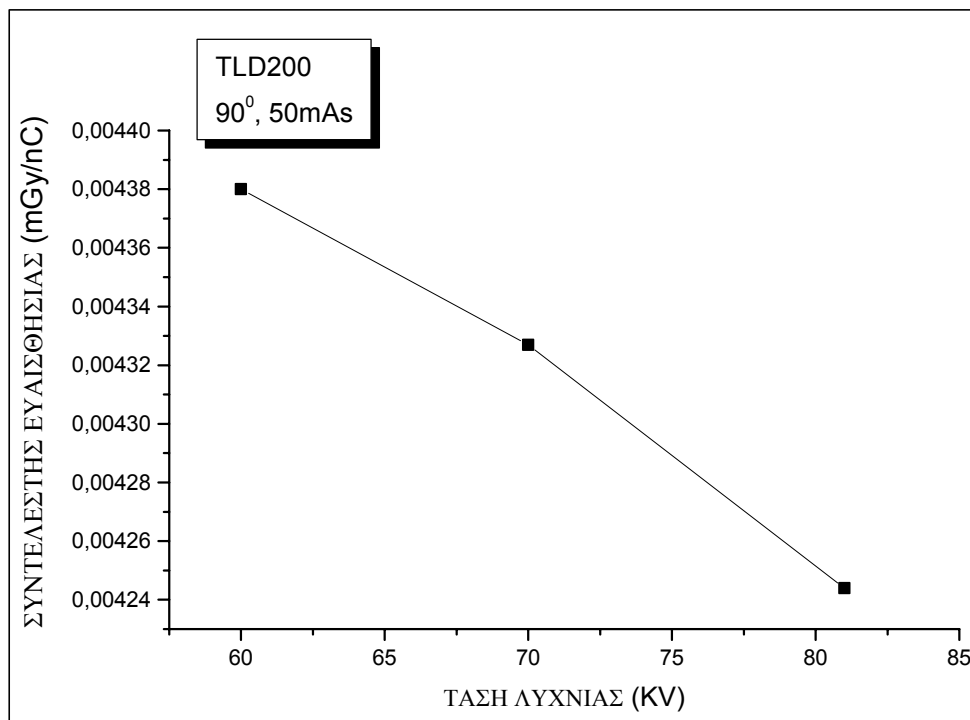
Πίνακας 6.5 Αναλυτικά στοιχεία βαθμονόμησης των TLD200 υπό γωνία 0° διατηρώντας σταθερά τα mAs και μεταβάλλοντας τα KV



Γράφημα 6.6 Διάγραμμα του συντελεστή ευαισθησίας για τα TLD200 σε σχέση με την τάση της λυχνίας, υπό γωνία ακτινοβολήσης 0° και ένταση δέσμης 50 mAs

TLD200 (50mAs, 90°)			
	60KV	70KV	81KV
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ	1,422mGy	2,008mGy	2,734mGy
	124,6ms	146,3ms	171,3ms
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ TLDs (nC)	325,21	465	645,263
STDEV	13,0579	17,4579	24,6595
C (mGy/nC)	0,00438	0,004327	0,004244
STDEV	0,000179	0,000164	0,000162

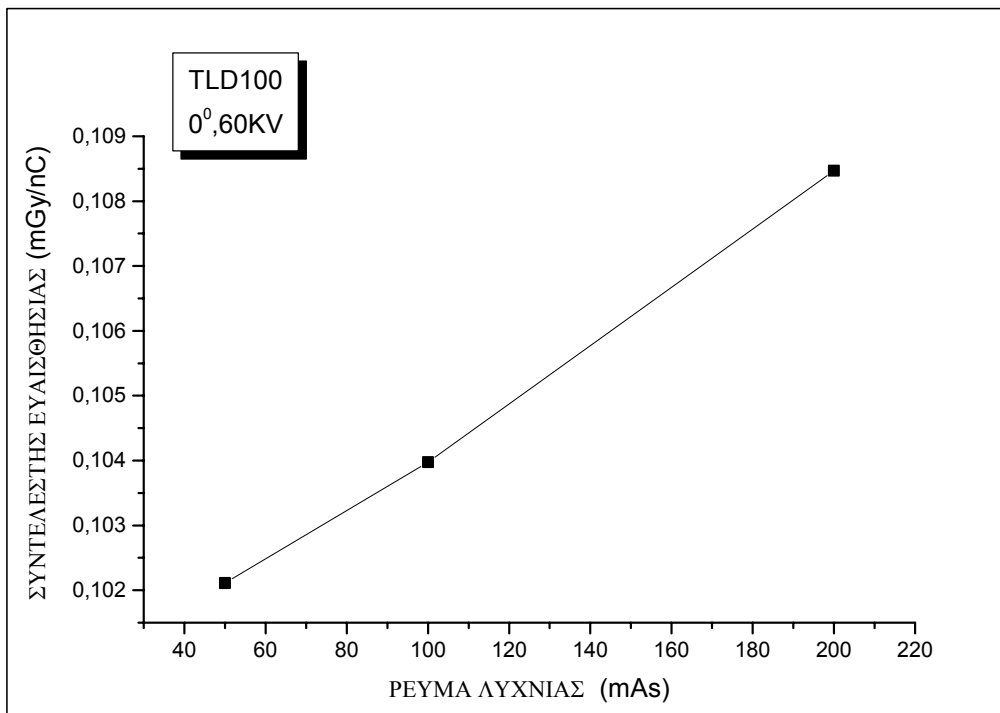
Πίνακας 6.6 Αναλυτικά στοιχεία βαθμονόμησης των TLD200 υπό γωνία 90° διατηρώντας σταθερά τα mAs και μεταβάλλοντας τα KV



Γράφημα 6.7 Διάγραμμα του συντελεστή ευαισθησίας για τα TLD200 σε σχέση με την τάση της λυχνίας, υπό γωνία ακτινοβολήσης 90° και ένταση δέσμης 50 mAs

TLD100 (60KV, 0°)			
	50mAs	100mAs	200mAs
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ	1,449mGy	2,903mGy	5,704mGy
	124,4ms	262,1ms	559,7ms
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ TLDs (nC)	14,871	28,595	53,37
STDEV	1,1028	1,9063	2,1602
C (mGy/nC)	0,10211	0,103975	0,10847
STDEV	0,00666	0,00624	0,00465

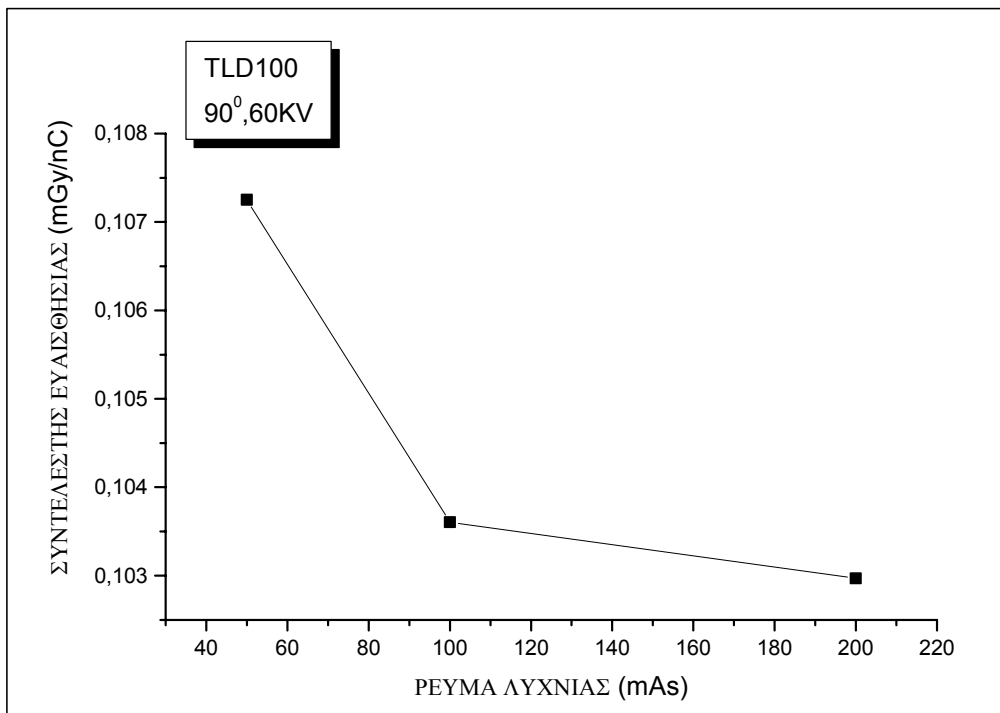
Πίνακας 6.7 Αναλυτικά στοιχεία βαθμονόμησης των TLD100 υπό γωνία 0°, διατηρώντας σταθερά τα KV και μεταβάλλοντας τα mAs



Γράφημα 6.8 Διάγραμμα του συντελεστή ευαισθησίας για τα TLD100 σε σχέση με το ρεύμα της λυχνίας, υπό γωνία ακτινοβόλησης 0° και τάση λυχνίας 60 KV

TLD100 (60KV, 90°)			
	50mAs	100mAs	200mAs
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ	1,461mGy	2,896mGy	3,816mGy
ΘΑΛΑΜΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ	124,5ms	261,6ms	375,9ms
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ TLDs (nC)	14,078	28,715	37,66
STDEV	0,4477	2,8518	1,5534
C (mGy/nC)	0,10725	0,103605	0,10297
STDEV	0,00355	0,01003	0,00437

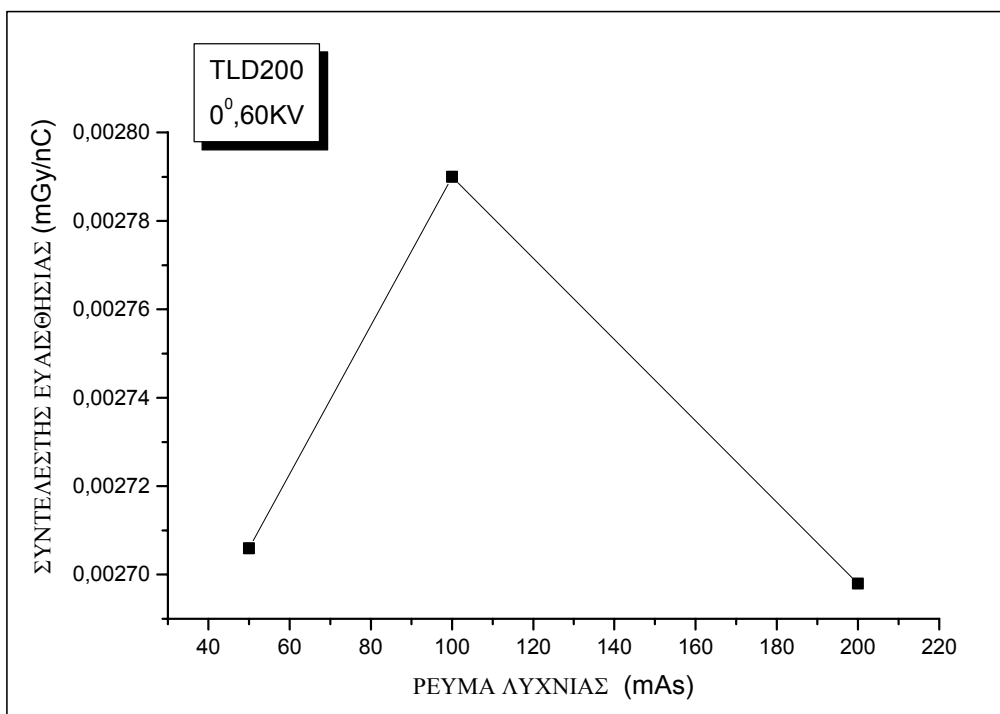
Πίνακας 6.8 Αναλυτικά στοιχεία βαθμονόμησης των TLD100 υπό γωνία 90°, διατηρώντας σταθερά τα KV και μεταβάλλοντας τα mAs



Γράφημα 6.9 Διάγραμμα του συντελεστή ευαισθησίας για τα TLD100 σε σχέση με το ρεύμα της λυχνίας, υπό γωνία ακτινοβολήσης 90° και τάση λυχνίας 60 KV

TLD200 (60KV, 0°)			
	50mAs	100mAs	200mAs
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ	1,401mGy	2,760mGy	5,437mGy
	124,8ms	261,8ms	560,3ms
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ TLDs (nC)	518,526	990,5	2016,56
STDEV	18,4191	36,5871	78,8171
C (mGy/nC)	0,002706	0,00279	0,002698
STDEV	0,00009726	0,000102	0,000105

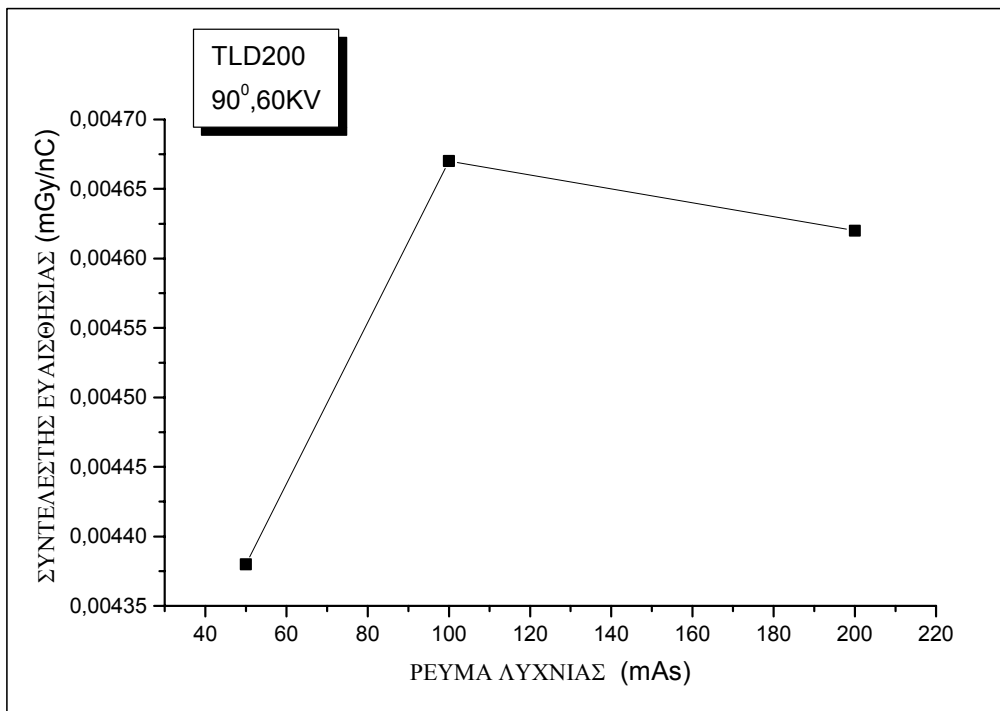
Πίνακας 6.9 Αναλυτικά στοιχεία βαθμονόμησης των TLD200 υπό γωνία 0°, διατηρώντας σταθερά τα KV και μεταβάλλοντας τα mAs



Γράφημα 6.10 Διάγραμμα του συντελεστή ευαισθησίας για τα TLD200 σε σχέση με το ρεύμα της λυχνίας, υπό γωνία ακτινοβολήσης 0° και τάση λυχνίας 60 KV

TLD200 (60KV, 90°)			
	50mAs	100mAs	200mAs
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ	1,422mGy	2,861mGy	4,652mGy
ΘΑΛΑΜΟΥ			
ΙΟΝΙΣΜΟΥ	124,6ms	261,9ms	466,3ms
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			
ΦΟΡΤΙΟΥ TLDs	325,21	614	1007,78
(nC)			
STDEV	13,0579	25,5573	44,7129
C (mGy/nC)	0,00438	0,00467	0,00462
STDEV	0,000179	0,000201	0,000206

Πίνακας 6.10 Αναλυτικά στοιχεία βαθμονόμησης των TLD200 υπό γωνία 90°, διατηρώντας σταθερά τα KV και μεταβάλλοντας τα mAs



Γράφημα 6.11 Διάγραμμα του συντελεστή ευαισθησίας για τα TLD200 σε σχέση με το ρεύμα της λυχνίας, υπό γωνία ακτινοβολήσης 90° και τάση λυχνίας 60 KV

Προέκυψαν, όπως ήταν λογικό, κάποιες διακυμάνσεις στις τιμές του συντελεστή βαθμονόμησης και για τα δύο είδη TLDs, οι οποίες, όμως, είναι πάρα πολύ μικρές. Τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα σαφή, αλλά θα τολμούσαμε να πούμε πως διαφαίνεται μια σχετική γραμμικότητα, καθώς όσο αυξάνονται τα KV ή τα mAs, αυξάνεται και ο συντελεστής βαθμονόμησης.

Αν υπήρχε η δυνατότητα να πραγματοποιήσουμε τις βαθμονομήσεις με τέτοιο τρόπο, ώστε οι ενδείξεις στο θάλαμο ιονισμού να είναι ακριβώς ίδιες για τα ίδια στοιχεία λυχνίας, αποκλείοντας δηλαδή την εμφάνιση των πιθανών σφαλμάτων καθ' όλη τη διαδικασία του πειράματος, τότε τα αποτελέσματα θα ήταν πιο προφανή και ξεκάθαρα, και τα συμπεράσματά μας πιο ασφαλή.

6.2 ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΟΙΣΟΦΑΓΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 11 εξετάσεις οισοφαγογραφήματος σε νεογνά και των δύο φύλων, ηλικίας από 16 ημερών έως 10 μηνών. Τα στοιχεία των εξετάσεων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί.

		1° ΜΕΡΟΣ	2° ΜΕΡΟΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΑ
ΧΡΟΝΟΣ ΑΚΤΙΝΟΣΚΟΠΗΣΗΣ (min)	Μέση Τιμή	0,8	0,8364	1,6364
	Εύρος	0,4 – 1,6	0,1 – 1,3	1,1 – 2,6
KVp ΑΚΤΙΝΟΣΚΟΠΗΣΗΣ	Μέση Τιμή	75,2667	76,2609	75,6981
	Εύρος	68 - 83	65 - 84	65 - 84
mAs ΑΚΤΙΝΟΣΚΟΠΗΣΗΣ	Μέση Τιμή	2,1733	2,2391	2,2019
	Εύρος	1,8 – 2,5	1,6 – 2,6	1,6 – 2,6
ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΩΝ	Μέση Τιμή	2	1,4545	3,4545
	Εύρος	1 - 3	0 - 3	2 - 5
KVp ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΩΝ	Μέση Τιμή	69,8181	67,6562	68,9079
	Εύρος	60 - 81	60 - 73	60 - 81
mAs ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΩΝ	Μέση Τιμή	8,34	9,815	8,961
	Εύρος	3,74 - 13	5,72 - 24	3,74 - 24
ms ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΩΝ	Μέση Τιμή	13,9773	15,875	14,7763
	Εύρος	5,2 – 21,5	5,2 - 45	5,2 - 45

Πίνακας 6.11 Αποτελέσματα μετρήσεων εξετάσεων οισοφαγογραφήματος

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει μια σχετική ισορροπία των παραμέτρων και για τα δύο μέρη της εξέτασης. Ο αριθμός των ακτινογραφιών, τα KV, τα mAs, τα ms των ακτινογραφιών, όπως και τα KV, τα mAs και τα min ακτινοσκόπησης, παρουσιάζουν, βέβαια, κάποιες διαφοροποιήσεις ως προς τις τιμές τους για το κάθε κομμάτι της εξέτασης· ωστόσο, οι αποκλίσεις είναι πάρα πολύ μικρές.

Στην συνέχεια της παραγράφου παρατίθεται πίνακας, στον οποίο αναγράφονται οι τιμές δόσεων που έλαβαν τα νεογνά ανά φύλο, αλλά και συνολικά, στη διάρκεια της εξέτασης οισοφαγογραφήματος, και στα επιμέρους τμήματα αυτής.

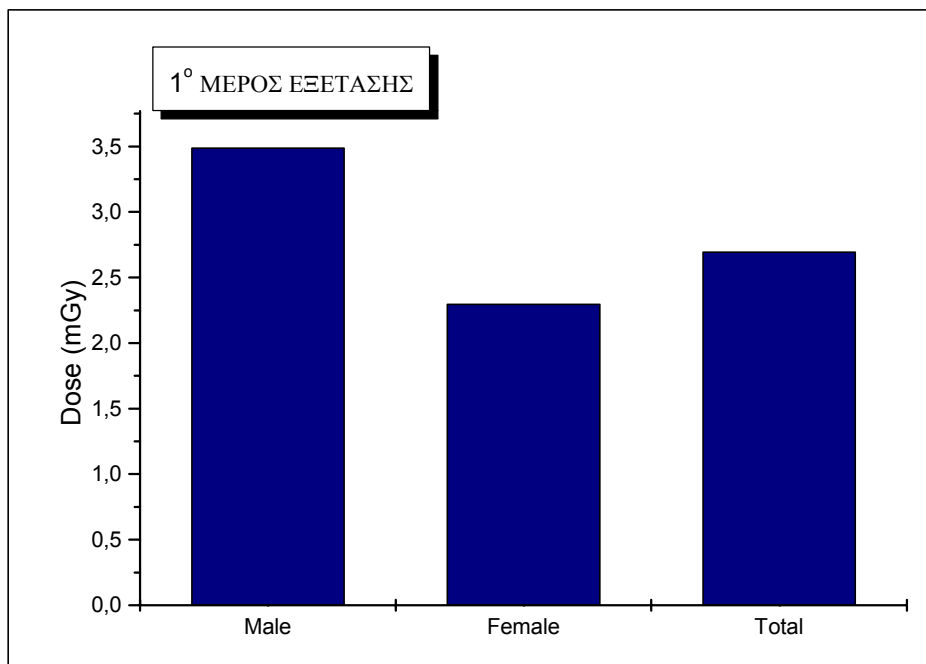
ΔΟΣΕΙΣ ΝΕΟΓΝΩΝ (mGy)				
		1 ^ο ΜΕΡΟΣ ΕΞΕΤΑΣΗΣ	2 ^ο ΜΕΡΟΣ ΕΞΕΤΑΣΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ
ΑΡΡΕΝΑ	Μέση Τιμή	3,491	3,546	3,523
	Εύρος	0,522 – 4,996	0,9 – 5,437	0,522 – 5,437
ΘΗΛΕΑ	Μέση Τιμή	2,301	2,995	2,683
	Εύρος	0,533 – 4,587	0,535 – 6,135	0,533 – 6,135
ΣΥΝΟΛΟ ΝΕΟΓΝΩΝ	Μέση Τιμή	2,698	3,2	2,981
	Εύρος	0,522 – 4,996	0,535 – 6,135	0,522 – 6,135

Πίνακας 6.12 Δόσεις νεογνών ανά φύλο και συνολικά για όλη την εξέταση και τα μέρη αυτής

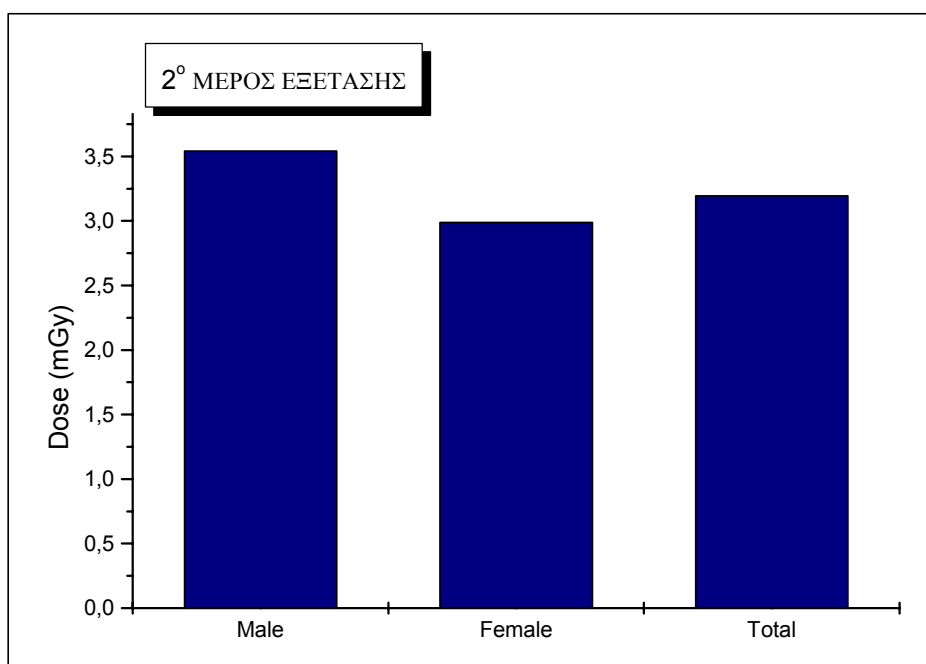
Φαίνεται ξεκάθαρα ότι τα νεογνά έλαβαν σχετικά υψηλότερες δόσεις τόσο συνολικά όσο και ανά φύλο, κατά το 2^ο μέρος της εξέτασης, δηλαδή κατά την ύπτια προβολή τους. Αυτό είναι δυνατό να οφείλεται στον τρόπο εναπόθεσης της ενέργειας της ακτινοβολίας στο σώμα των εξεταζόμενων. Πιο συγκεκριμένα, κατά την ύπτια προβολή, μεταβάλλεται η γεωμετρική θέση και το ανατομικό σχήμα των διαφόρων οργάνων που βρίσκονται εντός του πεδίου ακτινοβολήσης, με αποτέλεσμα να εκτίθενται περισσότερο στην ακτινοβολία απ' ότι στο 1^ο μέρος της εξέτασης όπου το σώμα ήταν τοποθετημένο σε πλάγια θέση. Είναι λογικό, λοιπόν, να διαφαίνεται μια μεγαλύτερη απορρόφηση της ακτινοβολίας, και άρα να καταγράφεται μεγαλύτερη τιμή δόσεως στην προκειμένη περίπτωση.

Επίσης, παρατηρούμε ότι οι δόσεις που έλαβαν τα αρρενα νεογνά είναι πιο αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες των θηλέων, και μάλιστα και για τα δύο μέρη της εξέτασης, και συνεπώς, και συνολικά.

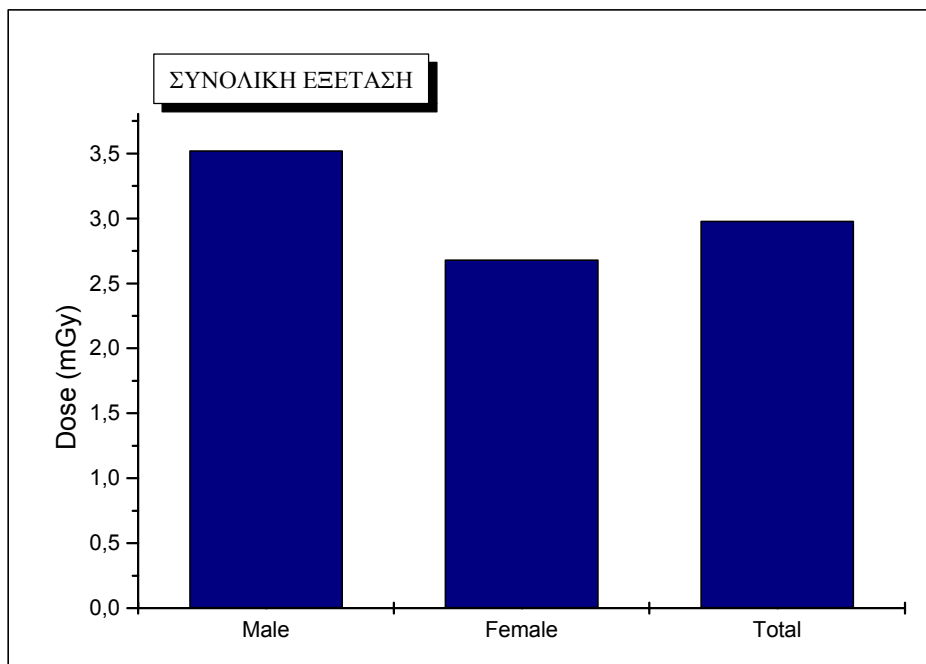
Ακολουθούν κάποια χαρακτηριστικά γραφήματα, στα οποία απεικονίζονται καλύτερα οι διαφορές στις τιμές των δόσεων για το κάθε φύλο και για το κάθε μέρος της εξέτασης.



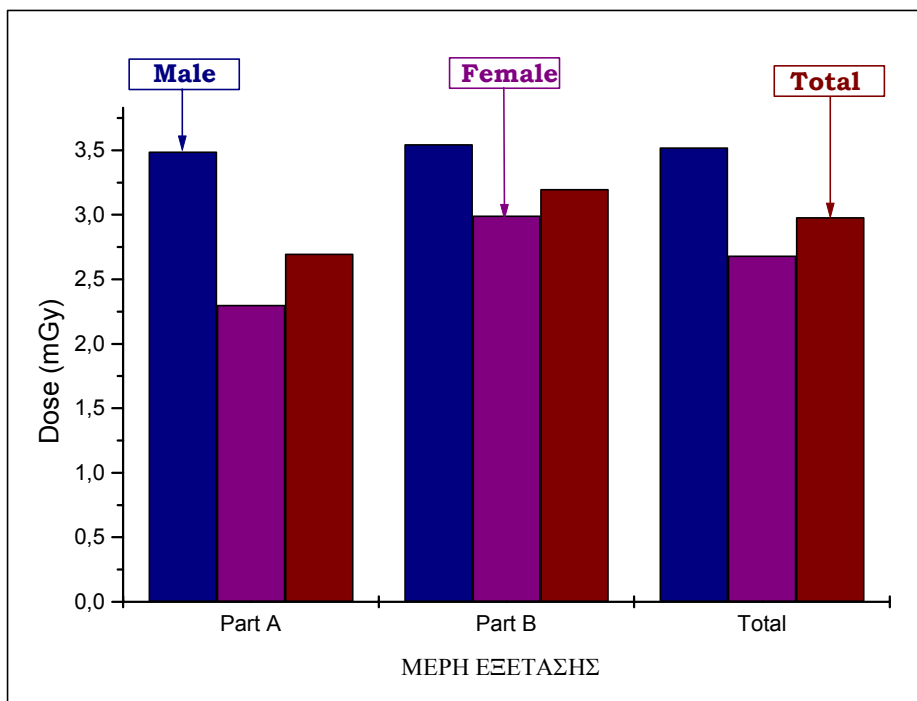
Γράφημα 6.12 Δόσεις νεογνών κατά το 1^ο μέρος της εξέτασης, συνολικά και ανά φύλο



Γράφημα 6.13 Δόσεις νεογνών κατά το 2^ο μέρος της εξέτασης, συνολικά και ανά φύλο



Γράφημα 6.14 Δόσεις νεογνών για τη συνολική εξέταση, συνολικά και ανά φύλο



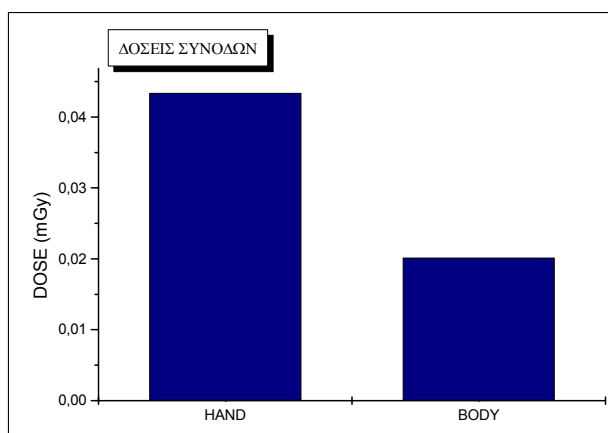
Γράφημα 6.15 Σύγκριση των δόσεων των νεογνών ανά φύλο και συνολικά για κάθε μέρος της εξέτασης, αλλά και για τη συνολική

Λαμβάνοντας υπ' όψιν το συντελεστή κινδύνου για θανατηφόρο καρκίνο, του NRPB Report 260 και BEIR V Committee Report 1990, που είναι περίπου ίσος με $12 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ για παιδιά μικρότερα των 10 ετών, η πιθανότητα για θανατηφόρο καρκίνο είναι για τα άρρενα νεογνά 0,42276, για τα θήλεα 0,32196, και για το σύνολο των νεογνών, που υποβλήθηκαν σε εξέταση οισοφαγογραφήματος, 0,35772.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εξέτασης, καταγράφηκαν παράλληλα και οι δόσεις που έλαβαν οι συνοδοί των νεογνών, οι οποίοι παραβρίσκονταν στο χώρο της εξέτασης, καθ' όλη τη διάρκεια αυτής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 2 TLD200, προκειμένου να εκτιμηθεί η ληφθείσα λόγω σκέδασης της ακτινοβολίας δόση. Τα TLDs τοποθετήθηκαν αντίστοιχα στο χέρι και στο κορμό του σώματος του συνοδού που είχε ενεργό συμμετοχή στη φάση διεξαγωγής της εξέτασης. Παρακάτω ακολουθεί ενδεικτικός πίνακας των σχετικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν, και το αντίστοιχο γράφημα απορροφηθέντων δόσεων.

ΔΟΣΕΙΣ ΣΥΝΟΔΩΝ (mGy)		
ΧΕΡΙ	Μέση Τιμή	0,04338
	Εύρος	0,0098 – 0,083
ΚΟΡΜΟΣ ΣΩΜΑΤΟΣ	Μέση Τιμή	0,02018
	Εύρος	0,0067 – 0,0356

Πίνακας 6.13 Δόσεις των συνοδών στο χέρι και στον κορμό του σώματος



Γράφημα 6.16 Διάγραμμα των δόσεων των συνοδών στο χέρι και στον κορμό του σώματος

Οι τιμές των δόσεων και στα δύο μέρη του σώματος είναι πολύ μικρές. Παρατηρούμε, ωστόσο, πως η δόση στο χέρι του συνοδού είναι σχεδόν διπλάσια απ' την αντίστοιχη του κορμού. Το γεγονός αυτό είναι πολύ λογικό και οφείλεται στην κίνηση του χεριού του συνοδού κοντά στο πεδίο ακτινοβολήσης, προκειμένου να χορηγήσει το σκιαγραφικό διάλυμα στο νεογνό. Το χέρι, λοιπόν, του συνοδού εκτίθεται περισσότερο σε ακτινοβολία, σε σχέση με το υπόλοιπο σώμα, που προστατεύεται επιπλέον με την ειδική μολύβδινη ποδιά, την οποία υποχρεούνται να φέρουν οι συνοδοί κατά τη παραμονή τους στο χώρο της εξέτασης.

6.3 ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΚΥΣΤΕΟΓΡΑΦΙΑΣ

Το 3^ο μέρος του πειράματος περιλαμβάνει, όπως έχουμε προαναφέρει, τον υπολογισμό της απορροφηθείσας δόσης σε νεογνά και μικρά παιδιά, τα οποία υποβλήθηκαν σε εξέταση κυστεογραφίας. Στα πλαίσια αυτού, πραγματοποιήθηκε ένας σημαντικός αριθμός εξετάσεων, που αγγίζει τις 88. Οι 35 εξ αυτών αναφέρονται σε κορίτσια και οι υπόλοιπες 53 σε αγόρια. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των εξετάσεων αφορά νεογνά, ηλικίας από 6 ημερών έως 2 ετών, ενώ μόλις 13 περιπτώσεις αφορούν άτομα μεγαλύτερης ηλικίας, και πιο συγκεκριμένα παιδιά μεταξύ 2,5 και 9 ετών.

Όλες οι εξετάσεις κυστεογραφίας διεξήχθησαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Τα στοιχεία της λυχνίας τόσο για ακτινογραφίες όσο για ακτινοσκοπήσεις καταγράφηκαν σε κάθε περιστατικό, και έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία, παρατίθενται συνολικά στον πίνακα που ακολουθεί, ο οποίος είναι ενδεικτικός των μέσων τιμών και του εύρους αυτών ολικά, αλλά και για το κάθε φύλο ξεχωριστά.

		ΑΡΡΕΝΑ	ΘΗΛΕΑ	ΣΥΝΟΛΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ
ΧΡΟΝΟΣ ΑΚΤΙΝΟΣΚΟΠΗΣΗΣ (min)	Μέση Τιμή	0,7755	0,6914	0,7420
	Εύρος	0,2 – 2,5	0,1 – 2,1	0,1 – 2,5
KVp ΑΚΤΙΝΟΣΚΟΠΗΣΗΣ	Μέση Τιμή	65,6792	68	66,6023
	Εύρος	59 - 83	59 – 93	59 - 93
mAs ΑΚΤΙΝΟΣΚΟΠΗΣΗΣ	Μέση Τιμή	1,7094	1,8257	1,7557
	Εύρος	1,3 – 2,6	1,3 – 3,2	1,3 – 3,2
ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΩΝ	Μέση Τιμή	2,8491	2,3714	2,6591
	Εύρος	1 - 5	2 - 5	1 - 5
KVp ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΩΝ	Μέση Τιμή	64,9867	66,5574	65,4387
	Εύρος	55 - 75	56 – 75	55 - 75
mAs ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΩΝ	Μέση Τιμή	7,6430	9,3808	8,2594
	Εύρος	2,8 - 18	3,62 – 34,5	2,8 – 34,5

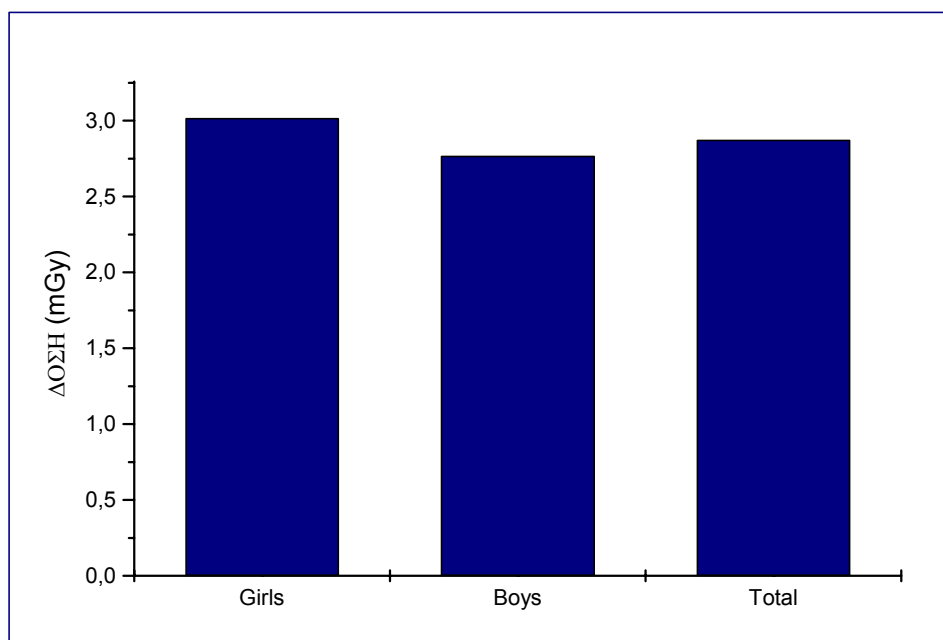
Πίνακας 6.14 Αποτελέσματα μετρήσεων εξετάσεων κυστεογραφίας

Παρατηρούμε πως οι τιμές των παραμέτρων εξέτασης κυμαίνονται περίπου στα ίδια πλαίσια τόσο για τα αρρένα όσο και για τα θήλεα που εξετάστηκαν. Ο αριθμός των ακτινογραφιών, όπως έχει αναφερθεί, είναι μεγαλύτερος κατά την εξέταση αρσενικών ατόμων, σύμφωνα με τη φιλοσοφία της εξέτασης. Κατόπιν αυτού, και ο συνολικός χρόνος ακτινοσκόπησης, είναι λίγο μεγαλύτερος απ' τον αντίστοιχο κατά την υποβολή θηλέων στην ίδια εξέταση. Ωστόσο, αν εξαιρέσουμε αυτές τις δύο παραμέτρους, παρατηρείται μια αυξητική τάση όλων των υπολοίπων παραμέτρων της εξέτασης, στις περιπτώσεις που αφορούν εξέταση θηλυκών ατόμων. Βασιζόμενοι στο συγκεκριμένο γεγονός, αναμένουμε τη καταγραφή υψηλότερης τιμής δόσης για τα εξεταζόμενα άτομα θηλυκού φύλου, κάτι που επιβεβαιώνεται με την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων και τον υπολογισμό της ληφθείσας δόσης. Πράγματι,

λοιπόν, στον πίνακα και το αντίστοιχο γράφημα που ακολουθούν, διαφαίνεται ότι τα θηλυκά άτομα απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό ακτινοβολίας, λαμβάνοντας κατά συνέπεια, ελαφρώς υψηλότερη δόση σε σχέση με τα εξεταζόμενα άτομα αρσενικού φύλου. Αυτό, ωστόσο, δικαιολογείται, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις εξέτασης αγοριών, η μια εκ των δύο δυάδων TLD100 που χρησιμοποιούνται για τη καταγραφή της τιμής της δόσεως που απορροφάται, βρίσκεται στα όρια ή και εκτός του πεδίου ακτινοβολήσης.

ΔΟΣΕΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ (mGy)		
ΑΡΡΕΝΑ	Μέση Τιμή	2,769
	Εύρος	0,254 – 9,691
ΘΗΛΕΑ	Μέση Τιμή	3,017
	Εύρος	0,623 – 9,583
ΣΥΝΟΛΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ	Μέση Τιμή	2,875
	Εύρος	0,254 – 9,691

Πίνακας 6.15 Δόσεις νεογνών ανά φύλο και συνολικά



Γράφημα 6.17 Δόσεις εξεταζόμενων συνολικά και ανά φύλο

Ο συντελεστής κινδύνου για θανατηφόρο καρκίνο σε παιδιά κάτω των 10 ετών, εκτιμάται στα $12 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ (σύμφωνα με το NRPB Report 260 και BEIR V Committee Report 1990). Έτσι, η πιθανότητα θανατηφόρου καρκίνου για τα παιδιά που εξετάστηκαν είναι συνολικά 0,345, και επιμέρους για τα κορίτσια 0,36204, και για τα αγόρια 0,33228.

6.4 ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Είναι απαραίτητο στο σημείο αυτό, να αναφερθούμε στο σύνολο και τα είδη των σφαλμάτων που υπεισέρχονται καθ' όλη τη φάση του πειραματικού μέρους, από την προετοιμασία των υλικών που χρησιμοποιήσαμε έως και τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων, συμπεριλαμβανομένου, βέβαια, και όλων των ενδιάμεσων σταδίων. Πρόκειται, σε γενικές γραμμές, για σφάλματα προερχόμενα από τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε και τα όργανα επεξεργασίας αυτών, αλλά και από τη μέθοδο συλλογής, μέτρησης και επεξεργασίας δεδομένων, όπως και τη διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών βαθμονόμησης, όσο αφορά το 1^ο μέρος του πειράματος ή των δόσεων, όσο αφορά τα υπόλοιπα δύο μέρη αυτού. Η αναφορά σε πιθανά σφάλματα, που μπορεί να επηρέασαν τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων μας, είναι σημαντική, καθώς αποτελεί κριτήριο αξιοπιστίας αυτών. Έτσι, πιο συγκεκριμένα, πιθανολογούνται:

- Σφάλματα εξαιτίας της διαφορετικής τιμής συντελεστού βαθμονόμησης μεταξύ των TLDs της ίδιας ομάδας, καθώς όπως γνωρίζουμε, η χρησιμοποιούμενη τιμή συντελεστή ευαισθησίας συμπίπτει με τη μέση τιμή των επιμέρους αντίστοιχων τιμών των δοσιμέτρων, που την αποτελούν. Φυσικά, η τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή είναι συνήθως μικρή, ωστόσο, ικανή να δημιουργήσει σφάλματα στις μετρήσεις μας.

- Σφάλματα εξαιτίας της εξασθένησης του σήματος θερμοφωταύγειας (fading) ή οφειλόμενα σε απορρόφηση οπτικής ακτινοβολίας. Για την αποφυγή των παραπάνω σφαλμάτων έγινε προσεκτική χρήση των TLDs καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, φροντίσαμε να γίνεται συχνός καθαρισμός των δοσιμέτρων από τη σκόνη και να ακολουθείται πιστά, με απόλυτη επαναληψιμότητα, το πρωτόκολλο ανόπτησης και η διαδικασία προθέρμανσής τους. Επίσης, φροντίσαμε η ανάγνωση

του TL σήματος των δοσιμέτρων να γίνεται σχεδόν αμέσως μετά την ακτινοβόλησή τους, και ιδιαίτερα για τα TLD200. Τέλος, προκειμένου να μειωθεί ή και να αποκλειστεί εντελώς η πιθανότητα απορρόφησης οπτικής ακτινοβολίας, τα TLDs φυλάσσονταν σε ειδικά φιαλίδια και πάντα σε σκοτεινό μέρος έως ότου χρησιμοποιηθούν.

- Σφάλματα λόγω του σήματος υποβάθρου, το οποίο αν και είχε πολύ μικρή τιμή, της τάξεως των pC, ωστόσο, προκαλούσε μια μικρή αβεβαιότητα στην ανάγνωση του πραγματικού TL σήματος του δοσιμέτρου. Κι αυτή η αβεβαιότητα γινόταν ακόμη πιο έντονη, όταν παρουσιάζονταν διακυμάνσεις μεταξύ των 3 τιμών του σήματος υποβάθρου, τις οποίες λαμβάναμε, πριν από την έναρξη ανάγνωσης κάθε πακέτου δοσιμέτρων, καθώς τότε ενισχυόταν η περίπτωση ύπαρξης στατιστικού σφάλματος. Κατά τη διάρκεια της παρούσας μελέτης, ωστόσο, οι διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών του υποβάθρου που παρουσιάστηκαν ήταν αρκετά μικρές, ενώ ταυτόχρονα, φροντίζαμε να ελαχιστοποιούμε το σφάλμα αφαιρώντας τη μέση τιμή τους από το TL σήμα κάθε δοσιμέτρου.

- Σφάλματα οφειλόμενα στη κακή λειτουργία της συσκευής ανάγνωσης (TLD Reader), τα οποία όμως θεωρούνται αμελητέα, καθώς πραγματοποιούνταν έλεγχος της κατάστασης της συσκευής και της απόδοσης του Φ/Π πριν από κάθε χρήση της.

- Σφάλματα εξαιτίας στρογγυλοποιήσεων των τιμών, που προέκυπταν κατά την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και τον υπολογισμό των δόσεων και των συντελεστών βαθμονόμησης, τα οποία ήταν βέβαια μικρά, αλλά δεν ανταποκρίνονταν, παρ' όλα αυτά, απόλυτα στην πραγματικότητα.

- Σφάλματα κατά τη διάρκεια των εξετάσεων οισοφαγογραφήματος και κυστεογραφίας, τα οποία αφορούν κατά κύριο λόγο τα τοποθετημένα TLDs στο σώμα των εξεταζόμενων. Τα εξεταζόμενα άτομα, λόγω ηλικίας, δε συνεργάζονταν απόλυτα για την ομαλή έκβαση της εξέτασης, με αποτέλεσμα κάποιες φορές να μετατοπιστούν τα TLDs σε διαφορετικό σημείο του σώματός τους, απ' όπου είχαν αρχικά τοποθετηθεί. Έτσι, μερικές φορές κάποιο τμήμα τους βρισκόταν ακόμη και εκτός πεδίου ακτινοβόλησης.

- Σφάλματα κατά τη διάρκεια του 1^{ου} μέρους του πειράματος, κατά τις βαθμονομήσεις των TLD100 και TLD200. Η διαδικασία ακτινοβόλησης, αν και επαναλαμβάνεται κατά τον ίδιο τρόπο, εντούτοις δεν μπορεί να είναι ίδια για όλες τις περιπτώσεις, αν και επιλέγονται ίδια στοιχεία λυχνίας στο ακτινογραφικό μηχάνημα,

πράγμα που επαληθεύεται από τις ενδείξεις του θαλάμου ιονισμού, οι οποίες διαφοροποιούνται ακόμη και με ακτινοβολήση υπό ίδιες συνθήκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοποί της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η εκτίμηση της επίδρασης της γωνίας ακτινοβολήσης στο συντελεστή βαθμονόμησης των TLD100 και TLD200, όπως και ο υπολογισμός της μέσης τιμής και του εύρους της δόσεως, την οποία έλαβαν άτομα βρεφικής και παιδικής ηλικίας, κατά την υποβολή τους σε εξέταση οισοφαγογραφήματος ή κυστεογραφίας. Μετά τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων και μετρήσεων, και τη κατάλληλη επεξεργασία αυτών, καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα.

Όσον αφορά το πρώτο μέρος του πειράματος, το οποίο σχετίζεται με την επιρροή της γωνίας ακτινοβολήσης στο συντελεστή βαθμονόμησης των TLD100 και TLD200, διαπιστώνουμε ότι:

- Ο συντελεστής βαθμονόμησης των TLD100 παραμένει ανεπηρέαστος, σε όποια γωνία ακτινοβολήσης και αν τα υποβάλουμε. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν βαθμονομήσεις υπό γωνίες 0°, 25°, 45°, 70° και 90°. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν ικανά να μας οδηγήσουν σε κάποιο άλλο ασφαλές συμπέρασμα, δεδομένου ότι οι μικρές διακυμάνσεις στις τιμές που παρουσιάστηκαν, είναι απόρροια τυχόν σφαλμάτων και του γεγονότος πως αν και η διαδικασία που ακολουθήθηκε σε όλες τις βαθμονομήσεις έγινε με τον ίδιο τρόπο, δεν ήταν δυνατό να είναι πάντα η ίδια.

- Αντίθετα με τα TLD100, στα TLD200 φαίνεται να υπάρχει μια επιρροή στο συντελεστή βαθμονόμησης τους, όσο μεταβάλλεται η γωνία της δέσμης ακτινοβολίας, στην οποία υποβάλλονται. Πιο συγκεκριμένα, για μικρές γωνίες, η τιμή του συντελεστή ευαισθησίας εμφανίζεται ανεπηρέαστη. Επηρεάζεται, όμως, για μεγάλες γωνίες, και μάλιστα η τιμή του διπλασιάζεται, όταν ακτινοβολούνται υπό γωνία 90°.

- Τέλος, διαπιστώνουμε ότι και για τα δύο είδη TLDs ισχύει γραμμικότητα. Αυτό σημαίνει ότι, αύξηση στα KV ή τα mAs της δέσμης της ακτινοβολίας συνεπάγεται με αύξηση του συντελεστή βαθμονόμησης των υπό ακτινοβολήση TLDs, ανεξάρτητα από τη γωνία υπό την οποία πραγματοποιείται η ακτινοβολήσή τους.

Το οισοφαγογράφημα είναι μια σύνθετη ακτινοδιαγνωστική εξέταση, που περιλαμβάνει δύο μέρη και πραγματοποιείται με σκοπό τον έλεγχο της φυσιολογίας και της λειτουργίας του πεπτικού συστήματος. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης πραγματοποιήθηκαν 11 εξετάσεις, που αφορούσαν νεογνά και των δύο φύλων, ηλικίας από 16 ημερών έως 10 μηνών. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

- Τα άρρενα νεογνά που υποβλήθηκαν στην συγκεκριμένη εξέταση έλαβαν υψηλότερη δόση σε σχέση με τα θήλεα νεογνά, τόσο κατά το 1^ο όσο και κατά το 2^ο μέρος της εξέτασης, και άρα συνολικά.

- Η απορροφούμενη δόση κατά την ύπτια θέση, δηλαδή κατά το 2^ο μέρος της εξέτασης, εκτιμήθηκε μεγαλύτερη και για το κάθε φύλο ξεχωριστά, αλλά και συνολικά, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές δόσεως του 1^{ου} μέρους. Το συγκεκριμένο οφείλεται στη μεγαλύτερη εναπόθεση ενέργειας, η οποία ευνοείται λόγω της θέσεως, καθώς υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τους ιστούς και τα όργανα, αλλά και της ανατομικής μορφής των τελευταίων. Για το λόγο αυτό θα ήταν ίσως χρήσιμο να μειωθεί, όσο αυτό είναι δυνατό, η διάρκεια της ύπτιας προβολής, χωρίς, ωστόσο, αυτό να συνεπάγεται τη μείωση της ποιότητας ή του ελλείμματος της διαγνωστικής διαδικασίας.

- Η περίπτωση πρόκλησης θανατηφόρου καρκίνου σε κάποιο από τα νεογνά που ακτινοβολήθηκαν κατά την υποβολή τους στην εξέταση οισοφαγογραφήματος, δεν μπορεί να αποκλειστεί όποια και αν είναι η τιμή της δόσης που απορρόφησε. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τον ομώνυμο συντελεστή του NRPB Report 260 και BEIR V Committee Report 1990, που είναι περίπου ίσος με $12 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ για παιδιά μικρότερα των 10 ετών, η πιθανότητα για θανατηφόρο καρκίνο είναι για τα άρρενα νεογνά 0,42276, για τα θήλεα 0,32196, και για το σύνολο των νεογνών 0,35772.

- Οι δόσεις που λαμβάνουν οι συνοδοί, λόγω σκέδασης της ακτινοβολίας, κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή δόσεως που λαμβάνει ο κορμός του σώματος είναι 0,02018mGy (με εύρος τιμών 0,0067-0,0356mGy) ενώ αντίστοιχα, για το χέρι είναι 0,043382mGy (με εύρος τιμών 0,0098-0,083mGy). Η δόση στον κορμό του σώματος είναι πολύ μικρή και επίσης δεν προβληματίζει καθόλου, καθώς ο κορμός είναι προστατευμένος με τη μολύβδινη ποδιά, την οποία υποχρεούνται να φέρουν οι συνοδοί, καθ' όλη τη διάρκεια της εξέτασης. Όσον αφορά το χέρι, όμως, η δόση είναι μεγαλύτερη και μάλιστα διπλασιάζεται, πράγμα που οφείλεται στο ότι αυτό κινείται κοντά στο πεδίο

ακτινοβόλησης, προκειμένου να χορηγήσει τη σκιαγραφική ουσία στο νεογνό. Αν και ίσως θα έπρεπε να λαμβάνονται και μέτρα προστασίας αυτού (π.χ. να καλύπτεται με αντίστοιχη ειδική μολύβδινη κατασκευή), ωστόσο, ο κίνδυνος θεωρείται ανεκτός καθώς δεν επηρεάζονται ζωτικά όργανα.

Η κυστεογραφία είναι μια ακτινοδιαγνωστική εξέταση, που πραγματοποιείται με σκοπό τον έλεγχο της φυσιολογίας και της λειτουργίας του ουροποιητικού συστήματος. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 88 εξετάσεις κυστεογραφίας που αφορούσαν κατά πλειοψηφία νεογνά, αλλά και μικρά παιδιά, και των δύο φύλων. Τα συμπεράσματα, στα οποία καταλήξαμε είναι τα εξής:

- Η διαδικασία της εξέτασης είναι ίδια και για τα δύο φύλα. Ωστόσο, ο αριθμός των ακτινογραφιών που λαμβάνονται κατά την υποβολή αρσενικών ατόμων σ' αυτήν, είναι μεγαλύτερος· κάτι που αιτιολογείται λαμβάνοντας υπ' όψιν τη φιλοσοφία της εξέτασης. Κατά συνέπεια, η μέση τιμή του χρόνου ακτινοσκόπησης είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση εξέτασης ατόμων αρσενικού φύλου. Παρ' όλα αυτά, η μέση τιμή απορροφούμενης δόσης εμφανίζεται πιο αυξημένη για τα θήλεα: 3, 017mGy έναντι 2,769mGy για τα άρρενα. Αυτό, ωστόσο, δικαιολογείται, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις εξέτασης αγοριών, η μια εκ των δύο δυάδων TLD100 που χρησιμοποιούνται για τη καταγραφή της τιμής της δόσεως που απορροφάται, βρίσκεται στα όρια ή και εκτός του πεδίου ακτινοβόλησης.

- Τα αποτελέσματα της ακτινοβόλησης στους όρχεις και στις ωοθήκες εξαρτώνται από τη δόση και την ηλικία. Η δόση που απαιτείται για την αναστολή της λειτουργίας των ωοθηκών είναι για τα κορίτσια 20Gy. Μόνιμη στειρότητα εμφανίζεται περίπου στο 1/3 των κοριτσιών και στο σύνολο των γυναικών ηλικίας άνω των 40 ετών, όταν ακτινοβοληθούν οι ωοθήκες με 4Gy. Για δόση 3Gy και στις δύο ωοθήκες παρατηρείται αμηνόρροια στα 2/3 των κοριτσιών που ακτινοβολήθηκαν και στο 10% των γυναικών που κατά την παιδική ηλικία είχαν ακτινοβοληθεί με μέση δόση ωοθηκών 0,5Gy. Η λειτουργία των όρχεων μπορεί να ανασταλεί και με δόση 0,5Gy, ενώ ολόσωμη ακτινοβόληση 10Gy προκαλεί βασικές βλάβες στους όρχεις αγοριών.

Η μέση τιμή δόσεως που καταγράφηκε για τα κορίτσια, κατά την υποβολή τους σε εξέταση κυστεογραφίας, είναι 3,017mGy, ενώ η αντίστοιχη για τα αγόρια 2,769mGy. Παρατηρούμε πως οι δόσεις που καταγράφηκαν είναι πολύ μικρές, της

τάξεως των mGy, άρα ο κίνδυνος για πρόκληση βλαβών στις ωοθήκες και τους όρχεις είναι ανεκτός.

- Η πιθανότητα καρκινογένεσης είναι ένας παράγοντάς που υπάρχει πάντα, καθώς δεν μπορεί να αποκλειστεί ακόμη και αν η δόση που λαμβάνεται είναι πάρα πολύ μικρή. Ο συντελεστής κινδύνου για θανατηφόρο καρκίνο σε παιδιά κάτω των 10 ετών, εκτιμάται στα $12 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ (σύμφωνα με το NRPB Report 260 και BEIR V Committee Report 1990). Έτσι, η πιθανότητα θανατηφόρου καρκίνου για τα παιδιά που εξετάστηκαν είναι συνολικά 0,345, και επιμέρους για τα κορίτσια 0,36204, και για τα αγόρια 0,33228.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Garinou, E., Drikost, G., Hourdakis, C., Hyvonen, H., and Kamenopoulou, V. (2001), *Radiation Protection Dosimetry*, **96**, 205-208.
2. NRPB Report 260 and BEIR V Committee Report, **1990**.
3. Hufton, A.P., *Practical Aspects of Thermoluminescence Dosimetry*; Proceedings of the Hospital Physics, Association meeting on practical Aspects of TLD, **1984**.
4. McKinlay, *Thermoluminescence dosimetry*; Medical Physics Handbook 5, Adam Hilger Ltd, Bristol, **1981**.
5. Martin, A. and Harbison, S.A., *An Introduction to Radiation Protection*; Chapman and Hall Medical, Fourth Edition.
6. Προυκάκης Χ., *Ιατρική Φυσική / Ιατρική Ακτινοφυσική*; Τόμος 1^{ος}, Β' Εκτύπωση, Επιστημονικές Εκδόσεις Γρηγορίου Κ. Παρισιακού, Ναυαρίνου 20, Αθήνα **1985**.
7. Ψαρράκος Κ., *Ιατρική Φυσική*, τόμος Α, Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη **1997**.
8. Αργύρης Ι, Κοτσιφάκη Ε., Μαργαρή Ν., Μάρκου Σ., Παπαδόπουλος Ν., Παπαφίλης Α., Παταργιάς Θ., Σέκερης Κ., 1^η Έκδοση, *Βιολογία*, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων, Αθήνα, **1992**.
9. Περισυνάκης Κ., *An Analysis of Radiation Doses to Embryo from Common Radiological Procedures*, Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης, **1995**, Τμήμα Ιατρικής, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών.
10. Φασουλάκη Μ., *Μέτρηση Δόσης σε Κόμμα κατά τη Διαδερμική Τοποθέτηση Φίλτρου Κάτω Κοίλης στη Μητέρα*, Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης, Διαπανεπιστημιακό Διατμηματικό Πρόγραμμα Σπουδών στην Ιατρική Φυσική-Ακτινοφυσική, Τμήμα Ιατρικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης, **2003**.
11. Κουρμπέτης Ν., *Υπολογισμός Ενεργού Δόσεως Ακτινοβολίας από Ακτινοδιαγνωστικές Εξετάσεις σε Παιδιά, με Χρήση Κρυστάλλων Θερμοφωταύγειας (TLD's)*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης, **2003**.
12. Καλαιτζάκη Μ, *Thermoluminescent Dosimetry*, Αθήνα, **2002**.

13. Δαμηλάκης, Ι. Περισυνάκης Κ., Μαρής Θ., Μαζωνάκης Μ., Θεοχαρόπουλος Ν., Σημειώσεις μαθήματος *‘Φυσική και Οργανολογία της Ιατρικής Απεικόνισης’*, Τμήμα Τεχνολογίας Ιατρικών Συστημάτων, ΑΤΕΙ Κρήτης.
14. Δαμηλάκης, Ι. Περισυνάκης Κ., Μαρής Θ., Μαζωνάκης Μ., Θεοχαρόπουλος Ν., Σημειώσεις μαθήματος *‘Ειδικές Εφαρμογές Ιατρικής Οργανολογίας’*, Τμήμα Τεχνολογίας Ιατρικών Συστημάτων, ΑΤΕΙ Κρήτης.
15. Δαμηλάκης, Ι. Περισυνάκης Κ., Μαρής Θ., Μαζωνάκης Μ., Θεοχαρόπουλος Ν., Σημειώσεις μαθήματος *‘Εφαρμογές Ιατρικής Πληροφορικής’*, Τμήμα Τεχνολογίας Ιατρικών Συστημάτων, ΑΤΕΙ Κρήτης.
16. Καμενοπούλου Β., Σημειώσεις Μαθήματος *‘Δοσιμετρία Προσωπικού’*, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΕΠΕΑΕΚ) στην Ιατρική Φυσική-Ακτινοφυσική, Καπποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, **2001-2002**.
17. Τζων ΚΑΛΕΦ-ΕΖΡΑ, Σημειώσεις Μαθήματος *‘Εισαγωγή στη Δοσιμετρία Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών’*, Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, **2002**.