



ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΥΠΟΓΟΝΙΜΟΤΗΤΑ» «RADIATION AND INFERTILITY»

υπό

ΘΕΟΔΩΡΟ ΧΗΡΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Φυσικές Αρχές Βιοϊατρικής Απεικόνισης και Ακτινοπροστασία»

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή
Κάππας Κωνσταντίνος, Ομ. Καθηγητής ΤΙ ΠΘ
Θεοδώρου Κυριακή, Καθηγήτρια ΤΙ ΠΘ
Τσούγκος Ιωάννης, Καθηγητής ΤΙ ΠΘ

Λάρισα, 2023

Ευχαριστίες

Στον καθηγητή μας κ. Ιωάννη Τσούγκο για τις πολύτιμες συμβουλές, συστάσεις και γνώσεις που μας πρόσφερε καθ' όλη την διάρκεια των μεταπτυχιακών μας σπουδών. Στους καθηγητές μας για την συνεχόμενη έμπνευση, πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση και στήριξη τους. Στην αγαπημένη μου σύζυγο και στον αγαπημένο μας γιο.

Περιεχόμενα

Εξώφυλλο	1
Ευχαριστίες	2
Περιεχόμενα.....	3
Περίληψη	4
Abstract	5
Σκοπός.....	6
Μεθοδολογία.....	6
Αποτελέσματα βιβλιογραφικής ανασκόπησης	7
Ιστορική αναδρομή	7
Τύποι Ακτινοβολίας.....	8
Συμπεριφορά ενός σωματιδίου στην ύλη	10
Ορισμοί Δόσης, Ισοδύναμης Δόσης και Ενεργούς Δόσης.	11
Βιολογικά αποτελέσματα Ιοντίζουσων ακτινοβολιών.....	13
Ανδρικό γεννητικό σύστημα και σπερματογένεση.....	15
Γυναικείο γεννητικό σύστημα και ωογένεση	17
Επίδραση ακτινοβολίας στα γεννητικά κύτταρα	18
Επιδιορθωτικοί μηχανισμοί κυττάρων.....	20
Ακτινοβολία και ανδρική υπογονιμότητα.....	20
Ακτινοβολία και γυναικεία υπογονιμότητα	23
Υπογονιμότητα και Περιβαλλοντικοί – Επαγγελματικοί παράγοντες.....	25
Επιπτώσεις πυρηνικού ατυχήματος του Chernobyl στην γονιμότητα	26
Διεθνή συστήματα Ακτινοπροστασίας	27
Βασικές αρχές ακτινοπροστασίας.....	28
Μέτρηση ατομικών δόσεων.....	30
Μέτρα ακτινοπροστασίας εργαζομένων	31
Προστασία κοινού πληθυσμού	33
Ακτινοπροστασία στον τομέα της πυρηνικής ιατρικής	33
Οδηγίες διασφάλισης γονιμότητας ασθενών που εκτίθενται σε ακτινοθεραπεία.....	35
Αποτελέσματα.....	36
Μελλοντικοί στόχοι	37
Βιβλιογραφία	39

Περίληψη

Στο περιβάλλον η ακτινοβολία μπορεί να βρεθεί σε διάφορες πηγές, είτε φυσικές είτε τεχνητές, συμπεριλαμβανομένων των ιατρικών διαδικασιών, των επαγγελματικών εκθέσεων καθώς και των φυσικών φαινομένων. Είναι ευρέως γνωστό ότι η ακτινοβολία μπορεί να έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, συμπεριλαμβανομένης και της αναπαραγωγικής υγείας. Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει να διερευνήσει τη σχέση μεταξύ ακτινοβολίας και υπογονιμότητας, εστιάζοντας στους μηχανισμούς με τους οποίους επηρεάζει τη γονιμότητα, τα πλαίσια αξιολόγησης κινδύνου και τις στρατηγικές για τον μετριασμό των πιθανών κινδύνων. Εξετάζοντας σχετική βιβλιογραφία, μέσω των ερευνητικών αποτελεσμάτων, αυτή η διπλωματική εργασία παρέχει μια εις βάθος ανάλυση του θέματος και προσφέρει πληροφορίες που βοηθούν στην κατανόηση του μηχανισμού πρόκλησης υπογονιμότητας από την εκτιθέμενη ακτινοβολία.

Abstract

Radiation is a pervasive environmental factor with various sources, including medical procedures, occupational exposures, and natural phenomena. It has long been recognized that radiation can have detrimental effects on human health, including reproductive health. This diploma thesis aims to explore the relationship between radiation and infertility, focusing on the mechanisms by which radiation affects fertility, the existing risk assessment frameworks, and the strategies for mitigating the potential risks. By examining relevant literature and research findings, this thesis provides an in-depth analysis of the topic and offers insights into the current understanding of radiation-induced infertility.

Σκοπός

Στην σημερινή εποχή πολλοί παράγοντες ευθύνονται για την πρόκληση υπογονιμότητας, ένας εκ των οποίων είναι και η έκθεση στην ακτινοβολία. Σκοπός της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι η μελέτη της επίδρασης της ακτινοβολίας στην πρόκληση υπογονιμότητας τόσο σε άρρενες, όσο και σε θήλεα. Μέσα από την διπλωματική εργασία θα μπορεί τόσο ο εργαζόμενος σε επαγγέλματα που χρησιμοποιούν ακτινοβολία, να ενημερωθεί και να λάβει τα απαραίτητα μέτρα για την προστασία του, όσο και ο κοινός πληθυσμός ο οποίος άθελα του μπορεί να εκτεθεί και να έρθει αντιμέτωπος με κάποιες από τις επιβλαβείς επιπτώσεις της ακτινοβολίας. Τέλος, ως ακτινολόγος οφείλω να ομολογήσω πως πριν από τις σπουδές μου στο πρόγραμμα των μεταπτυχιακών σπουδών «Φυσικές Αρχές Βιοϊατρικής Απεικόνισης και Ακτινοπροστασία», ότι οι γνώσεις μου περί ακτινοπροστασίας ήταν ελλιπείς και έθετα σε κίνδυνο τον εαυτό μου και τους ασθενείς μου. Γι' αυτό τον λόγο θέλω να καταστήσω σαφές, πόσο πολύτιμη είναι η σωστή γνώση, για την ασφάλεια τόσο των συναδέλφων ιατρών όσο και των ασθενών μας.

Μεθοδολογία

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τυχαιοποιημένες και μη-τυχαιοποιημένες ελεγχόμενες έρευνες (randomized-controlled trials - RCTs and nonrandomized controlled trials), μελέτες ασθενών/ομάδας ελέγχου (case control studies), προοπτικές μελέτες (cohort studies), πειραματικές, *in vivo* και *in vitro* μελέτες, μετα-αναλύσεις (metanalysis) καθώς και βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις (systematic reviews). Από την παρούσα εργασία αποκλείστηκαν οι παρουσιάσεις μεμονωμένων περιστατικών (case reports), τα κύρια άρθρα, άρθρα γνώμης καθώς και άρθρα σχολίου (editorial / comments). Οι ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές εύρεσης μελετών-εργασιών ήταν: Pubmed/NCBI, Google Scholar, NIH και Cochrane Library. Για το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας χρησιμοποιήθηκε υλικό των μαθημάτων του μεταπτυχιακού προγράμματος «Φυσικές Αρχές Βιοϊατρικής Απεικόνισης και Ακτινοπροστασία». Ανευρέθησαν μελέτες στις διαθέσιμες βάσεις δεδομένων από το 1989 έως το 2023. Οι

λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν Radiation, Infertility, reproductive system, radioprotection. Τα άρθρα τα οποία τελικά συμπεριλήφθηκαν στην μελέτη ήταν 37.

Αποτελέσματα βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Ιστορική αναδρομή

Από την αρχαιότητα οι φιλόσοφοι και κυρίως οι Αρχαίοι Έλληνες έδειξαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην κατανόηση της σύστασης της ύλης του σύμπαντος. Μελετητές της επιστήμης προσπάθησαν να μάθουν περισσότερα για το άτομο και τον έλεγχο αυτού. Ενώ, οι ανακαλύψεις αυτές έφεραν οφέλη στην ενέργεια και στις ιατρικές εφαρμογές αποκάλυψαν επίσης τους πιθανούς κινδύνους της έκθεσης στην ακτινοβολία. Οι πρώτοι ερευνητές στην ακτινοβολία, όπως ο βοηθός του Thomas Edison's έχασε την ζωή του από καρκίνο, λόγω της υπερβολικής του έκθεσης σε ακτίνες X. Ένα ακόμη παράδειγμα επίδρασης της ακτινοβολίας είναι πρόκληση θανατηφόρου αναιμίας και σοβαρών προβλημάτων στην στοματική κοιλότητα γυναικών οι οποίες εργαζόντουσαν σε εργοστάσια στα οποία έκαναν χρήση βαφής ραδίου σε ρολόγια για να φωσφορίζουν στο σκοτάδι.[1]



Εικ.1 εργαζόμενες σε εργοστάσιο παραγωγής φθοριζόντων ρολογιών. Πηγή υλικό μεταπτυχιακών σπουδών [1]

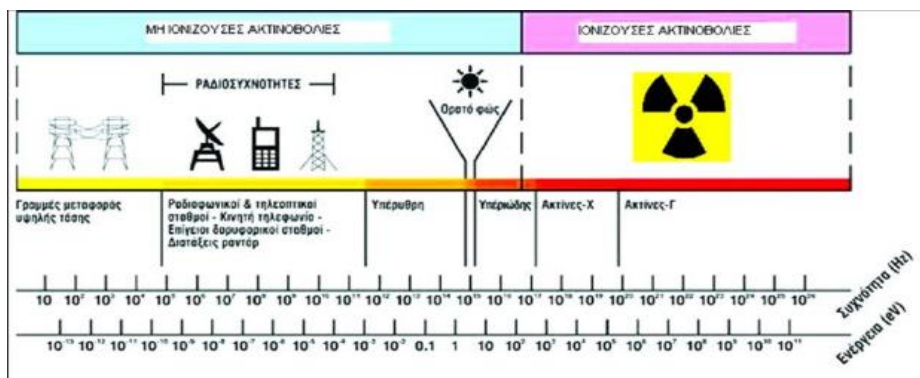
Το 1915 η British Roentgen Society έλαβε μέτρα για την προστασία των ανθρώπων από την υπερβολική έκθεση σε ακτίνες X, σηματοδοτώντας μια από τις πρώτες

οργανωμένες προσπάθειες για την προστασία από την ακτινοβολία. Μεταξύ του 1920 και του 1930, οι επιστήμονες άρχισαν να μελετούν την επίδραση της ακτινοβολίας στους ζωντανούς οργανισμούς. Το 1959, δημιουργήθηκε το 'Federal Radiation Council' (Ομοσπονδιακό Συμβούλιο Ακτινοβολίας) για να συμβουλευεί τον πρόεδρο των ΗΠΑ, για θέματα σχετικά με την επίδραση της ακτινοβολίας στο περιβάλλον, να παρέχει καθοδήγηση στις ομοσπονδιακές υπηρεσίες σχετικά με τα πρότυπα ακτινοπροστασίας και να συνεργάζεται με τις πολιτείες σε θέματα που αφορούν την ακτινοβολία. Το 1970 ιδρύθηκε η U.S. Environmental Protection Agency (EPA), ως η κύρια ομοσπονδιακή υπηρεσία, η οποία είναι υπεύθυνη για την προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος από την έκθεση σε ακτινοβολία. Η διεύθυνση ακτινοπροστασίας της EPA θέτει πρότυπα, διαχειρίζεται ομοσπονδιακά προγράμματα, προσφέρει καθοδήγηση και εκπαίδευση αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. [2]

Τύποι Ακτινοβολίας

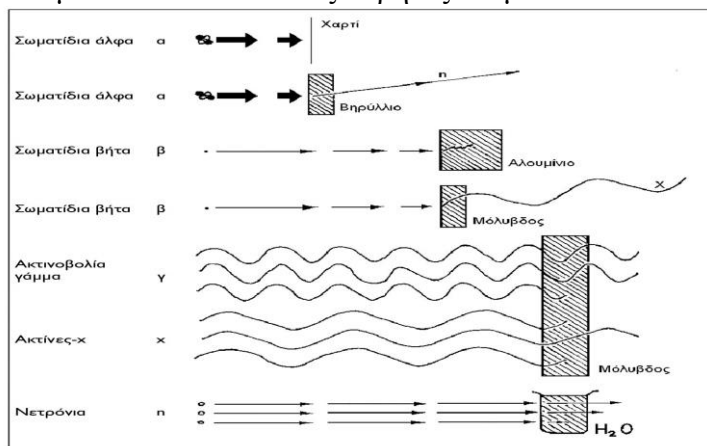
Η μη ιοντίζουσα, επίσης γνωστή ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, είναι μια μορφή ακτινοβολίας που μεταφέρει χαμηλή ενέργεια και δεν προκαλεί ιονισμό, αλλά μπορεί να έχει ηλεκτρικές, χημικές και θερμικές επιδράσεις στον οργανισμό. Αυτή η ακτινοβολία διαδίδεται στο χώρο υπό μορφή κύματος ως ταλάντωση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Ανάλογα με τη συχνότητα ή το μήκος του κύματος, διακρίνονται διάφορες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Σε αυτές τις ακτινοβολίες περιλαμβάνονται τα στατικά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δεν αλλάζουν και δεν παράγουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Παραδείγματα αυτών περιλαμβάνουν το φυσικό μαγνητικό πεδίο της Γης, τα χαμηλής συχνότητας (50 Hz) ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που προκαλούνται από ηλεκτρικές συσκευές, υποσταθμούς και δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ραδιοκύματα και μικροκύματα από εκπομπές τηλεοπτικών και ραδιοφωνικών κεραιών, φούρνους μικροκυμάτων, καθώς και το ορατό φως και μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας.



Εικ.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, Ιοντίζουσα και μη Ιοντίζουσα Ακτινοβολία.

Οι ακτινοβολίες που μεταφέρουν ενέργεια ικανή να διεισδύσει στην ύλη, να προκαλέσει ιονισμό των ατόμων, βίαιη διάσπαση χημικών δεσμών και βιολογικές βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό είναι γνωστές ως ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Ο ιοντισμός ενός ουδέτερου ατόμου συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρόνιο απομακρύνεται βίαια από τον πυρήνα και κατ'έπекταση από τις στοιβάδες του, εξαιτίας εξωτερικής επίδρασης, με αποτέλεσμα την δημιουργία δύο αντίθετα φορτισμένων ιόντων, ενός θετικά φορτισμένου ατόμου και ενός αρνητικά φορτισμένου ηλεκτρονίου. Παραδείγματα γνωστών ιοντίζουσών ακτινοβολιών περιλαμβάνουν τις ακτίνες X, που ευρέως χρησιμοποιούνται στην ιατρική, καθώς και τις ακτινοβολίες α, β και γ που εκπέμπονται από ασταθείς πυρήνες ατόμων.



Εικ.3 Τύποι ακτινοβολίας και διεισδυτικότητά τους. Εικόνα από Wikipedia

Ακτινοβολία α: Αυτή η σωματιδιακή ακτινοβολία αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Διακρίνεται για τη χαμηλή ικανότητα διείσδυσης, και μπορεί να ανακοπεί από ένα φύλλο χαρτί. Ανιχνεύεται δύσκολα και αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την εσωτερική έκθεση. [3]

Ακτινοβολία β: Πρόκειται για σωματιδιακή ακτινοβολία που αποτελείται από αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια ή θετικά φορτισμένα ποζιτρόνια. Έχει μεγαλύτερο βαθμό διείσδυσης από την ακτινοβολία α, αλλά μπορεί να ανακοπεί από πλαστικά ή λεπτά μεταλλικά φύλλα. Συνιστά κίνδυνο για τους οφθαλμούς και το δέρμα από εξωτερική

έκθεση και επίσης αποτελεί κίνδυνο για την εσωτερική έκθεση. Η δυνατότητα ανίχνευσής της εξαρτάται από την ενέργεια των σωματιδίων β . [3]

Ακτινοβολία X ή γ : Πρόκειται για ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ενέργεια που μπορεί να προκαλέσει ιονισμό. Ο αποκλεισμός την εκπεμπόμενης ακτινοβολίας πραγματοποιείται με χρήση χάλυβα, μολύβδου ή σκυροδέματος (ή συνδυασμό αυτών). Έχει μεγαλύτερη διεισδυτικότητα από την ακτινοβολία β και αποτελεί κίνδυνο για εξωτερική και εσωτερική έκθεση. Μπορεί να ανιχνευθεί πιο εύκολα από την ακτινοβολία α και β . [3]

Συμπεριφορά ενός σωματιδίου στην ύλη

Η πιθανότητα και ο τρόπος με τον οποίο ένα φωτόνιο χάνει ενέργεια εξαρτώνται από την ενέργεια του φωτονίου και από τον ατομικό αριθμό (Z) του υλικού. Τα φωτόνια, που προσπίπτουν στην ύλη, μπορεί να τη διαπεράσουν, να σκεδαστούν ή να απορροφηθούν [4]. Υπάρχουν τέσσερις κύριοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης φωτονίων με την ύλη:

- σκέδαση Rayleigh
- φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- σκέδαση Compton
- δίδυμη γένεση

Πιο αναλυτικά:

-Κατά τη σκέδαση Rayleigh, το φωτόνιο που προσπίπτει αλληλεπιδρά με όλο το άτομο και το διεγείρει. Τα σκεδαζόμενα φωτόνια σκεδάζονται σε μικρές γωνίες ως προς την αρχική τους κατεύθυνση. Το φαινόμενο έχει σημασία και συνυπολογίζεται σε κάποιες περιοχές χαμηλών ενεργειών φωτονίων που χρησιμοποιούνται στην ακτινοδιαγνωστική όπως στη μαστογραφία (15-30 keV). Κατά τη σκέδαση Rayleigh δεν εκπέμπονται ηλεκτρόνια και δε συμβαίνει ιοντισμός.

-Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όλη η ενέργεια του φωτονίου που προσπίπτει, μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο, το οποίο αποχωρίζεται από το άτομο του υλικού με κινητική ενέργεια ίση με την ενέργεια του φωτονίου μείον την ενέργεια σύνδεσης που είχε το ηλεκτρόνιο στο άτομο. Η πιθανότητα φωτοηλεκτρικής απορρόφησης ανά

μονάδα μάζας εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό Z του υλικού και την ενέργεια E του προσπίπτοντος φωτονίου, συγκεκριμένα είναι ανάλογη του Z^3/E^3 .

-Η σκέδαση Compton αποτελεί μια μη ελαστική αλληλεπίδραση μεταξύ φωτονίων και ύλης και είναι η κυρίαρχη μορφή αλληλεπίδρασης των φωτονίων με μαλακούς ιστούς στις ενέργειες που χρησιμοποιούνται στη διαγνωστική ακτινολογία. Πρόκειται βασικά για συγκρούσεις με τα χαλαρά δεσμευμένα στις εξωτερικές τροχιές ηλεκτρόνια. Το προσπίπτον φωτόνιο αποκλίνει κατά γωνία θ . Μέρος της ενέργειάς του μεταφέρεται στο «ελεύθερο ηλεκτρόνιο». Το ηλεκτρόνιο απορροφείται σχεδόν αμέσως από τα γύρω ιόντα του περιβάλλοντος. Το διαχεόμενο φωτόνιο συγκρατεί ένα μεγάλο ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας και επανασυγκρούεται με άλλα ηλεκτρόνια. Η σκέδαση Compton έχει τις μεγαλύτερες πιθανότητες να συμβεί, όταν φωτόνια ενέργειας από 26 keV μέχρι και 30 MeV προσπίπτουν σε μαλακούς ιστούς.

-Η δίδυμη γένεση λαμβάνει χώρα μόνο αν η ενέργεια του φωτονίου X ή γ είναι μεγαλύτερη από 1,02 MeV. Κατά αυτό το φαινόμενο, πραγματοποιείται αλληλεπίδραση του φωτονίου με το ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα ενός ατόμου και η ενέργειά του μετατρέπεται σε ένα ζεύγος σωματιδίων, ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Η ισοδύναμη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου (και, συνεπώς, του ποζιτρονίου) είναι 0,511 MeV [5].

Ορισμοί Δόσης, Ισοδύναμης Δόσης και Ενεργούς Δόσης.

Ως δόση ορίζεται η ποσότητα ενέργειας που απορροφάται από την προσβαλλόμενη ύλη ανά μονάδα μάζας της από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Άρα πρόκειται για την ενέργεια ανά μονάδα μάζας που εναποτίθεται στο ακτινοβολούμενο υλικό από φορτισμένα σωματίδια(e). Μονάδα απορροφούμενης δόσεως είναι το Gray (Gy) που αντιστοιχεί σε απορροφούμενη ενέργεια 1 Joule/kg προσβαλλόμενης ύλης.

Η ακτινοπροστασία ενδιαφέρεται κυρίως για το βιολογικό αποτέλεσμα που προκλήθηκε από μια δόση. Δεδομένου ότι το βιολογικό αποτέλεσμα εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας γίνεται χρήση ενός άλλου μεγέθους που λέγεται ισοδύναμο δόσεως.

Η ισοδύναμη δόση (H) ορίζεται από το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης (D) επί τον συντελεστή βαρύτητας της ακτινοβολίας (wR), $H = D \times wR$. Μονάδα μέτρησης

είναι το sievert (Sv). Δεδομένου ότι κάθε είδος ακτινοβολίας προκαλεί διάφορα επίπεδα βλάβης στους ιστούς ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης και έχει διαφορετική δραστηριότητα, η ισοδύναμη δόση εξαρτάται όχι μόνο από τον αριθμό της δόσης αλλά και από την ποιότητα της ακτινοβολίας, ώστε να υπολογιστεί το αποτέλεσμα της βιολογικής βλάβης.

Η ενεργός δόση (E_{eff}) περιλαμβάνει την πληροφορία που ορίζεται από το άθροισμα των γινομένων της ισοδύναμης δόσης σε κάθε όργανο ή ιστό που ακτινοβολείται επί τον συντελεστή βαρύτητας (w_T) που του αντιστοιχεί: $E_{eff} = D \times w_R \times w_T$. Ο συντελεστής βαρύτητας θεωρείται η σταθμισμένη δόση ακτινοβολίας ως προς το όργανο ή ιστό. Μονάδα μέτρησης της ενεργούς δόσης ισοδυναμεί με αυτή της ισοδύναμης δόσης (Sv-sievert).

Συμπερασματικά η ενεργός δόση εκφράζει την πληροφορία τόσο του είδους της ακτινοβολίας, όσο και του είδους του ακτινοβοληθέντος ιστού. Η αναφορά στην ενεργό δόση μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε, τον συνολικό κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου από μια δεδομένη ακτινοβολήση, προκειμένου να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας. Συνεπώς, η ενεργός δόση αναπαριστά το μέγεθος που συσχετίζεται με τον συνολικό κίνδυνο για την υγεία, ανεξάρτητα από το είδος της ακτινοβολίας, τις συνθήκες ακτινοβολήσης και το μέρος του ανθρωπίνου σώματος που ακτινοβολείται.[6]

Η επιστημονική κοινότητα χρησιμοποιεί το διεθνές σύστημα μέτρησης ακτινοβολίας (international community measure radiation using the System Internationale, SI) [7], το οποίο είναι ένα ενιαίο σύστημα μέτρησης της ακτινοβολίας (Πιν.1).

	SI Μονάδες μέτρησης*	Συνήθεις μονάδες μέτρησης
Ραδιενέργεια	becquerel (Bq)	curie (Ci)
Απορροφούμενη Δόση	gray (Gy)	rad
Ισοδύναμη Δόση	sievert (Sv)	rem
Εκθεση	coulomb/kilogram (C/kg)	roentgen (R)

Πιν.1 μονάδες μέτρησης, SI

Οι μονάδες ακτινοβολίας ταξινομούνται στις ακόλουθες μονάδες:

-μονάδες ραδιοενεργότητας (radioactivity units) οι οποίες περιλαμβάνουν τις μονάδες Curie και Bequerel

-μονάδες ακτινοβολίας (units of radiation dose) οι οποίες περιλαμβάνουν τις μονάδες Roenten ως μονάδες έκθεσης και ως μονάδες απορρόφησης ακτινοβολίας τις Rad/Grey (Physical dose) και rem/sievert (Biological dose).

Βιολογικά αποτελέσματα Ιοντίζουσων ακτινοβολιών

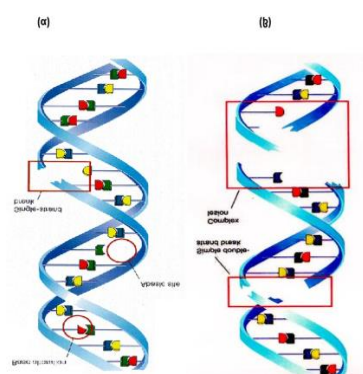
Η αλληλεπίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με τα άτομα της ύλης οδηγεί στην απορρόφηση ενέργειας μέσω του ιονισμού και της διέγερσης ατόμων και μορίων. Αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο προκύπτουν τα βιολογικά αποτελέσματα. Από πλευράς ποιότητας, το ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται μέσω ιονισμών μπορεί να προκαλέσει διάφορες χημικές αλλαγές. Γενικά, το βιολογικό αποτέλεσμα εξαρτάται από την ποσότητα της απορροφώμενης ενέργειας, τον ρυθμό παροχής αυτής, τον όγκο του ιστού που εκτίθεται στην ακτινοβολία, καθώς και τις ιδιότητες του ιστού αυτού. Οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζονται άμεσα ή έμμεσα από μια σειρά ακτινοβιολογικούς παράγοντες όπως είναι η ευαισθησία των κυττάρων, η φάση του κυτταρικού κύκλου και η ευαισθησία των ιστών των οργάνων [8].

Ο ιονισμός ενός μορίου, είτε πρόκειται για ένα βιολογικό μακρομόριο είτε, πιθανότατα, για ένα μόριο νερού (δεδομένου ότι το νερό αποτελεί πάνω από το 50% του κυτταρόπλασματος), μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό ελευθέρων ριζών. Οι ελεύθερες ρίζες ασκούν οξειδωτική δράση, η οποία ευθύνεται για περαιτέρω χημικές αλλαγές σε βιολογικά μακρομόρια. Αν και υπάρχουν αποτελεσματικοί μηχανισμοί αντιμετώπισης βλαβών σε κυτταρικό επίπεδο, σπάνιες περιπτώσεις βλαβών που δεν αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά μπορούν να έχουν διάφορες επιπτώσεις στον τομέα της βιολογίας, από γενετικές μεταλλάξεις και χρωμοσωμικές ανωμαλίες μέχρι καθυστέρηση της διαίρεσης, διαταραχές στον μεταβολισμό και κυτταρικό θάνατο.

Η αναπαραγωγή του DNA στα κύτταρα διενεργείται κατά την φάση S (Synthesis). Κατά τη διαίρεση των σωματικών κυττάρων, το αρχικό κύτταρο χωρίζεται σε δύο όμοια κύτταρα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε 4 στάδια (πρόφαση, μετάφαση, ανάφαση και τελόφαση). Η φάση στην οποία βρίσκεται η πλειοψηφία των

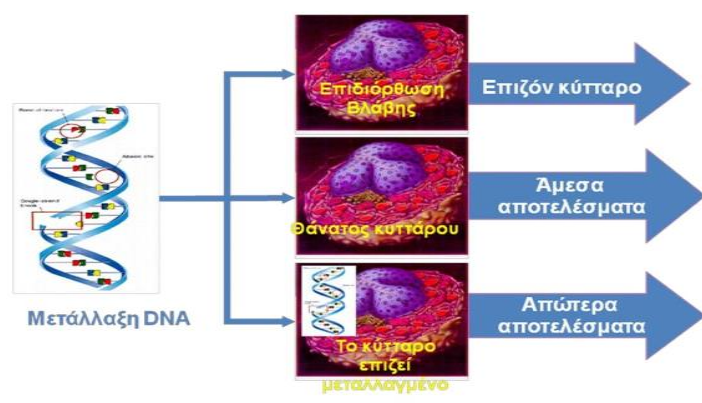
κυττάρων κατά την ακτινοβολήση αποτελεί πολύ σημαντικός παράγοντας αναφορικά με την κυτταρική βλάβη που προκαλεί.

Οι τρόποι δράσης της ακτινοβολίας είναι δύο, η άμεση και η έμμεση. Η άμεση δράση αφορά την απευθείας δράση της ακτινοβολίας στο μόριο του DNA. Όταν αναφερόμαστε στην έμμεση δράση της ακτινοβολίας, εννοούμε την πρόκληση βιολογικής βλάβης που προκαλείται από τα διάφορα βιολογικά υλικά που δημιουργούν ιοντισμούς και διεγέρσεις, που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ελεύθερων ριζών [7].



Εικ.4 α. Απλό και β. διπλό σπάσιμο της αλυσίδας από την επίδραση των ελεύθερων ριζών.

Τα απλά σπασίματα της έλικας του DNA (SSB) μπορούν να επιδιορθωθούν από τους διορθωτικούς μηχανισμούς που διαθέτει το κύτταρο. Τα διπλά σπασίματα (DSB) δύσκολα μπορούν να επιδιορθωθούν και οδηγούν σε μετάλλαξη ή κυτταρικό θάνατο. Άμεσο αποτέλεσμα αποτελεί σε σύντομο χρονικό διάστημα ο κυτταρικός θάνατος, με επακόλουθο όλες τις συνέπειες αυτού. Τα απώτερα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την επιβίωση του κυττάρου που ακτινοβολήθηκε, το οποίο έχει μεταλλαχθεί με αποτέλεσμα οι βλάβες να εμφανίζονται μελλοντικά. Άρα, στα απώτερα αποτελέσματα περιλαμβάνεται η πρόκληση καρκίνου ή η μεταβίβαση της αλλοιωμένης κληρονομικής πληροφορίας στους απογόνους, κάτι το οποίο δύναται να συμβεί στην περίπτωση που ακτινοβοληθούν και μεταλλαχθούν γενετικά κύτταρα του ανθρώπου, δηλαδή τα ωάρια ή τα σπερματοζωάρια [7].



Εικ.5 Σχηματική αναπαράσταση επίδρασης ακτινοβολίας στο κύτταρο [7]

Τα αναμενόμενα ή μη στοχαστικά αποτελέσματα είναι εκείνα που προκύπτουν από έκθεση σε υψηλές καταστροφικές δόσεις ακτινοβολίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτά μπορούν να είναι σοβαρά και οφείλονται στον θάνατο ή την σοβαρή δυσλειτουργία μεγάλου αριθμού κυττάρων ενός ιστού. Τα αποτελέσματα αυτά είναι δυνατόν να εμφανιστούν μόνο μετά από έκθεση σε δόσεις ακτινοβολίας που υπερβαίνουν ένα ορισμένο κατώφλι, και η σοβαρότητά τους αυξάνει με την αύξηση της δόσης. Τα άμεσα γενετικά αποτελέσματα κυρίως σχετίζονται με την πρόκληση στειρότητας.

Τα στοχαστικά αποτελέσματα της ακτινοβολίας στον άνθρωπο έχουν αναδειχθεί από επιδημιολογικές μελέτες πάνω σε ανθρώπινες κοινότητες που είχαν εκτεθεί στο παρελθόν σε ακτινοβολία. Πρόκειται για αποτελέσματα που μπορεί να εμφανιστούν σε μεγάλο χρονικό διάστημα σε ένα άτομο που είχε εκτεθεί σε ακτινοβολία, και η πιθανότητά τους αυξάνεται ανάλογα με τη δόση ακτινοβολίας που δέχθηκε το κύτταρο του σώματος που μεταλλάχθηκε αρχικά. Για την εμφάνισή τους, δεν απαιτείται να ξεπεραστεί κάποιο κατώφλι δόσης.

Συνολικά, τα αποτελέσματα διακρίνονται ως εξής:

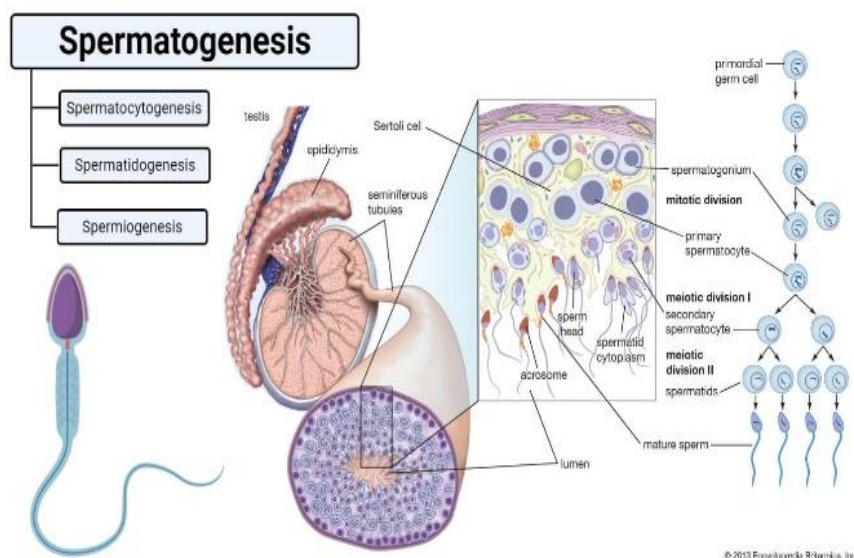
- Στοχαστικά σωματικά αποτελέσματα (καρκινογένεση).
- Στοχαστικά γενετικά αποτελέσματα (κληρονομικές παθήσεις).
- Ειδικά σωματικά αποτελέσματα σε έμβρυα και αναπτυσσόμενα ιστούς.

Ανδρικό αναπαραγωγικό σύστημα και σπερματογένεση

Το ανδρικό αναπαραγωγικό αποτελείται από εσωτερικές και εξωτερικές στο ανθρώπινο σώμα ανατομικές δομές. Οι εσωτερικές αποτελούν τον προστάτη, την επιδιδυμίδα και τον σπερματικό πόρο, ενώ οι εξωτερικές τους όρχεις και το πέος. Αυτές οι δομές είναι επαρκώς αγγειούμενες και περιέχουν πολλούς αδένες και πόρους, οι οποίοι παράγουν, αποθηκεύουν, μεταφέρουν και τέλος συντελούν στην εξπερμάτιση ώστε να επιτύχουν την γονιμοποίηση και την ανάπτυξη του ανδρικού αναπαραγωγικού συστήματος [10]. Η τεστοστερόνη είναι το κύριο ανδρογόνο και παράγεται από τα κύτταρα του Leydig και τους όρχεις. Άλλες ορμόνες εξίσου σημαντικές είναι οι ορμόνες inhibin B και Mullerian inhibiting substance (MIS) hormone, παραγόμενες και οι δύο από τα κύτταρα Sertoli στον προστάτη. Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν

στην ανδρική γονιμότητα οι FSH και LH, οι οποίες παράγονται στην πρόσθια υπόφυση και συντελούν στην έκκριση της GnRH από τον υποθάλαμο. Η σύνθεση του σπέρματος επιτυγχάνεται στους όρχεις με ένα ιδιαίτερος πολύπλοκο σύστημα, το οποίο απαιτεί συνεργασία μεταξύ αρκετών κυττάρων των όρχεων. Χρόνια έρευνας από την επιστημονική κοινότητα [11] ανέλυσε τους μηχανισμούς με τους οποίους τα αρχέγονα σπερματικά κύτταρα εξελίσσονται σε εξαιρετικά κινητικά σπερματοζώαρια.

Η σπερματογένεση είναι μια πολύπλοκη συνεχής διαδικασίας κυτταρικής διαφοροποίησης μέσω της οποίας τα ανώριμα γεννητικά κύτταρα (σπερματογόνια) υπόκεινται σε διαδικασία μετατροπής, προκειμένου να εξελιχθούν σε ώριμα σπερματοζώαρια. Βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά των σπερματικών σωληναρίων του όρχεως, τοποθετημένα ανάμεσα στα κύτταρα του Sertoli. Σε αντίθεση με την παιδική ηλικία, κατά την εφηβεία τα σπερματογόνια αρχίζουν να εκδηλώνουν δραστηριότητα. Στο πρώτο στάδιο, τα σπερματογόνια μετατρέπονται σε πρωτοταγή σπερματοκύτταρα. Κάθε πρωτοταγές σπερματοκύτταρο υφίσταται την πρώτη μειωτική διαίρεση, δημιουργώντας δύο δευτεροταγή σπερματοκύτταρα. Έπειτα, τα δευτεροταγή σπερματοκύτταρα υφίστανται τη δεύτερη μειωτική διαίρεση, δημιουργώντας τέσσερις απλοειδείς σπερματίδες. Οι σπερματίδες σταδιακά απαλλάσσονται από το κυτταρόπλασμα τους και εξελίσσονται σε ώριμα σπερματοζώαρια. Σε φυσιολογικές συνθήκες, χρειάζονται περίπου 70 ημέρες για παραχθούν [12]. Τα σπερματογόνια είναι ικανά να αυτοανανεώνονται για να διατηρήσουν τους πληθυσμούς τους και να μπορούν να μέσω της διαδικασίας που προαναφέρθηκε να μετατραπούν σε ώριμα σπερματοζώαρια.

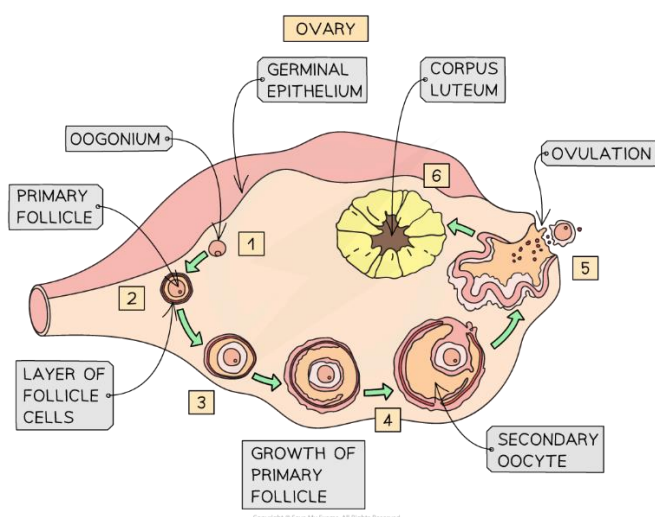


Εικόνα 6 Σχηματική αναπαράσταση σπερματογένεσης. Εικόνα από Wikipedia

Γυναικείο αναπαραγωγικό σύστημα και ωογένεση

Το γυναικείο αναπαραγωγικό σύστημα αποτελείται από τα εσωτερικά και εξωτερικά γεννητικά όργανα, αντίστοιχα με το ανδρικό σύστημα. Τα εσωτερικά γεννητικά όργανα περιλαμβάνουν τις δύο ωothήκες, τους δύο ωαγωγούς ή σάλπιγγες, τη μήτρα και τον κόλπο. Το σύνολο των εξωτερικών γεννητικών οργάνων καλείται αιδοίο και περιλαμβάνει τα μεγάλα χείλη, τα μικρά χείλη, την κλειτορίδα, τον πρόδρομο του κολεού, τους βολβούς του προδρόμου, τους αδένες του προδρόμου και το εφήβαιο ή όρος της Αφροδίτης [13].

Στα θήλεα νεογνά, τα αρχέγονα γεννητικά κύτταρα, γνωστά και ως ωογόνια, αρχικά φτάνουν σε αριθμό τα 1-2 εκατομμύρια. Σε αυτό το στάδιο, έχουν ήδη εισέλθει στην πρώτη φάση της μειωτικής διαίρεσης, αλλά δεν την ολοκληρώνουν. Αυτά τα γεννητικά κύτταρα ονομάζονται ωοκύτταρα πρώτης τάξης και παραμένουν αδρανή, έως ότου εξαφανιστούν ή φτάσουν στην τελική ωρίμανση μετά την έναρξη της ήβης, όταν και μπορούν να γονιμοποιηθούν. Αυτά τα ωοθυλάκια περιβάλλονται από ένα στέφανο απλών επιθηλιακών κυττάρων και αποτελούν τα πρωτογενή ωοθυλάκια. Η ωρίμανση των ωοθυλακίων ενεργοποιείται από τη θυρεοτρόπο ορμόνη (FSH). Με την επίδραση της ωχρινοτρόπου ορμόνης ωριμάζει μόνο ένα ωοθυλάκιο κάθε φορά. Σε ένα συγκεκριμένο χρόνο συνήθως την 14η-15η ημέρα ενός κύκλου 28ημερών, το ωοθυλάκιο ρήγνυται (ωοθυλακιορρηξία), ακολουθεί η απελευθέρωση του ωαρίου και η σύλληψή του από τους κροσσούς της σάλπιγγας και η είσοδός του εντός αυτής [14].



Εικόνα 7 Σχηματική αναπαράσταση ωογένεσης. Εικόνα από Wikipedia

Επίδραση ακτινοβολίας στα γεννητικά κύτταρα

Γεγονότα στα οποία εκτέθηκε μεγάλος αριθμός ανθρώπων σε αναπαραγωγική ηλικία βοήθησαν στην αξιολόγηση της επίδρασης της ακτινοβολίας. Τα δεδομένα τόσο σε μελέτες που συμμετείχαν άνθρωποι αναπαραγωγικής ηλικίας όσο και σε πειραματικές μελέτες σε είδη του ζωικού βασιλείου, δείχνουν την μεγάλη ακτινοευαισθησία των γεννητικών οργάνων.

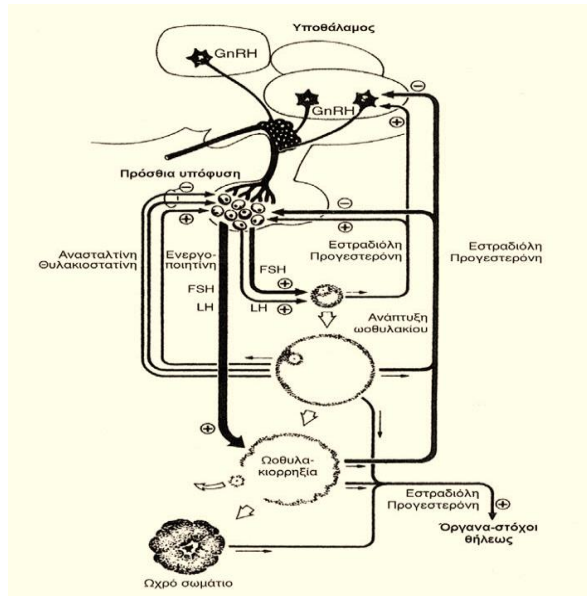
Με βάση τον νόμο των Bergonie και Tribondeau, η ευαισθησία ενός ιστού στην ακτινοβολία είναι ανάλογη της μεταβολικής δραστηριότητας. Τα κύτταρα με υψηλά επίπεδα μεταβολικής δραστηριότητας είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στην ακτινοβολία και, συνεπώς, αντιδρούν άμεσα σε αυτήν. Επιπλέον, η ακτινοευαισθησία των ιστών και των οργάνων εξαρτάται από τον ρυθμό πολλαπλασιασμού και τον ρυθμό ανάπτυξής τους. Όταν ο ρυθμός πολλαπλασιασμού αυξάνεται, τότε αυξάνεται και η ευαισθησία στην ακτινοβολία [15].

Ο βαθμός ωριμότητας των κυττάρων των γεννητικών αδένων καθορίζει την όποια ακτινοευαισθησία τους. Έτσι, τα περισσότερα ανώριμα κύτταρα όπως είναι τα πρωτογενή σπερματοκύτταρα είναι περισσότερο ακτινοευαίσθητα σε σύγκριση με τις σπερματίδες ή τα σπερματοζωάρια. Εφ' άπαξ τοπική ακτινοβολήση, στις γυναίκες, της τάξης του 1,7-6,4Sv είναι δυνατόν να προκαλέσει παροδική στειρότητα, ενώ εφ' άπαξ δόση των 3,2-10 Sv ευθύνεται για πρόκληση μόνιμης στειρότητας. Δόσεις, της τάξης των 100mSv, είναι δυνατό να επιφέρουν καθυστέρηση στην έμμηνο ρύση. Εφ' άπαξ δόσεις της τάξης των 100-150mSv στους άνδρες είναι δυνατόν να προκαλέσουν παροδική στειρότητα ενός έτους, ενώ επιμένουσα ασπερμία επέρχεται σε δόσεις άνω των 2Sv. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ανάνηψη είναι βραχεία [8].

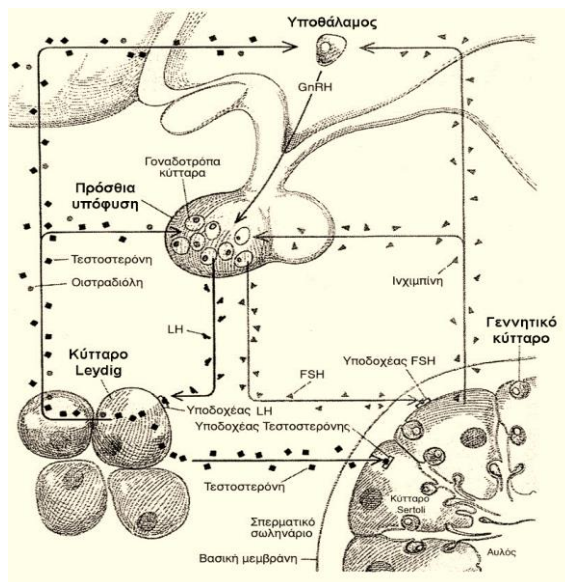
Στην ανασκόπηση των Tsutomu Shimura, et al [44] μελετήθηκε η επίδραση της ακτινοβολίας στην γονιμότητα των ανδρών που εκτέθηκαν στο πυρηνικό ατύχημα της Φουκοσίμα. Δόσεις της τάξης των 100mSv προκάλεσαν παροδική στειρότητα. Επαληθεύοντας το ποσό της ελάχιστης δόσης που δύναται να προκαλέσει παροδική στειρότητα στους άνδρες.

Η έκθεση σε ακτινοβολία δύναται να προκαλέσει σοβαρή δυσλειτουργία στον υποθάλαμο-υποφυσιακό γεννητικό (HPG) άξονα. Κλινικές μελέτες παρέχουν επαρκή στοιχεία ότι η ακτινοβολία προκαλεί βλάβη τόσο στον υποθάλαμο όσο και στην υπόφυση και έχει ως αποτέλεσμα πολλαπλές ορμονικές ανεπάρκειες [16]. Η ανεπάρκεια της γοναδοτροπίνης είναι ασυνήθιστη μετά από χαμηλή δόση

ακτινοθεραπείας (κάτω από 40Gy), ωστόσο παρατηρείται αυξημένη συχνότητα ανεπάρκειας γοναδοτροπίνης μετά από επαναλαμβανόμενη ακτινοβολήση. Η έλλειψη αυτής της ορμόνης προκαλεί καθυστέρηση της ήβης και διαταραχές στην γονιμότητα σε ανθρώπους αναπαραγωγικής ηλικίας.



Εικ.8 Φυσιολογικός άξονας HPG γυναικών. Πηγή Wikipedia



Εικ.9 Άξονας HPG ανδρών. Πηγή Wikipedia

Επιδιορθωτικοί μηχανισμοί κυττάρων

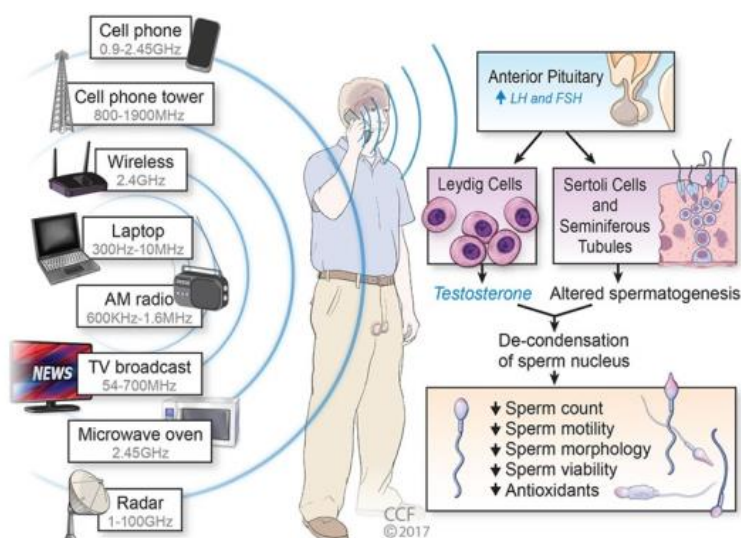
Συγκεκριμένοι επιδιορθωτικοί μηχανισμοί που διαθέτει το κύτταρο ενεργοποιούνται μόλις διαπιστώσουν βλάβη στο DNA. Ο χρόνος επιδιόρθωσης συνήθως διαρκεί 4-5 ώρες. Η 1η φάση επιδιόρθωσης περιλαμβάνει την δράση των τοποϊσομερασών I και II, οι οποίες προκαλούν έκπτυξη του DNA. Στην 2η φάση επιδιόρθωσης δρουν οι ενδονουκλεάσες οι οποίες απομακρύνουν το παθολογικό DNA και στην 3η φάση επιδιόρθωσης δρουν οι πολυμεράσες, οι εξωνουκλεάσες και οι λιγκάσες οι οποίες αντικαθιστούν το παθολογικό DNA με νέο, χρησιμοποιώντας σαν πρότυπο την άθικτη έλικα [8].

Ακτινοβολία και ανδρική υπογονιμότητα

Η πρόκληση διαταραχών στην γονιμότητα των αρρένων έπεται από έκθεση σε ακτινοβολία εξαρτάται από τον βαθμό της βλάβης που έχει προκαλέσει στις γονάδες. Το ποσό της δόσης ακτινοβολίας, η έμμεση ή άμεση ακτινοβολήση των γονάδων, ο πληθυσμός των κυττάρων που ακτινοβολήθηκε, η διάρκεια ακτινοβολήσης και το στάδιο στο οποίο βρίσκονται τα γεννητικά κύτταρα είναι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την γονιμότητα του ανδρός [17].

Η επίδραση της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας στην ανδρική γονιμότητα είναι θέμα το οποίο μελετάται εκτενώς στην επιστημονική κοινότητα. Το συμπέρασμα της έρευνας του DeIuliis, 2009, είναι ότι οι ασύρματες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες στην ισχύ και συχνότητα που εκπέμπονται από τα κινητά τηλέφωνα αυξάνουν τις μιτοχονδριακές δραστικές μορφές οξυγόνου στα σπερματοζωάρια, μειώνοντας την κινητικότητα τους και διεγείρουν τον κατακερματισμό του DNA [18]. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι οι μελέτες αυτές είναι *in vitro*, κάτι το οποίο θέτει περιορισμούς στα αποτελέσματά τους. Τονίζεται η ανάγκη περισσότερων μελετών με εφαρμογή σε ανθρώπινα δείγματα για την τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων. Στην ανασκόπηση των Kavindra Kumar Kesari, et al (2018) μελετήθηκαν οι επιπτώσεις της έκθεσης σε κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, φούρνους μικροκυμάτων και Wi-Fi. Οι παραπάνω συσκευές δύναται να προκαλέσουν μείωση στον αριθμό των σπερματοζωαρίων, μειωμένη κινητικότητα, βλάβη του DNA και διαταραχές στους ενζυμικούς μηχανισμούς επιδιόρθωσης των βλαβών του DNA. Αυτές οι επιδράσεις φαίνεται πως

προκαλούνται από την παραγωγή των ROS. Ωστόσο, ο ακριβής μηχανισμός μέσω του οποίου η ακτινοβολία RF-EMF επηρεάζει το ανδρικό αναπαραγωγικό σύστημα δεν έχει αποδειχθεί με επιστημονικά δεδομένα. Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την παροχή δεδομένων, ώστε να καταστεί σαφές αν η RF-EMF ακτινοβολία είναι παράγοντας ανδρικής υπογονιμότητας [19].



Εικ.10 Επίδραση της εκπεμπόμενης μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας στην ανδρική γονιμότητα. Εικόνα από Wikipedia

Οι Rowley et al, [20] την δεκαετία του 1970 πραγματοποίησαν ένα πείραμα με την συναίνεση κρατούμενων ανδρών. Οι εθελοντές συμφώνησαν να ακτινοβοληθούν οι όρχεις τους για να μελετήσουν τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας στην σπερματογένεση. Διαπιστώθηκε ότι δόση 0,11Gy μείωσε τον αριθμό των σπερματοζωαρίων, ενώ δόσεις 3 έως 5Gy προκάλεσαν μόνιμη στειρότητα.

Στην συστηματική ανασκόπηση των De Felice et al (2019) συνοψίζεται η ευαισθησία των γονάδων στην ακτινοβολία παραθέτοντας ότι ο χρόνος ανάρρωσης των σπερματοζωαρίων αυξάνεται με υψηλότερες δόσεις. Η ανάρρωση διαρκεί συνήθως 9-18 μήνες για δόσεις <1Gy. Μόνιμη αζωοσπερμία προκαλείται σε δόσεις 3-6Gy [21].

Στην μελέτη των Biedka M, et al. (2016) αναφέρεται ότι η σταδιακή ακτινοβολήση των όρχεων μπορεί να είναι πιο επιβλαβής από την μεμονωμένη ακτιβόληση δόσης έως 600Gy. Κλασματοποιημένες δόσεις μεγαλύτερες από 35Gy προκαλούν ασπερμία, ενώ δόση μεγαλύτερη από 200Gy προκαλεί μόνιμη στειρότητα. Τέσσερις εβδομάδες μετά την ακτινοβολία χαμηλής δόσης (1,5-2Gy), η παραγωγή σπέρματος παραμένει στο 50% της αρχικής τους συγκέντρωσης και η πλήρης επαναφορά του αριθμού τους

μπορεί να διαρκέσει έως και 10-24 μήνες. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις δόσεις ακτινοβολίας και τον χρόνο που απαιτείται για την επαναφορά στην αρχική συγκέντρωση των σπερματοζωαρίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και ο αριθμός των σπερματοζωαρίων επανέρχεται στα επίπεδα προ της ακτινοβολήσης, τα σπερματοζωάρια αυτά μπορεί να έχουν γεννητικές βλάβες [22].

Πιν.2 Ευαισθησία των γονάδων μετά από μονοδοσική ακτινοβολία και χρόνος ανάκαμψης.

Κύτταρο	Δόσεις ακτινοβολίας	Τοξικότητα	Χρόνος ανάκαμψης
Σπερματογόνια	≤1 Gy	Ολιγοσπερμία	9-18 μήνες
Σπερματοκύτταρα	1-3 Gy	Αζωοσπερμία	10-30 μήνες
Σπερματίδες	>3 Gy	Αζωοσπερμία	>60 μήνες

Σε μια πρόσφατη πειραματική μελέτη σε ποντίκια του 2021 των Bae, M.J.; Kangetal, γίνεται σύγκριση των ποσών δόσης ακτινοβολίας [23], σύμφωνα με την οποία η ακτινοβολία χαμηλής δόσης (LDR) προκαλεί πιο σοβαρή βλάβη στους όρχεις από την ακτινοβολία υψηλής δόσης (HDR). Η βλάβη του DNA από χρόνια ακτινοβολήση LDR μπορεί να μην επιδιορθωθεί αποτελεσματικά οδηγώντας σε κυτταρικό θάνατο. Οι μηχανισμοί πίσω από αυτό το φαινόμενο δεν είναι πλήρως κατανοητοί και χρήζουν περαιτέρω έρευνα ώστε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματά τους.

Η επίδραση της ακτινοβολίας στα κύτταρα του Leydig και στα κύτταρα Sertoli μελετήθηκε από την ομάδα του Tsatsoulis et al [24]. Η μελέτη αφορούσε 18 άνδρες ηλικίας μεταξύ 21 και 49 ετών, οι οποίοι έλαβαν κλασματοποιημένη ακτινοβολία δόση 30Gy, ως θεραπεία σε οξεία λεμφοβλαστική λευχαιμία. Σκοπός της μελέτης ήταν να αξιολογηθεί το αντίκτυπο της θεραπείας στα επίπεδα της τεστοστερόνης και των γοναδοτροπινών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, τα επίπεδα της τεστοστερόνης ήταν χαμηλότερα σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου, ενώ αντιθέτως τα επίπεδα της LH ήταν υψηλότερα. Η αναλογία τεστοστερόνης/LH ήταν χαμηλότερη κάτι που δείχνει βλάβη στα κύτταρα του Leydig. Περαιτέρω έρευνα έδειξε πως η άμεση ακτινοβολήση των όρχεων με 24-25Gy είχε ως αποτέλεσμα την πλήρη κατάλυση των κυττάρων του Leydig, αμέσως μετά την ακτινοθεραπεία. Η δυσλειτουργία των

κυττάρων του Leydig μπορεί να διαρκέσει έως και 5 έτη, κάτι το οποίο συνεπάγεται την συμπληρωματική χρήση ανδρογόνων από τους ασθενείς.

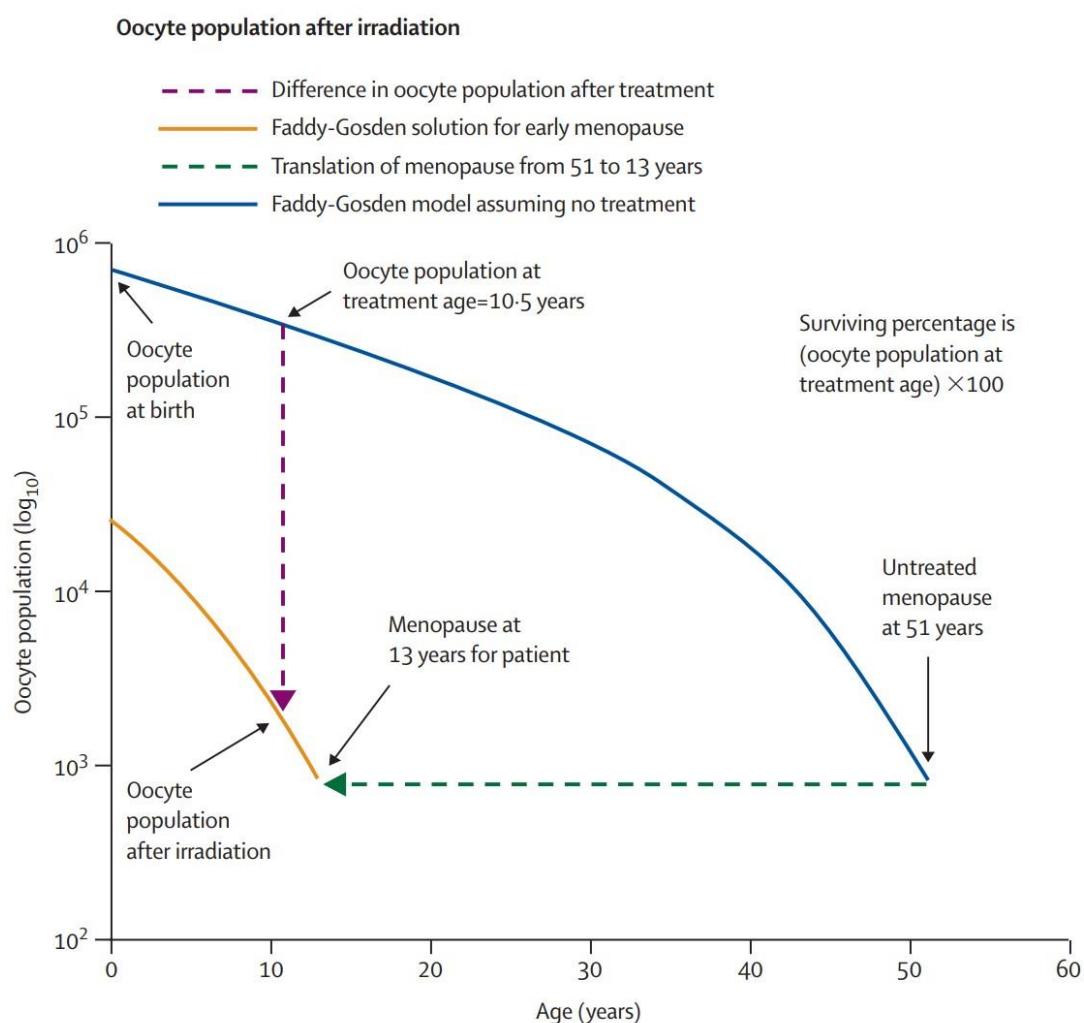
Ακτινοβολία και γυναικεία υπογονιμότητα

Η ακτινοευαισθησία των γυναικείων γονάδων εξαρτάται από τον τύπο της ακτινοβολίας, την δόση αυτής, τον χρόνο ακτινοβολήσης, τον τύπο του ακτινοβολημένου κυττάρου και την φάση της κυτταρικής διαίρεσης που βρίσκεται το κύτταρο. Όπως προαναφέρθηκε, η ακτινοβολία προκαλεί ραδιόλυση του νερού στις κυτταρικές δομές παράγοντας δραστικές ρίζες οξυγόνου (ROS), οι οποίες μπορούν να βλάψουν το DNA. Η αποτελεσματικότητα των μηχανισμών επιδιόρθωσης καθορίζουν τις βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας. Τα ανεπαρκώς ή εσφαλμένα επισκευασμένα κύτταρα, οδηγούν σε κυτταρική θανάτωση, μεταλλάξεις και χρωμοσωμικές ανωμαλίες [25].

Η επίδραση της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας στο γυναικείο αναπαραγωγικό σύστημα μελετάται συνεχώς, κάτι το οποίο φαίνεται από την πληθώρα δημοσιευμένων άρθρων που υπάρχουν στις διαδικτυακές βιβλιοθήκες. Ουσιαστικά οι επιδράσεις των μη ιοντίζουσών χωρίζονται σε θερμικές επιδράσεις, που προκαλούνται την θερμότητα που παράγεται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και σε μη θερμικές που σχετίζονται με την απορρόφηση της εκπεμπόμενης ενέργειας. Οι περισσότερες βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα σε ζωικά μοντέλα κάτι το οποίο θέτει περιορισμούς στα αποτελέσματά τους. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως μετά από έκθεση σε EMF παρατηρήθηκε αύξηση του ποσοστού των μακροφάγων στα κοκκιώδη κύτταρα κάτι το οποίο οδηγεί σε απόπτωση των ωαρίων [26].

Τα ωοκύτταρα είναι ιδιαίτερος ευαίσθητα στην ακτινοβολία. Υπολογίζεται ότι δόσεις $\leq 2\text{Gy}$ καταστρέφουν τα μισά ωοθυλάκια, μειώνουν την έκκριση ορμονών προκαλώντας ατροφία της μήτρας, πρόωμη εμμηνόπαυση ή και στειρότητα [26]. Υψηλότερη ευαισθησία στην ακτινοβολία για την πρόκληση μεταλλάξεων παρουσιάζουν τα ωοθυλάκια τα οποία βρίσκονται στην 14^η ημέρα του καταμήνιου κύκλου. Η δόση που απαιτείται για πρόκληση μόνιμης ωοθηκικής ανεπάρκειας κυμαίνεται από 2,3 έως 14,3 Gy (η ακτινοβολήση αφορά θήλεα κατά την γέννηση και γυναίκες ηλικίας 30 ετών, αντίστοιχα). Την παραπάνω τοποθέτηση αναλύουν αρκετές μελέτες στην βιβλιογραφία. Μια από αυτές είναι η μελέτη των Wallace et al, οι οποίοι τροποποίησαν το μοντέλο Faddy-Gosden [27]. Το μοντέλο Faddy-Gosden παρουσιάζει

τον φυσιολογικό κύκλο ωρίμανσης και απόπτωσης των ωοκυττάρων. Η μελέτη αναφέρει πως η LD50 (η θανατηφόρα δόση -lethal dose- που απαιτείται για να πεθάνουν τα μισά ωοκύτταρα του συνολικού αριθμού) είναι λιγότερο από 2Gy. Με αυτά τα δεδομένα είναι εφικτός ο υπολογισμός της ηλικίας πρόκλησης εμμηνόπαυσης στην γυναίκα έπειτα από την έκθεση της σε ακτινοβολία.



Εικ.11

Στην παραπάνω εικόνα (εικ.11) φαίνεται η πρόκληση εμμηνόπαυσης σε κορίτσι το οποίο έλαβε δόση ακτινοβολίας 14Gy. Την στιγμή της έκθεσης της στην ακτινοβολία ήταν 10 ετών και έπειτα από 3 χρόνια προκλήθηκε η εμμηνόπαυσή της. Η μέση ηλικία πρόκλησης εμμηνόπαυσης ήταν τα 51έτη.

Οι Wallace W, et al [45] παρουσιάζουν ένα μαθηματικό μοντέλο στο οποίο αναφέρεται ότι μια δόση 2Gy μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του 50% των

ωοκυττάρων. Η ESD (effective sterilizing dose) είναι η δόση που οδηγεί σε άμεση δυσλειτουργία των ωοθηκών στο 97,5% των ασθενών μετά από την θεραπεία. Η ESD ρυθμίζεται ανάλογα με την ηλικία της γυναίκας κατά την διάρκεια της θεραπείας και είναι 20,3Gy για τα νεογνά, 18,4Gy για κορίτσια ηλικίας 10 ετών, 16,5Gy για γυναίκες 20 ετών και 14,3Gy για γυναίκες 30 ετών.

Τόσο η αξονική τομογραφία όσο και οι ακτινογραφίες διενεργούνται με χαμηλές δόσεις οι οποίες δεν δύναται να προκαλέσουν δυσλειτουργία στο αναπαραγωγικό σύστημα.

Στην μελέτη των Nicola Antonio Martino, et al, μελετήθηκε η επίδραση των ακτίνων Χ στους ιστούς ωοθηκών προβάτων και ανθρώπων [28]. Οι χαμηλές δόσης που χρησιμοποιούνται συνήθως στην ιατρική απεικόνιση φάνηκε πως δεν έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στα γεννητικά κύτταρα. Όταν χρησιμοποιήθηκαν δόσεις της τάξης των 50 και 100mGy παρατηρήθηκε μείωση της της μιτοχονδριακής δραστηριότητας. Όταν τα αποτελέσματα ταξινομήθηκαν ανάλογα με την ηλικία των γυναικών διαπιστώθηκε ότι οι ιστοί γυναικών ηλικίας 33-36 ετών παρουσίασαν μεγαλύτερη ακτινοευαισθησία. Σημειώνεται ότι οι απεικονίσεις στις μεγαλύτερης ηλικίας γυναίκες αναπαραγωγικής ηλικίας θα πρέπει να γίνονται με φειδώ, αλλά και η ανάγκη περισσότερων μελετών με έμφαση την έρευνα σε γυναίκες άνω των 30 ετών.

Στην μελέτη των Larsen et al, μελετήθηκε η επίδραση της ακτινοθεραπείας στην μήτρα των 100 γυναικών, οι οποίες έλαβαν θεραπεία στην παιδική τους ηλικία [46]. Η αξιολόγηση του όγκου της μήτρας έγινε με διακολπικό υπερηχογράφημα. Οι ασθενείς μοιράστηκαν σε ομάδες ανάλογα με την ακτινοβολημένη περιοχή. Η ομάδα ελέγχου περιλάμβανε 44 γυναίκες οι οποίες δεν υποβλήθηκαν σε ακτινοθεραπεία, 21 γυναίκες οι οποίες έλαβαν θεραπεία στον θώρακα, 19 γυναίκες με ιστορικό θεραπείας κάτω από το διάφραγμα και 16 γυναίκες με ιστορικό θεραπείας στην μήτρα. Οι όγκοι της μήτρας ήταν 47ml, 40ml, 34ml και 13ml αντίστοιχα. Στις γυναίκες οι οποίες έλαβαν θεραπεία στην περιοχή της μήτρας υπήρξε στατικά υψηλό το ποσοστό των αποβολών στο 2^ο τρίμηνο της εγκυμοσύνης.

Υπογονιμότητα και Περιβαλλοντικοί –Επαγγελματικοί παράγοντες

Είναι αποδεδειγμένο ότι η ικανότητα γονιμοποίησης μπορεί να επηρεαστεί από την έκθεση σε διάφορες τοξίνες ή χημικές ουσίες που βρίσκονται στο περιβάλλον ή και

στον χώρο εργασίας. Αυτές οι ουσίες έχουν την δυνατότητα να προκαλέσουν μεταλλάξεις, συγγενείς ανωμαλίες, αποβολές, υπογονιμότητα ή στειρότητα.

Έχει αποδειχθεί ότι τρεις χημικές ουσίες προκαλούν επιπτώσεις στην σύλληψη. Αυτές είναι ο μόλυβδος, το οξείδιο του αιθυλενίου και το DBCP που χρησιμοποιείται σε ορισμένα φυτοφάρμακα. Επίσης, η ακτινοβολία και η χημειοθεραπεία επιδρούν αρνητικά στην ικανότητα σύλληψης.

Στην συστηματική ανασκόπηση των Soleiman Ramezanifar, et al, 2023 εξετάστηκε η επίδραση διαφόρων παραγόντων στον εργασιακό χώρο, όπως τα μαγνητικά πεδία (MFs), η ιοντίζουσα ακτινοβολία, ο θόρυβος, οι κραδασμοί, η υψηλή θερμοκρασία και η έκθεση σε χημικές ουσίες [29]. Η έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία ευθύνεται, ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης και την δόση, για την πρόκληση χρωμοσωμικών ανωμαλιών οι οποίες προκαλούν γεννητικές διαταραχές. Σε εργαζόμενους οι οποίοι εκτίθενται σε RF ακτινοβολία παρατηρήθηκαν αυξημένα επίπεδα της FSH και LH, οφειλόμενα στην αυξημένη θερμοκρασία που προκλήθηκε από την έκθεση σε RF ακτινοβολία. Η αύξηση αυτών των ορμονών επιδρά αρνητικά στον φυσιολογικό άξονα υποθάλαμο-υπόφυση-γονάδες, με αποτέλεσμα την πρόκληση διαταραχών στην γονιμότητα [30].

Επιπτώσεις πυρηνικού ατυχήματος του Chernobyl στην γονιμότητα

Το πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl προσέφερε πολύτιμες γνώσεις στους επιστήμονες στην επίδραση της ακτινοβολίας στην αναπαραγωγική ικανότητα των ανθρώπων. Η μελέτη των Julie Cwikel, et al διερεύνησε την αναπαραγωγική ικανότητα γυναικών που επέζησαν από το πυρηνικό ατύχημα [31]. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν πως οι γυναίκες αυτές είχαν προβλήματα υπογονιμότητας σε σύγκριση με τις ομάδες σύγκρισης. Το κυριότερο αίτιο της υπογονιμότητας τους ήταν η ωοθηκική ανεπάρκεια. Οι γυναίκες αυτές κατέφυγαν σε μεθόδους εξωσωματικής γονιμοποίησης. Η έκβαση της εγκυμοσύνης τους ήταν συγκρίσιμη με την ομάδα ελέγχου.

Η επίδραση του ατυχήματος του Chernobyl στην ανδρική γονιμότητα μελετήθηκε από τους Birioukov et al [32]. Γίνεται αναφορά την πρόκληση υπογονιμότητας στους άνδρες οφειλόμενη σε ασπερμία ή αζωοσπερμία, χαμηλά επίπεδα τεστοστερόνης, υψηλές τιμές FSH και προλακτίνης (Πιν. 3).

Patient	FSH (mIU/mL) (normal: 1-10)	LH (mIU/mL) (normal: 2-11)	Testosterone (mIU/mL) (normal: 3-10)	Prolactin (ng/mL) (normal: 3.5-20)
1	15.0	5.8	7.7	3.7
2	8.0	4.1	11.6	7.0
3	13.0	5.7	10.6	10.5
4	18.7	5.2	10.9	4.0
5	22.7	4.2	2.8	7.6
6	7.0	1.8	2.1	123.0
7	5.1	3.6	11.4	8.3
8	11.3	6.1	11.7	8.0
9	2.5	3.6	15.7	6.3
10	3.3	2.4	14.6	7.2
11	17.7	3.8	3.4	—
12	5.7	2.9	3.8	10.7

Πιν.3

Η υψηλή τιμή της προλακτίνης πιθανόν να οφείλεται σε προλακτίνωμα της υπόφυσης, ωστόσο κρίνεται απαραίτητη η διενέργεια περαιτέρω διεκπεραίωσης μελετών ώστε να επαληθευθούν τα αποτελέσματα.

Διεθνή συστήματα Ακτινοπροστασίας

Η επιστημονική επιτροπή για τις επιπτώσεις της ατομικής ακτινοβολίας (UNSCEAR) συστάθηκε το 1955 από τη Γενική Συνέλευση του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών(ΟΗΕ). Η επιτροπή UNSCEAR σε παγκόσμιο επίπεδο αξιολογεί τις εκθέσεις σχετικά με την ιοντίζουσα ακτινοβολία και την ραδιενέργεια στο περιβάλλον [33].

Στόχος των θεμελιωδών αρχών προστασίας από τις ακτινοβολίες είναι η προάσπιση των ανθρώπων και του περιβάλλοντος από τις επιβλαβείς επιπτώσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Το σύστημα προστασίας και ασφάλειας στοχεύει στην αξιολόγηση, την διαχείριση και τον έλεγχο της έκθεσης έτσι ώστε οι επιπτώσεις της ακτινοβολίας να μειώνονται όσο το δυνατόν είναι εφικτό.

Οι συστάσεις της ICRP (International Commission on Radiological Protection) αποτελούν βασικές οδηγίες σχετικά με την ακτινοπροστασία και την προστασία από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Αυτές οι συστάσεις στηρίζονται στα επιστημονικά δεδομένα της UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) [34].

Το 1991 η ICRP κυκλοφόρησε την έκδοση Publication 60 στην οποία εμπλούτισε το προηγούμενο σύστημα ακτινοπροστασίας και έθεσε νέα όρια δόσεων για τους

εκτιθέμενους εργαζομένους και τον πληθυσμό από τις εφαρμογές των ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

Το 1996, ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) υιοθέτησε το σύστημα ακτινοπροστασίας που πρότεινε η ICRP εξέδωσε τα Διεθνή Βασικά Πρότυπα Ασφάλειας για την Προστασία έναντι των Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών, “International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation - BSS”. Βάσει αυτών των διεθνών προτύπων ασφάλειας, η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε τις οδηγίες 96/29 και 97/43 της Euratom το 1996 και το 1997 αντίστοιχα. Αυτές οι οδηγίες αφορούσαν την προστασία από την ακτινοβολία του κοινού, των εργαζομένων και των ασθενών. Σύμφωνα με τη συνθήκη της Euratom, οι χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης είχαν την υποχρέωση την ενσωμάτωση αυτών των οδηγιών στην εθνική τους νομοθεσία.

Το 2001 η Ελλάδα εξέδωσε τους Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας (ΚΥΑ 1014 (ΦΟΡ) 94, ΦΕΚ 216, 6 Μαρτίου 2001), προσαρμοσμένους στις οδηγίες της Euratom.

Το 2008, η ICRP κυκλοφόρησε νέες οδηγίες (ICRP 103), βασισμένες σε ενημερωμένα επιστημονικά δεδομένα (UNSCEAR 2000) και στη διεθνή εμπειρία που αποκτήθηκε από την εφαρμογή των προηγούμενων οδηγιών του 1991. Με βάση αυτές τις νέες οδηγίες της ICRP, ξεκίνησε η αναθεώρηση του διεθνούς και του Ευρωπαϊκού συστήματος προστασίας από την ακτινοβολία.[34]

Βασικές αρχές ακτινοπροστασίας

Για να διασφαλιστεί η έκθεση τόσο ατόμων όσο και ομάδων στην ακτινοβολία που προκύπτει από διάφορες πρακτικές, ιδρύθηκε η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). Αυτή η επιτροπή θεσπίζει και επιβλέπει την εφαρμογή των κανονισμών και προτείνει επιπλέον μέτρα όταν το κρίνει αναγκαίο. Οι βασικές αρχές είναι τρείς:

1. την Αρχή της Αιτιολόγησης
2. την Αρχή της Βελτιστοποίησης και
3. την Αρχή των Ορίων Δόσεων

Πιο αναλυτικά:

Αρχή της Αιτιολόγησης: Οποιαδήποτε πιθανή έκθεση ενός ατόμου σε ιοντίζουσα ακτινοβολία μπορεί να εφαρμοστεί μόνο εάν αυτή πρόκειται να δώσει επαρκές όφελος

για τα εμπλεκόμενα άτομα ή την κοινωνία συνολικά, ώστε να αντισταθμίσει τυχόν πιθανή βλάβη που μπορεί να προκληθεί από αυτήν.

Αρχή της Βελτιστοποίησης: Στην πρακτική της ακτινολογίας, είναι σημαντικό τόσο τα μηχανήματα όσο και οι πηγές να δίνουν προτεραιότητα στην ασφάλεια και την προστασία. Αυτό σημαίνει ελαχιστοποίηση της έκθεσης και των πιθανών ατυχημάτων, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες. Τελικά, ο στόχος είναι να περιοριστεί ο αριθμός των ανθρώπων που πρέπει να εκτεθούν και να διατηρηθούν οι δόσεις ακτινοβολίας σε λογικό επίπεδο. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάζεται να υπάρχει συνεχής προσπάθεια για τη βελτιστοποίηση της τεχνολογίας και των συνθηκών λειτουργίας. Κατά την εφαρμογή πρέπει να υπάρχουν περιοριστικά επίπεδα δόσεων. Αυτά τα "περιοριστικά επίπεδα δόσεων" (ΠΕΔ) αντιστοιχούν σε μετρήσιμες τιμές και καθορίζονται κατά τη φάση του σχεδιασμού της ακτινοπροστασίας μιας πρακτικής. Τα ΠΕΔ καθορίζονται έτσι ώστε να είναι αποδεκτά κατά την ορθή εφαρμογή μιας πρακτικής, λαμβάνοντας υπόψη την υφιστάμενη γνώση και εμπειρία [6].

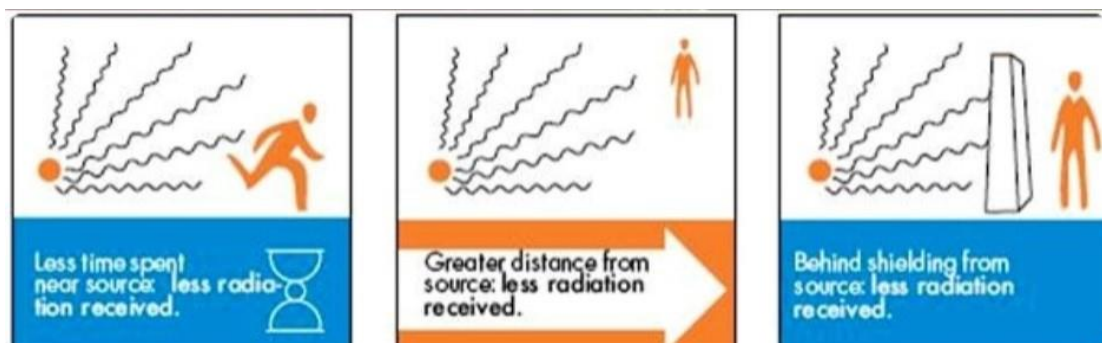
Αρχή των Ορίων Δόσεων: Οι ατομικές εκθέσεις σε ακτινοβολία, προερχόμενες από τις πηγές ακτινοβολίας σε πλαίσιο εγκεκριμένων πρακτικών, πρέπει να υπόκεινται σε όρια δόσεων ή όρια κινδύνων, η υπέρβαση των οποίων απαγορεύεται. Οι καθορισμένοι περιορισμοί δόσεων ακτινοβολίας για επαγγελματίες είναι 100mSv για πέντε συνεχή έτη, με μέγιστο όριο των 50mSv ανά έτος. Η ισοδύναμη δόση στους φακούς των οφθαλμών είναι 20 mSv, στο δέρμα και στα άκρα 500 mSv [6]. Αυτά τα όρια ισχύουν και για μαθητευόμενους και φοιτητές άνω των 18 ετών. Τα καθορισμένα όρια για το γενικό κοινό είναι 1mSv ανά έτος, με ισοδύναμη δόση στους φακούς των οφθαλμών 15mSv και στο δέρμα 50mSv ανά έτος. Η ενεργός δόση από την ακτινοβολία του υποστρώματος είναι 2.7mSv/έτος. Αξίζει να σημειωθεί, πως αυτά τα όρια δεν περιλαμβάνουν τις δόσεις που προέρχονται από την ακτινοβολία του υποστρώματος και τις ιατρικές εκθέσεις για διαγνωστικούς όσο και για θεραπευτικούς σκοπούς [6].

Το τρίπτυχο της ακτινοπροστασίας περιλαμβάνει τις ακόλουθες τρεις αρχές:

Χρόνος: ελάττωση του χρόνου έκθεσης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της δόσης ακτινοβολίας

Απόσταση: αύξηση της απόστασης από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία προκαλεί μείωση της προσλαμβανόμενης δόσης

Θωράκιση: Η θωράκιση μειώνει την προσλαμβανόμενη δόση



Εικ.12 Τρίπτυχο ακτινοπροστασίας

Οι εργαζόμενοι οι οποίοι εκτίθενται σε ακτινοβολίες κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την δόση στην οποία θα εκτεθούν ανά έτος [1] :

Κατηγορία Α: επαγγελματική έκθεση με ενεργό δόση μεγαλύτερη από 6 mSv ανά έτος.

Κατηγορία Β: επαγγελματική έκθεση με ενεργό δόση από 1mSv έως 6 mSv ανά έτος.

Μέτρηση Ατομικών Δόσεων

Η αξιολόγηση των ατομικών εκθέσεων στην ακτινοβολία για τους εργαζομένους στην Ελλάδα αποτελεί μια σημαντική διαδικασία για την θωράκιση της υγείας τους από τις επιπτώσεις αυτής. Οι δόσεις αυτές μετρώνται τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας (TLDs) και η διαδικασία διαφέρει ανάλογα με την κατηγορία των εργαζομένων [3].



Εικ.13

Κατηγορία Α. Οι εργαζόμενοι αυτής της κατηγορίας υποβάλλονται σε συστηματική ατομική δοσιμέτρηση, βασιζόμενη στις μετρήσεις TLDs. Αυτό σημαίνει ότι κάθε εργαζόμενος έχει το δικό δοσίμετρο του οποίου οι μετρήσεις ελέγχονται κάθε μήνα από το Τμήμα Δοσιμέτρησης Προσωπικού της ΕΕΑΕ.

Κατηγορίας Β. Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με συλλογική είτε με ατομική δοσιμέτρηση. Το επίσημο αρχείο των δόσεων τηρείται από την ΕΕΑΕ για όλους τους εκτιθέμενους σε ακτινοβολία στην ελληνική επικράτεια. Τα δοσιμετρικά δεδομένα έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία καταγράφονται και αποθηκεύονται για τουλάχιστον 30 χρόνια μετά την ολοκλήρωση της εργασίας. Σε περιπτώσεις υπέρβασης των ορίων δόσεων, η ΕΕΑΕ συνεργάζεται με τον υπεύθυνο αξιολόγησης ακτινοβολίας για να ερευνήσει τα αίτια που μπορεί να οδηγήσουν σε αυτήν την υπέρβαση, εξετάζοντας κυρίως τις πρακτικές που ακολουθούνται από το προσωπικό.

Μέτρα ακτινοπροστασίας εργαζομένων

Οι τρόποι με τους οποίους οι επαγγελματικά εκτιθέμενοι προστατεύονται από τις επιδράσεις της ακτινοβολίας είναι η διαρρύθμιση των ακτινολογικών χώρων με βάση τις αρχές ακτινοπροστασίας, ο διαθέσιμος εξοπλισμός καθώς και ο τρόπος με τον οποίο εργάζεται το προσωπικό.

Οι εργαζόμενοι υποχρεούνται να φοράνε το ατομικό τους δοσίμετρο ακολουθώντας τις εκάστοτε οδηγίες χρήσης. Η σωστή τοποθέτηση του δοσίμετρου γίνεται πάνω από την ποδιά και όχι στο εσωτερικό της. Με αυτό τον τρόπο τα θεσπισμένα όρια είναι εξαιρετικά δύσκολο να ξεπεραστούν [35].

Καθώς η κύρια δέσμη της ακτινοβολίας προσπίπτει στον ασθενή ένα ποσοστό αυτής προσπίπτει στο φιλμ ενώ το υπόλοιπο σκεδάζεται σε όλες σχεδόν τις κατευθύνσεις. Η ακτινοβολία διαρροής είναι η ακτινοβολία η οποία διαπερνά τη θωράκιση της κεφαλής της ακτινολογικής λυχνίας και εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Γι' αυτό τον λόγο οι τοίχοι του ακτινολογικού θαλάμου θωρακίζονται με μόλυβδο ή σκυρόδεμα και το παράθυρο παρατήρησης του ασθενή κατασκευάζεται από μολυβδύαλο.

Επειδή όσο μεγαλύτερο πεδίο χρησιμοποιείται σε μια ακτινολογική εξέταση, τόσο μεγαλύτερος αριθμός φωτονίων προσπίπτει στο σώμα του ασθενούς και σκεδάζεται προς τους γύρω χώρους, το πεδίο της ακτινοβολίας πρέπει να περιορίζεται στην

περιοχή ενδιαφέροντος και μόνο, καθώς η σκεδαζόμενη ακτινοβολία μπορεί να διαπεράσει τη θωράκιση και να ακτινοβολήσει το προσωπικό [36].

Τα τμήματα επεμβατικής ακτινολογίας οφείλουν να είναι εξοπλισμένα με ακτινολογικές ποδιές από μόλυβδο (0.25 – 0.5 mm Pb) και προστατευτικά κολάρα του θυρεοειδούς. Η χρήση ακτινολογικής προστατευτικής ενδυμασίας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της έκθεσης στην ακτινοβολία έως και 90% στα σημεία του σώματος που καλύπτει. Ταυτόχρονα, το προστατευτικό κολάρο, μπορεί να μειώσει την έκθεση έως και 80% στον θυρεοειδή και στον οισοφάγο. Συνήθως, η λυχνία του συστήματος πρέπει να τοποθετείται κάτω από την ακτινολογική τράπεζα, η οποία πρέπει να είναι εξοπλισμένος με κατάλληλα προστατευτικά τρίπτυχα (π.χ., λωρίδες μολύβδου) που καλύπτουν την περιοχή της λυχνίας. Ειδικά στην περίπτωση της αγγειογραφίας, όπου η διάρκεια της εξέτασης είναι μεγάλη, προτιμάται η χρήση γυαλιών από μολυβδύαλο για την προστασία των οφθαλμών. Το πέτασμα της οροφής πρέπει να είναι από μολυβδύαλο. Κάθε ιατρική παρέμβαση πρέπει να εκτελείται μόνο με χρήση προστατευτικών γαντιών από μόλυβδο. Το προσωπικό που παρευρίσκεται εντός του θαλάμου κατά τη διάρκεια της ακτινοσκόπησης πρέπει να προστατεύεται από ακτινοπροστατευτικά πετάσματα εδάφους και σε περίπτωση που αυτά δεν υπάρχουν, τότε να βρίσκεται σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόσταση μπορεί από την λυχνία [36].

Η προστασία του εξεταζόμενου περιλαμβάνει αρχικά την ταυτοποίηση του εξεταζόμενου. Έπειτα ο ακτινολόγος και ο χειριστής θα πρέπει να επικοινωνούν με τον εξεταζόμενο και να διασφαλίζουν έτσι την μείωση πιθανού άγχους και ανησυχίας. Ο περιορισμός της ακτινολογικής δόσης στο ελάχιστο δυνατό πεδίο που χρειάζεται για τη διάγνωση, συνεισφέρει στην βελτίωση της ποιότητας της εικόνας και μειώνει τη δόση ακτινοβολίας στον εξεταζόμενο. Η μείωση της ακτινολογικής δόσης αφορά επίσης το σκεπτικό της εξαίρεσης από την πρωτογενή δέσμη ακτινοευαίσθητων οργάνων όπως είναι οι γονάδες. Το φωτεινό πεδίο, το οποίο συμπίπτει με το πεδίο ακτινοβολίας προσφέρει την ρύθμιση του μεγέθους της δέσμης. Πρακτική μη αποδεκτή και αδικαιολόγητη αποτελεί η επικέντρωση με χρήση ακτινοσκόπησης [6].

Η ύπαρξη ειδικού εξοπλισμού προστασίας των ακτινοευαίσθητων οργάνων επιβάλλεται από τη νομοθεσία. Έτσι κάθε ακτινολογικό τμήμα οφείλει να έχει ειδικά προστατευτικά εξαρτήματα για τις γονάδες και τον θυρεοειδή, καθώς και ενδυμασία από μόλυβδο (εικ 11). Όταν το κύριο πεδίο της δέσμης βρίσκεται κοντά στην περιοχή των γονάδων, τα άτομα νεαρής και αναπαραγωγικής ηλικίας πρέπει φορούν ειδικά

προστατευτικά στην περιοχή των γονάδων (εικ.12). Υπάρχουν επίσης για την προστασία του στήθους των γυναικών ειδικά προστατευτικά του στήθους [3].



Εικ.14



Εικ.12

Προστασία κοινού πληθυσμού

Οι θωρακισμένοι ακτινολογικοί θάλαμοι του εργαστηρίου εξασφαλίζουν την μέγιστη ακτινοπροστασία του κοινού πληθυσμού. Το προσωπικό οφείλει να ελέγχει και να εξασφαλίζει ότι στις ελεγχόμενες και στις επιβλεπόμενες περιοχές δεν παρευρίσκονται αναίτια άτομα του γενικού κοινού. Στις περιπτώσεις που απαιτείται η συνύπαρξη συνοδού του εξεταζομένου εντός του ακτινολογικού θαλάμου, τότε το προσωπικό θα πρέπει να παρέχει στον συνοδό τον κατάλληλο ακτινοπροστατευτικό εξοπλισμό κατά την διάρκεια της εξέτασης [38].

Ακτινοπροστασία στον τομέα της πυρηνικής ιατρικής

Κυριότερο λόγο στην εξασφάλιση της προστασίας κατά την διενέργεια της εξέτασης διαδραματίζει η σωστή ενημέρωση του ασθενούς. Το ραδιοφάρμακο πρέπει να προετοιμάζεται σύμφωνα με τις οδηγίες της εταιρείας που το παράγει. Με έναν βαθμονομητή ενεργότητας πρέπει πάντα να μετράτε η ακτινοβολία του ραδιοφαρμάκου. Προτού δοθεί στον ασθενή, επιβεβαιώνεται η ταυτότητά του και ελέγχεται προσεκτικά για να αποφευχθεί οποιαδήποτε λάθος χορήγησης ραδιοφαρμάκου. Όταν το ραδιοφάρμακο πρόκειται να χορηγηθεί σε παιδιά, η ακτινοβολία είναι πολύ χαμηλότερη από αυτήν για ενήλικες και καθορίζεται από τις

οδηγίες της εταιρείας που το παράγει. Ο μεταβολισμός και η απομάκρυνση των ραδιοφαρμάκων επιτελείται από τον οργανισμό με φυσικές διαδικασίες όπως είναι τα ούρα, ο ιδρώτας και τα κόπρανα. Το μεγαλύτερο ποσοστό του ραδιοφαρμάκου συγκεντρώνεται στην ουροδόχο κύστη. Για να μειωθεί η δόση που λαμβάνει ο ασθενής, συνιστάται να παραμένει ενυδατωμένος, ώστε το ραδιοφάρμακο να απομακρύνεται μέσω της ούρησης [37].

Οι γενικές οδηγίες που δίνονται στους εξεταζόμενους είναι οι ακόλουθες:

- Κατά τις κοινωνικές επαφές, απαιτείται η διατήρηση απόστασης τουλάχιστον 2 μέτρων.
- Αποφυγή κοινωνικών επαφών με παιδιά και έγκυες.
- Χρήση ξεχωριστών σκευών σίτισης.
- Για το χρονικό διάστημα που αναφέρεται σε κάθε εξέταση, τα είδη εστίασης, τα ενδύματα και τα κλινოსκεπάσματα του ασθενή πρέπει να πλένονται ξεχωριστά.
- Για αποφυγή διασποράς των ούρων συστήνεται η ούρηση σε καθιστή θέση (και για τους άνδρες) χρησιμοποιώντας δύο φορές το καζανάκι. Σε περίπτωση διασποράς, το περιοχή πρέπει να καθαριστεί προσεκτικά με απορροφητικό χαρτί, το οποίο στη συνέχεια πρέπει να απορρίπτεται στη λεκάνη.
- Συχνό πλύσιμο των χεριών ειδικά μετά τη χρήση τουαλέτας.

Ραδιονουκλίδιο	Χρόνος τήρησης οδηγιών ακτινοπροστασίας
99mTc	48 ώρες
201Tl	72 ώρες
67Ga	72 ώρες
131I	72 ώρες

Πιν.4 Χρόνος τήρησης γενικών οδηγιών ανάλογα με το είδος του ραδιονουκλιδίου που χρησιμοποιείται. Πηγή: Nicholas Frane, et al [37]

Οδηγίες διασφάλισης γονιμότητας ασθενών που εκτίθενται σε ακτινοθεραπεία

Η ASCO (American Society of Clinical Oncology) προτείνει την σωστή και έγκαιρη ενημέρωση σχετικά με τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν προκειμένου να διασφαλιστεί η γονιμότητα των ασθενών. Λόγω της εξαιρετικής ραδιοευαισθησίας των ωοκυττάρων οι οδηγίες της ASCO που επρόκειτο να υποβληθούν σε ακτινοθεραπεία πυέλου περιλαμβάνουν την κρυοσυντήρηση γονιμοποιημένων ή μη ωαρίων ή και την μεταμόσχευση ιστού ωοθηκών. Όταν το πεδίο ακτινοβολίας καλύπτει όλη την περιοχή της λεκάνης η διαδικασία μεταμόσχευσης ιστού των ωοθηκών γίνεται στην άνω κοιλιακή χώρα. Συνιστάται μια προτεινόμενη απόσταση τουλάχιστον 4εκ μεταξύ της νέας θέσης των ωοθηκών και του πεδίου ακτινοβολίας. Επιπλέον η ασθενής θα πρέπει να ενημερωθεί για τις επιπλοκές που δύναται να προκαλέσει η ακτινοβολία στην μήτρα, οι οποίες περιλαμβάνουν αποβολή κύησης, πρόωρο τοκετό, χαμηλό βάρος γέννησης και ανωμαλίες του πλακούντα.

Σε ότι αφορά την ανδρική γονιμότητα η διαχεόμενη ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει μόνιμα μειωμένο αριθμό γεννητικών κυττάρων που παράγουν σπερματοζωάρια καθώς και των κυττάρων του Leydig που παράγουν τεστοστερόνη. Επειδή η ακεραιότητα του DNA του σπέρματος μπορεί να διακυβευτεί μετά από μία και μόνο θεραπεία συνιστάται η κατάψυξη των σπερματοζωαρίων [39].

Στην μελέτη των Morice et al, αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητα της αμφοτερόπλευρης μεταμόσχευσης ωοθηκικού ιστού σε 104 ασθενείς. 59 από αυτές τις γυναίκες έλαβαν ενδοκοιλιακή μονοβραχυθεραπεία με δόση έως 60Gy, ενώ οι 25 έλαβαν ακτινοθεραπεία πυέλου με 45Gy σε συνδυασμό με σισπλατίνη. Η λειτουργία των ωοθηκών αξιολογήθηκε με υπερηχογραφικό έλεγχο και ορμονικές αιματολογικές εξετάσεις. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η λειτουργία των ωοθηκών διαφυλάχθηκε στο 90% αυτών που έλαβαν βραχυθεραπεία και στο 60% αυτών που είχαν συνδυασμένη θεραπεία [47].

Στην μελέτη των Maggie E. Amer, et al, μελετήθηκε η χρησιμότητα της μελατονίνης (MLT) στην προστασία των όρχεων από την έκθεση σε ακτινοβολία [40]. Η μελέτη αφορά έρευνα πάνω στο ζωικό βασίλειο συγκεκριμένα σε αρουραίους στους οποίους χορηγήθηκαν ημερησίως επίπεδα μελατονίνης (25mg/kg) για 3 και 14 ημέρες μετά από έκθεση σε δόση ακτινοβολίας 4Gy. Έπειτα από την χορήγηση της MLT παρατηρήθηκε μείωση της φλεγμονής και ενεργοποίηση των αντιαποπτικών και αντιοξειδωτικών μηχανισμών με επακόλουθο την προστασία του DNA. Συνστήνεται περαιτέρω έλεγχος,

των αποτελεσμάτων και σύγκριση αυτών με εφαρμογή της χορήγησης MLT και σε άρρενες που επρόκειτο να ακτινοβοληθούν.

Αποτελέσματα

Η επίδραση της ακτινοβολίας στην γονιμότητα εξαρτάται από την δόση της ακτινοβολίας, την έμμεση ή άμεση ακτινοβολήση των γονάδων, τον πληθυσμός των κυττάρων που ακτινοβολήθηκαν, την διάρκεια της ακτινοβολήσης και το στάδιο στο οποίο βρίσκονται τα γεννητικά κύτταρα.

Σύμφωνα με μια πρόσφατη συστηματική ανασκόπηση δόση ακτινοβολίας >3Gy μπορούν να επιφέρουν μόνιμη αντρική στειρότητα.

Μελέτες έχουν δείξει ότι ακόμη και μικρές δόσεις ακτινοβολίας ($\leq 2\text{Gy}$) μπορούν να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των γυναικών, συμπεριλαμβανομένης της δυσλειτουργίας των ωαρίων και της υπογονιμότητας. Οι επιπτώσεις φαίνεται να είναι πιο σοβαρές σε γυναίκες μεγαλύτερης ηλικίας. Η επίδραση της ακτινοβολίας στο γυναικείο αναπαραγωγικό σύστημα διαφοροποιείται ανάλογα με την ηλικία των γυναικών, με γυναίκες πάνω από 30 ετών να είναι πιο ευαίσθητες.

Παρέχονται χρήσιμες πληροφορίες από μελέτες σε πραγματικά γεγονότα όπως το πυρηνικό ατύχημα στο Τσέρνομπιλ, για τις απώτερες επιπτώσεις της ακτινοβολίας στην αναπαραγωγική ικανότητα των ανθρώπων. Υπογραμμίζεται η σημασία της κατανόησης ιστορικών γεγονότων για την ενημέρωση των τρεχουσών και μελλοντικών προσπαθειών για τον μετριασμό της υπογονιμότητας που προκαλείται από την ακτινοβολία.

Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην θωράκιση, τον προστατευτικό εξοπλισμό του προσωπικού, την βελτιστοποίηση των τεχνικών ακτινοβολήσης και την εκπαίδευση των ασθενών για τη μείωση των κινδύνων που σχετίζονται με την έκθεση στην ακτινοβολία. Αυτές οι στρατηγικές είναι πρωταρχικής σημασίας τόσο για τους επαγγελματίες υγείας όσο και για τους ασθενείς προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα οφέλη των διαδικασιών που βασίζονται στην ακτινοβολία υπερτερούν της πιθανής βλάβης στην αναπαραγωγική υγεία.

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η ακτινοβολία που λαμβάνεται από ιατρικές εξετάσεις (αξονικές τομογραφίες και ακτινογραφίες) συνήθως είναι χαμηλής δόσης και καλά ελεγχόμενη. Παρ' όλα αυτά, η πρόληψη και η προσοχή κατά τη διάρκεια ιατρικών εξετάσεων είναι σημαντικές για τη διασφάλιση της υγείας των ανθρώπων,

ιδίως των γυναικών σε αναπαραγωγική ηλικία. Επιπλέον, η έρευνα στον τομέα αυτόν συνεχίζεται για την καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων της ακτινοβολίας στην υπογονιμότητα και την ανάπτυξη ασφαλέστερων ιατρικών διαδικασιών.

Μελλοντικοί στόχοι

Οι επιπτώσεις που προκαλεί στην αναπαραγωγική υγεία, η έκθεση στην ακτινοβολία (συμπεριλαμβανομένης της υπογονιμότητας), καθώς και η ελαχιστοποίηση αυτών, αποτελεί έναν από τους κύριους στόχους της ακτινοπροστασίας. Δημιουργείται λοιπόν η ανάγκη για συγκέντρωση περαιτέρω μελετών που σχετίζονται με τους αναπαραγωγικούς κινδύνους, λόγω έκθεσης σε ακτινοβολία και των καινοτόμων στρατηγικών προστασίας.

Απαραίτητη θεωρείται η ανάπτυξη και η εφαρμογή προηγμένων τεχνικών απεικόνισης, όπως αξονικές τομογραφίες χαμηλής δόσης, οι οποίες μειώνουν την έκθεση στην ακτινοβολία διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα της εικόνας και την διαγνωστική ακρίβεια. Άξιο αναφοράς είναι οι εξελίξεις στον τομέα της ακτινοθεραπείας, όπως η θεραπεία δέσμης πρωτονίων (Proton beam therapy), στην οποία δίνεται έμφαση στην στόχευση των καρκινικών κυττάρων με μεγαλύτερη ακρίβεια, μειώνοντας έτσι τις παράπλευρες βλάβες στα αναπαραγωγικά όργανα [41]. Επιπλέον, πρέπει να αναφερθούν οι εξελίξεις στη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) για βελτιστοποίηση δόσης και εξατομικευμένου σχεδιασμού θεραπείας με ακτινοβολία. Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αναλύσει δεδομένα για τον ασθενή και για να προσαρμόσει την ακτινοθεραπεία, μειώνοντας την περιττή έκθεση σε αναπαραγωγικά όργανα διατηρώντας παράλληλα τη θεραπευτική αποτελεσματικότητα [42]. Απαιτούνται ωστόσο περαιτέρω μελέτες για την παροχή δεδομένων, ώστε να καταστεί σαφές αν οι εξελίξεις στην τεχνολογία και η εφαρμογή τους στους διάφορους τομείς της ιατρικής ελαχιστοποιούν τους κινδύνους έκθεσης στην ακτινοβολία, ιδίως στο αναπαραγωγικό σύστημα.

Αναγκαία κρίνεται η παρακολούθηση και επιτήρηση (follow up) των ατόμων που έχουν εκτεθεί σε ακτινοβολία, ειδικά εκείνων που διατρέχουν υψηλότερο κίνδυνο λόγω επαγγελματικής έκθεσης ή ιατρικών θεραπειών. Υπογραμμίζεται η αναγκαιότητα εκτεταμένης παρακολούθησης και συλλογής δεδομένων για τον εντοπισμό τυχόν λανθάνουσας επίδρασης στη γονιμότητα ή στα αναπαραγωγικά αποτελέσματα. Η δημιουργία ολοκληρωμένων βάσεων δεδομένων ή μητρώων (database) για την

παρακολούθηση ατόμων με ιστορικό έκθεσης σε ακτινοβολία, είτε μέσω θεραπειών καρκίνου, επαγγελματικών κινδύνων ή περιβαλλοντικών συμβάντων, έτσι ώστε να βοηθούσαν τους ερευνητές στην ανάλυση και στον εντοπισμό των πιθανών αναπαραγωγικών κινδύνων, πιο αποτελεσματικά. Επιπλέον, μπορούν να διερευνηθούν πρωτόκολλα μακροχρόνιας παρακολούθησης για άτομα που έχουν λάβει ακτινοθεραπεία, συμπεριλαμβανομένων τακτικών ελέγχων και αξιολογήσεων γονιμότητας. Έτσι μπορούν να αναπτυχθούν κατευθυντήριες γραμμές για τους επαγγελματίες υγείας, για τη διασφάλιση της αναπαραγωγικής υγείας [43].

Αποφασιστικό ρόλο εξακολουθεί να έχει η εκπαίδευση και η σωστή ενημέρωση σχετικά με την υπογονιμότητα λόγω έκθεσης στην ακτινοβολία, τόσο των ατόμων σε επαγγέλματα που εκτίθενται σε ακτινοβολία, όσο και του κοινού πληθυσμού. Θα πρέπει να εντοπιστούν οι περιοχές όπου εξακολουθούν να υπάρχουν κενά γνώσης και να διενεργείται όπου απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την προώθηση της κατανόησης της υπογονιμότητας που προκαλείται από την ακτινοβολία. Καλούνται οι διάφορες ερευνητικές ομάδες και τα ερευνητικά ιδρύματα να κατευθύνουν τις προσπάθειές τους προς αυτά τα μείζονα ζητήματα.

Προτεραιότητα πρέπει τέλος να δοθεί στην διεπιστημονική συνεργασία μεταξύ ακτινολόγων, ογκολόγων, ειδικών στην αναπαραγωγή και γενετιστών, για να αποκτήσουν μια ολιστική κατανόηση της υπογονιμότητας που προκαλείται από την ακτινοβολία. Αντιμετωπίζοντας τα κενά γνώσης και τις ερευνητικές ανάγκες, παρέχεται ένας οδικός χάρτης για μελλοντική έρευνα, που θα συμβάλλει ενδεχομένως στην διασφάλιση της υγείας και στην ελαχιστοποίηση της υπογονιμότητας, που προκαλείται από έκθεση στην ακτινοβολία.

Βιβλιογραφία

- [1] Υλικό διαλέξεων μαθημάτων μεταπτυχιακών σπουδών «Φυσικές Αρχές Βιοϊατρικής Απεικόνισης και Ακτινοπροστασία» Μάθημα με τίτλο Ακτινοπροστασία Καθ.Ιατρικής Φυσικής κ.Κάππα.
- [2] <https://www.epa.gov/radtown/radtown-radiation-protection-activity-history-radiation-protection>
- [3] <https://eeae.gr/> Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας: Η ιοντίζουσα ακτινοβολία
- [4] Ιατρική φυσική και εφαρμογές στην ιατρική. Ακτινοβιολογία και Ακτινοπροστασία. Κυριάκος Ψαρράκος, Ε. Μολυβδά - Αθανασοπούλου, Άννα Γκοτζαμάνη - Ψαρράκου, Αναστάσιος Σιούντας.
- [5] Υλικό διαλέξεων μαθημάτων μεταπτυχιακών σπουδών «Φυσικές Αρχές Βιοϊατρικής Απεικόνισης και Ακτινοπροστασία» Μάθημα με τίτλο Βασικές αρχές αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης, Καθ. Ιατρικής Φυσικής κ. Θεοδώρου.
- [6] Υλικό διαλέξεων μαθημάτων μεταπτυχιακών σπουδών «Φυσικές Αρχές Βιοϊατρικής Απεικόνισης και Ακτινοπροστασία». Μάθημα με τίτλο Αρχές Ακτινοπροστασίας στην Ακτινολογία κ. Ε.Παπαναστασίου.
- [7] Radiation Emergency Medical Management ‘Radiation Units and Conversion Factors’
- [8] Υλικό διαλέξεων μαθημάτων μεταπτυχιακών σπουδών «Φυσικές Αρχές Βιοϊατρικής Απεικόνισης και Ακτινοπροστασία». Μάθημα με τίτλο Ακτινοβιολογία Καθ. κ. Γ.Τσούγκος.
- [9] Faulkner K, Vano E (2001) Deterministic effects in interventional radiology. Radiat Prot Dosimetry 94:95-98
- [10] Tiwana MS, Leslie SW. StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing; Treasure Island (FL): Jul 25, 2022. Anatomy, Abdomen and Pelvis: Testicle. [PubMed]
- [11] Lisa et al, ‘Endocrinology of the Male Reproductive System and Spermatogenesis’, 2017, NIH

- [12] Fukunaga H, et al. 'Low-dose radiation-induced risk in spermatogenesis'. *Int J Radiat Biol* 93,1291–1298. (2017)
- [13] Ludwig, H., H.Metzger: *Atlas der gynäkologischen Anatomie*. Thieme , Stuttgart
- [14] Overzier, C: *Die Intersexualität*. Thieme , Stuttgart *Developmental Biology* 6th edition. Oogenesis, NIH
- [15] Vogin G & Foray N. 'The law of Bergonié and Tribondeau: a nice formula for a first approximation' *IntJRadiatBiol* 89,2–8. (2013)
- [16] Agha A, Sherlock M, Brennan S, et al. 'Hypothalamic–pituitary dysfunction after irradiation of non-pituitary brain tumors in adults.' *J Clin Endocrinol Metab* 90: 6355–60. (2005)
- [17] F.De Felice, et al.' Radiation effects on male fertility' 2018, Wiley online library.
- [18] De Iuliis, et al 'Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro', 2009, NIH
- [19] Kavindra Kumar Kesari , 'Radiations and male fertility', 2018, *Reproductive Biology and Endocrinology*
- [20] Rowley, M.J.; Leach, D.R.; Warner, G.A.; Heller, C.G. Effect of graded doses of ionizing radiation on the human testis. *Radiat. Res.* 1974,59, 665–678.
- [21] De Felice, F.; Marchetti, C.; Marampon, F.; Cascialli, G.; Muzii, L.; Tombolini, V. Radiation effects on male fertility. *Andrology* 2019,
- [22] Biedka M, et al. (2016) Fertility impairment in radiotherapy. *Contemp Oncol (Pozn)* 20, 199–204.
- [23] Bae, M.J.; Kang, M.K.; Kye, Y.U.; Baek, J.-H.; Sim, Y.-J.; Lee, H.-J.; Kang, Y.-R.; Jo, W.S.; Kim, J.S.; Lee, C.G. Differential Effects of Low and High Radiation Dose Rates on Mouse Spermatogenesis. *Int. J. Mol. Sci.* 2021, 22, 12834
- [24] Tsatsoulis A, Shalet S, Morris I, de Kretser DM. Immunoactive inhibin as a marker of Sertoli cell function following cytotoxic damage to the human testis. *Horm Res.* 1990
- [25] Michał Skrzypek, et al 'Effect of ionizing radiation on the female reproductive system' *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 2019

- [26] Ali Asghari, et al, A review on Electromagnetic fields (EMFs) and the reproductive system, 2016, NIH
- [27] Wallace et al, 'Fertility preservation for young patients with cancer: who is at risk and what can be offered?', 2005 Pub-Med
- [28] Nicola Antonio Martino, 'Effects of low-dose X-ray medical diagnostics on female gonads: Insights from large animal oocytes and human ovaries as complementary models', 2021, NIH
- [29] Soleiman Ramezanifar, Occupational Exposure to Physical and Chemical Risk Factors: A Systematic Review of Reproductive Pathophysiological Effects in Women and Men, NIH, 2023
- [30] Barbara Grajewski. Et al, Semen Quality and Hormone Levels Among Radiofrequency Heater Operators (2000) PUB MED
- [31] Julie Cwikel, et al 'Reproductive Effects of Exposure to Low-Dose Ionizing Radiation: A Long-Term Follow-Up of Immigrant Women Exposed to the Chernobyl Accident', NIH, 2020
- [32] Birioukov et al 'Male Reproductive System in Patients Exposed to Ionizing Irradiation in the Chernobyl Accident. Archives of Andrology, 1993, PUB MED
- [33] Directive 2013/59/Euratom - protection against ionising radiation Latest update: 25/07/2019
- [34] <https://www.icrp.org/>
- [35] Radiopaedia: personal protective equipment
- [36] S A Tabish, Radiation Safety in Hospitals, Researchgate, 2011
- [37] Nicholas Frane, et al 'Radiation Safety and Protection', 2023 NIH
- [38] International Commission on Radiological Protection (2012) Proceedings of the First ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection: work of ICRP Committee 3, Ann ICRP 41 (3–4)
- [39] Ammoren Dohm, et al 'Strategies to Minimize Late Effects From Pelvic Radiotherapy', ASCO
- [40] Maggie E. Amer, et al 'Utility of melatonin in mitigating ionizing radiation-induced testis injury through synergistic interdependence of its biological properties', 2022, BMC
- [41] Derek S. Tsang, et al 'Proton beam therapy for cancer' 2019 Jun 17, CMAJ

- [42] Wei Zhao, et al ‘Artificial intelligence in image-guided radiotherapy: a review of treatment target localization’, 2021 Dec, Quant Imaging Med Surg.
- [43] Kaja Michalczyk and Aneta Cymbaluk-Płoska, ‘Fertility Preservation and Long-Term Monitoring of Gonadotoxicity in Girls, Adolescents and Young Adults Undergoing Cancer Treatment, 2021 Jan Cancers (Basel).
- [44] Tsutomu Shimura, et al ‘Lessons learned from radiation biology: Health effects of low levels of exposure to ionizing radiation on humans regarding the Fukushima accident’, J. Natl. Inst. Public Health, 67 (1) : 2018
- [45] Wallace W, Shalet S, Hendry J, Morris-Jones PH, Gattamaneni HR. Ovarian failure following abdominal irradiation in childhood: the radiosensitivity of the human oocyte.Br J Radiol.1989;62:995–8.[PubMed][Google Scholar]
- [46] Larsen E, Schmiegelow K, Rechnitzer C, et al. Radiotherapy at a young age reduces uterine volume of childhood cancer survivors. Acta Obstet Gynecol Scand. 2004;83:96–102. [PubMed]
- [47] Morice P, Juncker L, Rey A, El-Hassan J, Haie-Meder C, Castaigne D. Ovarian transposition for patients with cervical carcinoma treated by radiosurgical combination. Fertil Steril. 2000