

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

Κ. Ψαρράκος, Δ. Κουφογιάννης, Α. Σιούντας

Α. ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

1. Γενικά

Σχεδόν με την ανακάλυψη των ακτίνων X από τον W.C. Röntgen το 1895 και του φαινομένου της ραδιενέργειας από τον Henry Becquerel και το ζεύγος Marie και Pierre Curie το 1896 άρχισαν να εμφανίζονται τα πρώτα βιολογικά αποτελέσματα από τη χρήση τους, δηλαδή από τη χρήση ιοντίζουσών ακτινοβολιών.

Ως ιοντίζουσες ακτινοβολίες ορίζονται οι ακτινοβολίες που, όταν αλληλεπιδράσουν με την ύλη, προκαλούν ιοντισμούς. Στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες περιλαμβάνονται οι ακτίνες X, η ακτινοβολία γ, οι σωματιδιακές ακτινοβολίες α, β, τα νετρόνια, τα πρωτόνια, στοιχειώδη σωματίδια που προκαλούνται στις διαφόρου τύπου πυρηνικές αντιδράσεις, σωματίδια που ανευρίσκονται στην κοσμική ακτινοβολία και προϊόντα πυρηνικής σχάσης.

Με την αποκτώμενη εμπειρία και την αναγνώριση ότι οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες έχουν δυσμενή αποτελέσματα επί της υγείας άρχισε η οργάνωση της επιστημονικής κοινότητας για τη θέσπιση ορίων ακτινοπροστασίας. Σημαντικός σταθμός στην εξέλιξη της ακτινοπροστασίας υπήρξε η δημιουργία της Διεθνούς Επιτροπής Ραδιολογικής Προστασίας (ICRP) το 1928. Έκτοτε και άλλοι διεθνείς και τοπικοί φορείς και οργανισμοί υψηλού κύρους ασχολούνται με την προστασία από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Αυτοί οι οργανισμοί είναι η Επιστημονική Επιτροπή των

Ηνωμένων Εθνών επί των Αποτελεσμάτων των Ατομικών Ακτινοβολιών (UNSCEAR), η Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενεργείας (IAEE), ο Διεθνής Οργανισμός Υγείας (WHO) υπό την αιγίδα των Ηνωμένων Εθνών, η Εθνική Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας των ΗΠΑ (NCRP) και το όργανο της ΕΟΚ για θέματα εφαρμογών της πυρηνικής ενέργειας Euratom. Η ICRP από το 1990 εισηγήθηκε σημαντικές αλλαγές¹, τις οποίες συμπεριέλαβε η Ευρωπαϊκή Ένωση στην οδηγία της 96/29/EURATOM 31-5-96².

Στη χώρα μας ό,τι έχει σχέση με την ακτινοπροστασία είναι θεσμοθετημένο μέσω των Κανονισμών Ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 216 Β' 6-3-2001).

Από τις γνώσεις που αφορούν την επίδραση των ιοντίζουσών ακτινοβολιών στην οργανική ύλη, δηλαδή τη ραδιοβιολογία ή, ίσως ορθότερα, την ακτινοβιολογία, είναι ήδη γνωστό ότι τα αποτελέσματα της ακτινοβολήσεως των ανθρώπων χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες ήτοι τα καθορισμένα και τα στοχαστικά, δηλαδή αποτελέσματα τυχαίας ή στατιστικής φύσης.

Η προσπάθεια και ο σκοπός της ακτινοπροστασίας έναντι της προσβολής σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες έχει ως στόχο την αποφυγή των καθορισμένων και την ελαχιστοποίηση των στοχαστικών αποτελεσμάτων.

2. Καθορισμένα και στοχαστικά βιολογικά αποτελέσματα

Ο ιοντισμός της οργανικής ύλης προκαλεί μεταβο-

λές, έστω και παροδικές, στα άτομα και τα μόρια των χημικών ενώσεων, με αποτέλεσμα μερικές φορές την πρόκληση βλαβών στα κύτταρα. Εάν η βλάβη δεν αποκατασταθεί, τότε είτε εμποδίζει την επιβίωση ή την αναπαραγωγή του κυττάρου είτε μπορεί να οδηγήσει σε βιώσιμο αλλά τροποποιημένο κύτταρο. Τα δύο αυτά αποτελέσματα από την ακτινοβόληση του κυττάρου έχουν διαφορετικές επιδράσεις στον οργανισμό, λαμβανόμενο ως σύνολο.

Τα περισσότερα όργανα και ιστοί αντέχουν ακόμη και σε μεγάλες απώλειες του αριθμού των κυττάρων τους, αλλά εάν ο αριθμός αυτός καταστεί αρκετά μεγάλος, τότε παρατηρείται βλάβη, οφειλόμενη σε απώλεια της λειτουργικότητας του ιστού. Η πιθανότητα τέτοιου τύπου βλάβης είναι σχεδόν μηδενική σε μικρές δόσεις ακτινοβολίας, αλλά πάνω από μια τιμή δόσης (*ουδός-δόση κατωφλίου*), η πιθανότητα αυξάνει γρήγορα προς την τιμή της μονάδας (100%). Για τιμές μεγαλύτερες του ουδού η βαρύτητα του αποτελέσματος αυξάνεται με τη δόση. Τα βιολογικά αποτελέσματα αυτής της μορφής καλούνται *καθορισμένα* (deterministic).

Εάν η ακτινοβόληση έχει οδηγήσει σε βιώσιμα αλλά τροποποιημένα σωματικά κύτταρα, τότε οι κυτταρικοί κλώνοι τους, παρά τους αποτελεσματικούς αμυντικούς μηχανισμούς που υπάρχουν, σε ένα απώτερο χρονικό διάστημα (λανθάνουσα περίοδο) *μπορεί* να οδηγήσουν στην εμφάνιση καταστάσεως κακοήθειας. Η πιθανότητα αυτή είναι κατά ένα τρόπο ανάλογη με τη δόση της ακτινοβολίας, τουλάχιστον μέχρι τα επίπεδα των δόσεων, από τα οποία αρχίζουν να εμφανίζονται τα καθορισμένα αποτελέσματα, ίσως χωρίς ουδό. Η βαρύτητα του εμφανιζόμενου καρκίνου δεν επηρεάζεται από το μέγεθος της δόσης. Τα βιολογικά αποτελέσματα αυτής της μορφής ονομάζονται *στοχαστικά*, δηλαδή αποτελέσματα τυχαίας ή στατιστικής φύσης. Εάν η βλάβη αφορά σε γεννητικά κύτταρα, μέσω των οποίων μεταφέρονται πληροφορίες στις επόμενες γενεές, κάθε βλάβη που μπορεί να εμφανιστεί στους απογόνους, διάφορου τύπου και βαρύτητας, είναι επίσης στοχαστική ως προς τη φύση της, αλλά ονομάζεται *κληρονομική*. Τα ευρήματα, οι έννοιες και οι προτάσεις της ακτινοβιολογίας αποτελούν μαζί με τις ανάλογες φυσικές αρχές, τη βάση της ακτινοπροστασίας.

3. Ποσότητες και μονάδες

Απορροφώμενη δόση D

Στην ακτινοπροστασία χρησιμοποιείται κυρίως με την έννοια της μέσης απορροφώμενης δόσης ιστών ή οργάνων, δηλαδή ως το πηλίκο της ολικής ενέργειας σε Joule, που εναποτίθεται στον ιστό ή όργανο δια της μάζας αυτών. Μονάδα είναι το Gray. $1\text{Gray} = 1\text{J/kg}$.

Γραμμικά εναποτιθέμενη ενέργεια (linear energy transfer-LET)

Η LET δίδει την εναπόθεση ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής της ακτινοβολίας εντός της ύλης και συνήθως εκφράζεται σε KeV/μm. Το KeV είναι πολλαπλάσιο της μονάδας ενέργειας eV (ηλεκτρονιοβόλτ) που χρησιμοποιείται στην πυρηνική φυσική και είναι ίση με την ενέργεια που αποκτά φορτίο ίσο με εκείνο του ηλεκτρονίου εντός πεδίου, με διαφορά δυναμικού 1V.

Ενεργός Δόση

Επειδή η πιθανότητα να συμβούν στοχαστικά αποτελέσματα εξαρτάται από το είδος και την ενέργεια, δηλαδή την *ποιότητα* της ακτινοβολίας, έχει εισαχθεί η έννοια του *παράγοντος «βαρύτητα ακτινοβολίας»* w_R . Η τιμή αυτού του παράγοντα βασίζεται σε πληροφορίες ακτινοβιολογίας και σε υπολογισμούς και δίνεται σε πίνακες. Το γινόμενο της απορροφώμενης δόσης επί τον συντελεστή βαρύτητας ονομάζεται *ισοδύναμο δόσης*.

Η πιθανότητα εμφανίσεως στοχαστικών αποτελεσμάτων εξαρτάται όχι μόνο από το ισοδύναμο δόσης αλλά και από τον ακτινοβοληθέντα ιστό ή όργανο. Για ίση δόση στον πνεύμονα και στο ήπαρ η πιθανότητα εμφανίσεως καρκίνου είναι διαφορετική. Ο παράγοντας που σταθμίζει το ισοδύναμο δόσης ονομάζεται *παράγοντας βαρύτητας ιστού* w_T .

Οι τιμές των w_T έχουν επιλεγεί, έτσι ώστε μία ομοιογενής ισοδύναμη δόση σε όλο το σώμα να δίνει ενεργό δόση αριθμητικώς ίση με αυτή την ομοιογενή ισοδύναμη δόση. Σε αυτή την περίπτωση το σύνολο που προκύπτει από την άθροιση των διπλά σταθμισμένων απορροφώμενων δόσεων, τόσο για την ποιότητα των ακτινοβολιών όσο και για τον ακτινοβοληθέντα ιστό, για όλους τους ακτινοβοληθέντες ιστούς και όργανα, ονομάζεται *ενεργός δόση*, E.

Σε κάθε περίπτωση ως ακτινοβολία νοείται είτε αυτή που οφείλεται σε πηγή εκτός του σώματος είτε σε πηγή που υπάρχει μέσα στο σώμα, δηλαδή ραδιενεργό υλικό. Μονάδα ενεργού δόσης είναι το Sievert (Sv) και τα υποπολλαπλάσιά του mSv, μSv.

4. Στοιχεία ακτινοβιολογίας

Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας-βιολογικής ύλης

Η ακτινοβόληση οποιοδήποτε βιολογικού υλικού προκαλεί μία αλληλουχία διαδικασιών με μεγάλες διαφορές στην κλίμακα του χρόνου εμφανισώς τους. Γενικά όμως η αλληλουχία αυτή των διαδικασιών μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια: το φυσικό, το χημικό και το βιολογικό.

α) Φυσικό στάδιο: Η ιοντίζουσα ακτινοβολία κατά τη διέλευσή της από την ύλη, με φυσικούς μηχανισμούς αλληλεπιδράσεων, αποδίδει ενέργεια σε αυτήν μέσω ιοντισμών και διεγέρσεων. Αυτή η μεταφορά ενέργειας πραγματοποιείται σε χρόνο $< 10^{-18}$ s, και η κατανομή της στο χώρο, υπό μη συνεχή μορφή, εξαρτάται από το είδος και την ενέργεια της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Εάν η τιμή της LET είναι χαμηλή (π.χ X, γ), η ακτινοβολία προκαλεί μικρό αριθμό ιοντισμών και διεγέρσεων ανά μm της διαδρομής της. Αντιθέτως ακτινοβολίες, όπως τα σωματίδια α, τα πρωτόνια ή τα βαρέα ιόντα με υψηλή LET, προκαλούν πυκνούς ιοντισμούς ανά μm διαδρομής. Η ενέργεια που μεταφέρεται σε ένα μικρού όγκου βιολογικό υλικό δεν είναι η αυτή για όλους τους στόχους, κύτταρα εν προκειμένω, και τα μόρια που τα αποτελούν. Παρουσιάζει μία μέση τιμή και μία κατανομή πέριξ αυτής. Αυτή η μέση τιμή είναι η *απορροφώμενη δόση*.

β) Χημικό στάδιο: Τα άτομα του βιολογικού υλικού, τα οποία ακτινοβολήθηκαν κατά το φυσικό στάδιο, αντιδρούν με άλλα συστατικά των κυττάρων με ταχείες χημικές αντιδράσεις³. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ιοντισμοί και διεγέρσεις, που συνέβησαν κατά το φυσικό στάδιο, προκαλούν ρήξη χημικών δεσμών και δημιουργία ελευθέρων ριζών.

Επειδή τα βιολογικά συστήματα αποτελούνται κυρίως από νερό, ο μεγαλύτερος αριθμός των ιοντισμών συμβαίνει στα μόριά του. Τα αρνητικά φορτισμένα ελεύθερα ηλεκτρόνια (e^-), που παράγονται κατά τους ιοντισμούς, συνδέονται με πολυ-

κά μόρια νερού. Το σύμπλεγμα αυτό ονομάζεται *υδρογονωμένο ηλεκτρόνιο* (e_{aq}^-) και έχει ελαττωμένη κινητικότητα και χρόνο ζωής λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Το μόριο του νερού που έχασε το ηλεκτρόνιο αποτελεί ένα θετικά φορτισμένο ιόν, το οποίο γρήγορα διασπάται σε ένα ιόν υδρογόνου H^+ και σε μία ηλεκτρικά ουδέτερη ρίζα OH^\bullet . Η ρίζα OH^\bullet έχει ίσο αριθμό πρωτονίων και ηλεκτρονίων, αλλά ένα ηλεκτρόνιο της δε σχηματίζει ζεύγος, μέσω ηλεκτρονικού δεσμού, με αποτέλεσμα να είναι χημικά εξόχως δραστική. Παρομοίως και η ρίζα H^\bullet , που επίσης δημιουργείται, αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο, αλλά χημικώς είναι πολύ δραστική, διότι η σταθερή μορφή του υδρογόνου είναι το H_2 .

Περίπου σε 10^{-10} sec μετά την ακτινοβόληση τα ανωτέρω τρία βασικά προϊόντα της *ραδιόλυσης* του ύδατος e_{aq}^- , OH^\bullet και H^\bullet δημιουργούν περαιτέρω αντιδράσεις. Οι βλάβες των κυττάρων που οφείλονται στη δράση των ελευθέρων ριζών αναφέρονται ως *έμμεση* δράση της ακτινοβολίας, ενώ οι βλάβες που οφείλονται στον απευθείας ιοντισμό των ατόμων ονομάζονται *άμεση* δράση.

γ) Βιολογικό στάδιο: Το βιολογικό στάδιο ακολουθεί αμέσως μετά το χημικό. Αρχίζει με την εμφάνιση ενζυμικών μηχανισμών, που δρουν επιδιορθωτικά στους μοριακούς σχηματισμούς που έχουν υποστεί βλάβη κατά το χημικό στάδιο⁴. Η διάρκεια της επιδιόρθωσης διαρκεί κατά το κύριο μέρος της 15 min - 1h, ενώ περίπου σε 4 h έχει ολοκληρωθεί. Το μεγαλύτερο μέρος των βλαβών που υφίστανται τα βιολογικά μόρια, όπως το μόριο του DNA, αποκαθίσταται μέσα στο ανωτέρω χρονικό διάστημα.

Ορισμένες όμως βλάβες δεν επιδιορθώνονται και είναι αυτές που οδηγούν στο θάνατο των κυττάρων. Σε επίπεδο οργανισμού θηλαστικών και σε υψηλή δόση ακτινοβολίας τα βιολογικά αποτελέσματα της ακτινοβολήσεως οφείλονται στη θανάτωση αρχέγονων κυττάρων, που καταλήγουν σε βλάβες ιστών και οργάνων μέσα στις πρώτες εβδομάδες και μήνες μετά την ακτινοβόληση. Τα αποτελέσματα αυτά χαρακτηρίζονται ως *πρώιμα*.

Παραδείγματα πρώιμων αποτελεσμάτων είναι: Η λύση της συνεχείας του δέρματος, η απόπτωση επιθηλιακών κυττάρων του λεπτού εντέρου και οι βλάβες στο αιμοποιητικό σύστημα. Σε μεταγενέστερο χρόνο (3 μήνες - έτη) μπορεί να εμφα-

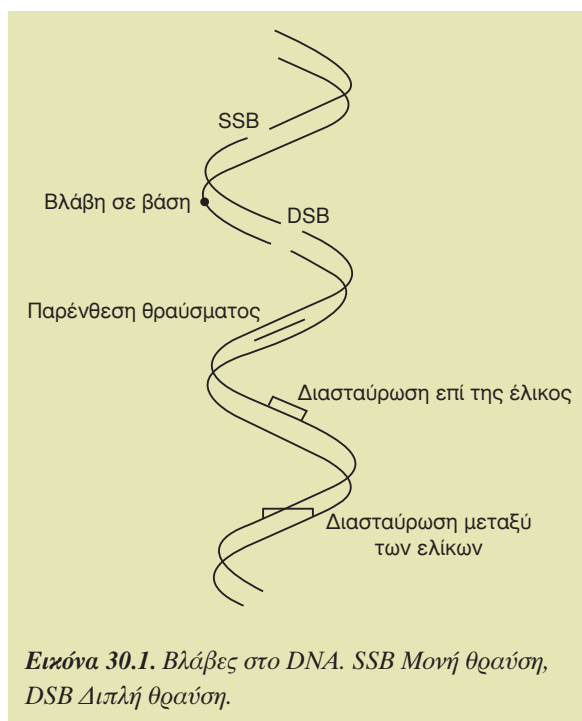
νιστούν τα *απώτερα* αποτελέσματα της ακτινοβολίας, που στην περίπτωση ακτινοβολήσεων στην ιατρική για θεραπευτικούς σκοπούς (ακτινοθεραπεία) περιλαμβάνουν την ίνωση, την ενδεχόμενη βλάβη του νωτιαίου μυελού, βλάβες των αγγείων και διάφορες βλάβες των ακτινοβοληθέντων οργάνων. Σε μεταγενέστερο στάδιο ακόμη και για μικρές δόσεις ακτινοβολίας υπάρχει η πιθανότητα καρκινογένεσης.

Ακτινική βλάβη στο DNA

Η αρχική έρευνα επί των ακτινικών βλαβών στο DNA είχε δείξει ότι υπάρχει ελάττωση του ιξώδους σε διάλυμα DNA μετά από ακτινοβολήσή του. Στη συνέχεια αποδείχτηκε ότι αυτό οφείλεται στη θραύση της έλικας του DNA.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες θραύσης ελίκων του DNA: Η θραύση που αφορά μία εκ των δύο ελίκων (SSB, single strand break) και η θραύση που αφορά και τις δύο έλικες (DSB, double strand break). Παρουσιάζονται και άλλες ακτινικές βλάβες στο DNA, όπως μεταβολές στις βάσεις του, αλλά η θραύση των ελίκων είναι η βασικότερη. Σχηματικά οι βλάβες στο DNA παρίστανται στην [εικόνα 30.1](#).

Η ακτινοβιολογία έχει καταλήξει στο συμπέρασμα μέσω πληθώρας πειραματικών δεδομένων ότι το κρίσιμο στοιχείο που καθορίζει τη θα-



Εικόνα 30.1. Βλάβες στο DNA. SSB Μονή θραύση, DSB Διπλή θραύση.

νάτωση των κυττάρων είναι η ακτινική βλάβη στο DNA. Η μέση θανατηφόρος δόση D_0 για τα κύτταρα των θηλαστικών είναι 1-2 Gy (100-200 rad). Για δόση ίση με τη D_0 από ακτινοβολία χαμηλής LET προκαλούνται περίπου 1000 θραύσεις του τύπου SSB και 40 θραύσεις DSB, όπως επίσης μεγάλος αριθμός βλαβών στις βάσεις του DNA και σταυροειδών συνδέσεων DNA - πρωτεϊνών. Από όλες αυτές τις βλάβες έχει αποδειχτεί ότι εκείνες που δεν αποκαθίστανται για αρκετές ώρες μετά την ακτινοβολήση είναι βλάβες του τύπου DSB και είναι αυτές που συσχετίζονται σημαντικά με το θάνατο του κυττάρου.

Ακτινοπροκλητές μεταλλάξεις

Οι μεταλλάξεις που προκαλούνται από την ακτινοβολία οφείλονται σε μη θανατηφόρες για το κύτταρο μεταβολές της σειράς των βάσεων στο DNA. Όταν η ακτινοβολήση πραγματοποιείται σε χαμηλούς ρυθμούς δόσεων, η συχνότητα των ακτινοπροκλητών μεταλλάξεων αυξάνεται, ενώ σε υψηλούς ρυθμούς δόσεων οι θανατηφόρες βλάβες στα κύτταρα υπερέρχονται των μεταλλάξεων. Κυτταρικός μετασχηματισμός μπορεί να συμβεί, εάν ένα μεταλλαγμένο γονίδιο προκαλεί καταστολή των φυσιολογικών μηχανισμών ελέγχου του κυτταρικού πολλαπλασιασμού.

Ακτινοπροκλητές χρωματοσωματικές αλλοιώσεις

Ένα από τα εμφανή αποτελέσματα της ακτινοβολίας είναι η πρόκληση βλαβών στα χρωματοσώματα. Η ακτινοβολήση προκαλεί καθυστέρηση της εισόδου του κυττάρου στο στάδιο της μίτωσης και όταν τα κύτταρα που ακτινοβολήθηκαν κατά τη μεσόφαση αρχίζουν τη διαδικασία διαιρέσεως, κάποια από αυτά εμφανίζουν χρωματοσωματικές αλλοιώσεις. Οι σοβαρότερες από αυτές καταλήγουν σε κυτταρικό θάνατο, ενώ άλλες μεταφέρονται σε πολλές επόμενες κυτταρικές διαιρέσεις.

Καμπύλες επιβίωσης κυττάρων μετά από ακτινοβολήση

Η μελέτη της αποκρίσεως κυτταρικών πληθυσμών στην ιοντίζουσα ακτινοβολία πραγματοποιείται με την πειραματική κατασκευή των ονομαζόμενων *καμπυλών επιβίωσης κυττάρων*.

Ως καμπύλη επιβίωσης κυττάρων ορίζεται η γραφική παράσταση του κλάσματος επιβίωσης

συναρτήσει της δόσης. Στην **εικόνα 30.2** φαίνεται μία καμπύλη επιβιώσεως. Η λήψη πειραματικών δεδομένων για κατασκευή των καμπυλών επιβιώσεως κατόπιν ακτινοβολήσεως καλλιέργειας κυττάρων στηρίζεται στον προσδιορισμό του κλάσματος επιβιώσεως. Το κλάσμα επιβιώσεως παριστά το ποσοστό του κυτταρικού πληθυσμού που επιβιώνει μετά από ακτινοβολήσή του με κάποια δόση ακτινοβολίας.

Παράγοντες που επιδρούν στο αποτέλεσμα της ακτινοβολήσεως

Οι παράγοντες οι οποίοι αυξάνουν ή ελαττώνουν τις βιολογικές επιδράσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας φέρονται με το γενικό χαρακτηρισμό *τροποποιητικοί μηχανισμοί*. Αυτοί είναι φυσικοί, χημικοί, βιολογικοί.

Δεδομένα από ακτινοβολήση ανθρώπων

Οι γνώσεις της ραδιοβιολογίας για τον άνθρωπο προέρχονται από επέκταση πειραματικών δεδομένων από επίπεδο κυττάρων και πειραματόζωων και από ραδιοβιολογικά δεδομένα από ομάδες ανθρώπων, οι οποίοι ακτινοβολήθηκαν για διάφορες αιτίες. Οι ομάδες αυτές μπορεί να καταταγούν ανάλογα με την αιτία ακτινοβολήσεως στις εξής κατηγορίες:

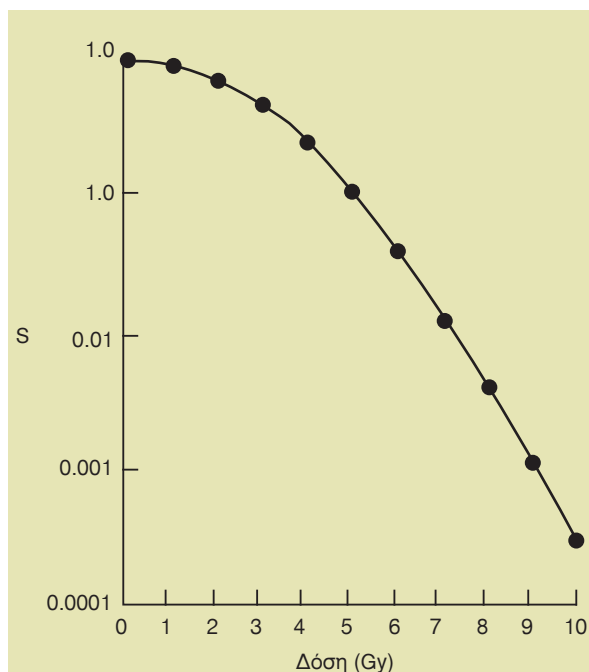
- α) Από θεραπευτική και διαγνωστική χρήση των ακτινοβολιών
- β) Από επαγγελματική έκθεση
- γ) Από επιβιώσαντες πυρηνικών εκρήξεων και ατυχημάτων.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν ομάδες ανθρώπων που ακτινοβολήθηκαν για θεραπευτικούς ή διαγνωστικούς σκοπούς. Σημαντικότερα παραδείγματα αποτελούν: Ομάδα 14.000 ατόμων που έπασχαν από αγκυλωτική σπονδυλίτιδα και δέχτηκαν δόση από ακτίνες X στη σπονδυλική στήλη 200-2000 rads. Ομάδα 11.000 παιδιών που ακτινοβολήθηκαν για πάθηση του τριχωτού της κεφαλής και ομάδα 2.872 παιδιών που ακτινοβολήθηκαν στην περιοχή του θύμου αδένου δέχθηκαν αντίστοιχα δόσεις θυρεοειδούς 6-7 και 150 rads. Ακόμη ομάδα γυναικών, που λόγω πολλαπλών ακτινοσκοπήσεων για φυματίωση κατά το χρονικό διάστημα 1940-49 δέχτηκαν μέση δόση μαστών 150 rads.

Τέλος, στην πρώτη κατηγορία ανήκουν και άλλες ομάδες, πολλές με άγνωστο αριθμό ατόμων, όπως εκείνη που κατά το 1930 τόσο στις ΗΠΑ όσο και σε άλλες χώρες ελάμβανε ραδιενεργό νερό ως γενικό τονωτικό και θεραπευτικό.

Στη δεύτερη κατηγορία, στις ομάδες που ακτινοβολήθηκαν λόγω επαγγέλματος, ανήκουν ιατροί και άλλοι επιστήμονες και τεχνικοί. Επίσης ανήκουν οι εργαζόμενοι σε ορυχεία ουρανίου, σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και σε άλλες πυρηνικές εγκαταστάσεις, οι εργαζόμενοι σε εγκαταστάσεις φυσικής υψηλών ενεργειών (κύκλωτρα, συγχροκύκλωτρα κλπ).

Η βασική κατηγορία ακτινοβοληθέντων ανθρώπων, από την οποία αντλούνται πληροφορίες ραδιοβιολογικού ενδιαφέροντος, είναι οι επιβιώσαντες (περίπου 80.000) του βομβαρδισμού των πόλεων Χιροσίμα και Ναγκασάκι, καθώς και οι απόγονοί τους. Τα δεδομένα αυτής της ομάδας είναι καλά μελετημένα και αρχαιοθετημένα, τόσο σε ό,τι αφορά στη δοσιμετρία όσο και στην επιδημιολογία. Παρ' όλα αυτά ο επιπλέον αριθμός καρκίνων, που παρατηρείται σε αυτήν την ομάδα, προσδιορίζεται με βεβαιότητα 95% μέχρι δόση 0.2 Sv και με μικρότερη βεβαιότητα για δόσεις έως 0.05 Sv.



Εικόνα 30.2. Καμπύλη επιβιώσεως κυττάρων.

Καθορισμένα αποτελέσματα

Την πλουσιότερη πηγή πληροφοριών για τα καθορισμένα αποτελέσματα των ιοντιζουσών ακτινοβολιών αποτελούν οι ομάδες που ακτινοβολήθηκαν για θεραπευτικούς σκοπούς, ιδιαιτέρως δε οι ομάδες των παιδιών⁵. Από τα δεδομένα αυτά, αλλά και τα γενικότερα, δίνονται συνοπτικά τα όρια των καθορισμένων αποτελεσμάτων στον **πίνακα 30.1**.

Πίνακας 30.1. Ουδός καθορισμένων αποτελεσμάτων

Όργανο	Αποτέλεσμα	Δόση (Gy)
Όρχεις	Ελάττωση πληθυσμού σπερμογόνιων	0.5
	Δυσλειτουργία κυττάρων Leydig	10.0
Ωοθήκες	Αμηνόρροια	>0.5
	Στείρωση	4
Θυρεοειδής αδένας	Υποθυρεοειδισμός	>1
Εγκέφαλος	Ιστοπαθολογικές αλλοιώσεις	18
	Νευροενδοκρινικά αποτελέσματα	>18
Οφθαλμός	Καταρράκτης	2
Μαστός	Υποπλασία	2
Πνεύμονες	Ίνωση	8-11
Ήπαρ	Ίνωση	12
Νεφροί	Ελάττωση σπειραματικής διηθήσεως	12
	Σκελετός	Δομικές μεταβολές
Καρδιαγγειακό	Καρδιομυοπάθεια	40
Ερυθρός μυελός οστών	Υπολειτουργία	0.5

Ένα γενικό συμπέρασμα για τα απώτερα καθορισμένα αποτελέσματα είναι η ποικιλία της δόσης κατωφλίου. Η χαμηλότερη δόση κατωφλίου αναφέρεται στους όρχεις και τον ερυθρό μυελό των οστών και είναι **0.5 Gy**.

Άμεσα καθορισμένα αποτελέσματα από υψηλές δόσεις

Η ολοσωματική εφάπαξ έκθεση σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας (>1Gy) μπορεί να συμβεί σε μείζονα ατυχήματα ή σε περίπτωση πυρηνικού πολέμου⁶.

Η αντίστοιχη καμπύλη επιβίωσης εκτιμάται

σε αυτή την περίπτωση από τη θανατηφόρο δόση LD50/60, δηλαδή τη δόση με την οποία αν ακτινοβοληθούν τα μέλη ενός πληθυσμού, το 50% θα πεθάνει εντός 60 ημερών. Για έναν υγιή ενήλικα η LD50/60 είναι μεταξύ 3 και 5 Gy. Συνήθως δε αποδίδεται η τιμή των 4.5 Gy, που είναι ίση, κατά προσέγγιση, με τη δόση ακτινοβολίας χαμηλής LET, η οποία αναστέλλει τη λειτουργία των αρχηγόνων κυττάρων του ερυθρού μυελού των οστών.

Εάν η δόση υπερβεί τα 5 Gy, στα αποτελέσματα περιλαμβάνεται βαριά βλάβη του γαστρεντερικού συστήματος, λόγω μεγάλης απώλειας κυττάρων του εντερικού επιθηλίου, καταστροφής των αρχηγόνων κυττάρων του και καταστροφής των ενδοθηλιακών κυττάρων των αγγείων. Τα αποτελέσματα αυτά σε συνδυασμό με τη βλάβη στον ερυθρό μυελό των οστών προκαλούν το θάνατο μέσα σε 1-2 εβδομάδες. Σε περίπου 10 Gy παρατηρείται οξεία φλεγμονή των πνευμόνων, που οδηγεί επίσης σε θάνατο. Σε ακόμη υψηλότερες δόσεις τα αποτελέσματα αφορούν το κεντρικό νευρικό και το καρδιαγγειακό σύστημα. Τέλος στις υψηλές δόσεις προκαλούνται βλάβες στα αγγεία και στις μεβράνες των κυττάρων.

Εκτίμηση των δόσεων που οδηγούν σε θάνατο σε διάφορους χρόνους δίνεται στον **πίνακα 30.2**.

Πίνακας 30.2 Θανατηφόρες δόσεις μετά από ομοιογενή εφάπαξ ολοσωματική ακτινοβολία με ακτινοβολία χαμηλής LET⁷

Ολοσωματική απορροφώμενη δόση (Gy)	Κύρια αιτία θανάτου	Χρόνος θανάτου μετά την έκθεση (ημέρες)
3-5	Βλάβη στο αιμοποιητικό σύστημα (LD50/60)	30-60
5-15	Βλάβη στο γαστρεντερικό σύστημα και τους πνεύμονες	10-20
>15	Βλάβη στο νευρικό σύστημα	1-5

Στοχαστικά αποτελέσματα

Η καρκινογένεση, σύμφωνα με την ισχύουσα επιστημονική θεώρηση, είναι μία διαδικασία πολλών σταδίων, και περιλαμβάνει τη συσσώρευση μιας σειράς γενετικών και επιγενετικών

μεταβολών σε ένα κλώνο ενός κυτταρικού πληθυσμού⁸. Τα διάφορα στάδια χαρακτηρίζουν διαφορετικά νεοπλάσματα και η όλη διαδικασία επηρεάζεται ισχυρά από γενετικούς, φυσικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Το DNA αποτελεί το βασικό στόχο της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, όπως έχει δειχθεί πειραματικά. Το γεγονός ότι στόχος της ιοντίζουσας ακτινοβολίας είναι το DNA και ότι οι νεοπλασίες ξεκινούν από μεταβολές σε κυτταρικό γενετικό υλικό οδήγησε στη σχετική έρευνα. Τα συμπεράσματα των ερευνητικών προσπαθειών σε ό,τι αφορά στην ακτινική καρκινογένεση είναι:

- Σημειακές μεταλλάξεις, χρωματοσωματικές διαγραφές και μετατοπίσεις ευθύνονται για την έναρξη και ανάπτυξη της νεοπλασίας. Κάποιες από αυτές τις μεταβολές αφορούν ποικιλία νεοπλασμάτων, ορισμένες αναφέρονται σε καθορισμένους τύπους νεοπλασμάτων.

- Οι σημειακές μεταλλάξεις ή οι χρωμοσωματικές μετατοπίσεις που οφείλονται στην ακτινοβολία και που ενεργοποιούν τα ονομαζόμενα πρωτο-ογκογονίδια ή οι μεταλλάξεις που απενεργοποιούν τα γονίδια ανασχέσεως όγκων (προστατευτικά γονίδια) θεωρούνται ως οι αρχικές αλλοιώσεις που οδηγούν στην καρκινογένεση.

- Υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι κάποια από τα γονίδια που συντελούν στην ανίαση των όγκων έχουν βαρύνουσα σημασία στον έλεγχο του κυτταρικού κύκλου.

- Από πειράματα επί προκλητών καρκίνων σε πειραματόζωα αποδείχθηκε ότι φυσικοί και βιολογικοί παράγοντες επηρεάζουν την ακτινική καρκινογένεση, αλλά δεν έχουν ακόμη διασαφηνιστεί οι ανάλογοι μηχανισμοί που εξηγούν τα πειραματικά δεδομένα σε κυτταρικό επίπεδο.

- Δεδομένα από πειράματα κυτταρικών μεταλλάξεων και επιδιορθώσεως του DNA⁹ φαίνεται να οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ιοντίζουσα ακτινοβολία προκαλεί την έναρξη της καρκινογένεσης περισσότερο μέσω χρωμοσωματικών μετατοπίσεων και διαγραφών και λιγότερο μέσω σημειακών μεταλλάξεων.

- Υπάρχουν διαφορές των μηχανισμών καρκινογένεσης που οφείλονται στην ακτινοβολία από εκείνους που οφείλονται σε χημικές ουσίες. Στην περίπτωση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών

δεν υπάρχει «ειδικός» καρκίνος που να αποδίδεται σε αυτές, ενώ στην περίπτωση των χημικών καρκινογόνων ουσιών υπάρχει αντιστοιχία ουσίας και προκαλούμενου καρκίνου.

Στοχαστικά κληρονομικά αποτελέσματα

Από τα υπάρχοντα ακτινοβιολογικά δεδομένα για χαμηλούς ρυθμούς δόσεων προκύπτει ότι για ένα πληθυσμό ανθρώπων με μέση ηλικία 30 ετών και προσδόκιμο επιβιώσεως 70-75 έτη, ακτινοβλούμενο συνεχώς με μικρές δόσεις και χαμηλούς ρυθμούς δόσεως, η πιθανότητα γενετικής σημαντικής βλάβης είναι 0.005 ανά Sv. Η αντίστοιχη πιθανότητα ανά άτομο του πληθυσμού για τις δύο πρώτες γενεές είναι 0.001 ανά Sv. Για όλες τις γενεές που προκύπτουν από την ακτινοβληθείσα η πιθανότητα γενετικής σημαντικής βλάβης είναι 0.014 ανά Sv. Η πιθανότητα εμφανίσεως γενετικών βλαβών ανά άτομο που εργάζεται επαγγελματικά με ακτινοβολίες είναι 0.006 ανά Sv.

Ειδικότερα από ακτινοβόληση εμβρύων κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ 8-15 εβδομάδων της ενδομήτριας ζωής αναμένεται μία πτώση του δείκτη ευφύιας κατά 30 μονάδες ανά Sv, ενώ η πιθανότητα βαριών διανοητικών διαταραχών εκτιμάται σε 0.4 ανά Sv. Οι ανωτέρω τιμές είναι για υψηλές δόσεις (>1Gy).

5. Σύστημα ακτινοπροστασίας¹⁰

Οι σύγχρονες αρχές ακτινοπροστασίας στηρίζονται στο διαχωρισμό των βιολογικών αποτελεσμάτων στις δύο κατηγορίες, των στοχαστικών και των καθοριζόμενων. Ειδική περίπτωση των στοχαστικών αποτελεσμάτων είναι τα ονομαζόμενα κληρονομικά.

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες που οδηγούν σε αύξηση της εκθέσεως στην ακτινοβολία ονομάζονται από την ICRP *πρακτικές*, ενώ οι δραστηριότητες που οδηγούν σε μείωση *παρεμβάσεις*.

Αρχές ακτινοπροστασίας που αφορούν τις πρακτικές:

α) Αρχή της αιτιολόγησης: Κατ' αυτή δεν πρέπει να ασκείται καμία πρακτική, εφόσον αυτή δεν οδηγεί σε επαρκή ωφέλεια για άτομο ή κοινωνική ομάδα σε βαθμό που να αντισταθμίζει τις βλάβες που προκαλεί η ακτινοβολία.

β) Αρχή της βελτιστοποίησης: Κάθε έκθεση, περιλαμβανομένων και των ιατρικών, πρέπει να διατηρείται τόσο χαμηλά, όσο είναι λογικά επι-

κτό, λαμβανομένων υπόψη των επικρατουσών οικονομικών και κοινωνικών συνθηκών. Η διαδικασία για επίτευξη του ανωτέρω περιλαμβάνει μέτρα περιορισμού των δόσεων στα άτομα σαν μονάδες και τον περιορισμό του κινδύνου από *δυσνητικές* εκθέσεις σε ακτινοβολία. Με τον όρο *δυσνητική* έκθεση νοείται αυτή που δεν μπορεί εκ των προτέρων να καταταγεί σε αυτές που ανήκουν στις πρακτικές ή στις παρεμβάσεις.

γ) Αρχή ορίων δόσης: Δεν επιτρέπεται υπέρβαση των ορίων δόσης που είναι νομοθετημένα, παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, με διαδικασίες που περιγράφονται στους κανονισμούς ακτινοπροστασίας και αφού ληφθεί υπόψη η αρχή της αιτιολόγησης.

Η (γ) αρχή δεν ισχύει για τις ιατρικές εφαρμογές. Σε αυτές ισχύουν οι δύο πρώτες αρχές.

Αρχές Ακτινοπροστασίας που αφορούν τις παρεμβάσεις:

α) Η παρέμβαση πρέπει να έχει περισσότερη ωφέλεια από βλάβη. Στην έννοια της βλάβης περιλαμβάνεται και το κοινωνικό κόστος της παρέμβασης.

β) Η μορφή, η κλίμακα και η διάρκεια της παρέμβασης πρέπει να διέπονται από διαδικασία βελτιστοποίησης μεταξύ της μείωσης των δόσεων και του κόστους υπό την γενική έννοια (οικονομική, κοινωνική, υγείας κλπ).

Βασικές παραδοχές και προτάσεις της ακτινοπροστασίας

Για την επίτευξη του σκοπού της η ακτινοπροστασία στηρίζεται σε παραδοχές που πηγάζουν από ακτινοβιολογικά δεδομένα, επιδημιολογικές έρευνες και μαθηματικά πρότυπα.

Συνοπτικά οι παραδοχές και προτάσεις αυτές είναι:

1. Αποφυγή εκθέσεων που οδηγούν σε δόσεις άνω του ουδού των καθορισμένων αποτελεσμάτων. Τα θεσμοθετημένα όρια φαίνονται στον **πίνακα 30.3**.

2. Την ακτινοπροστασία, εκτός από την περίπτωση εκθέσεων ατόμων σε υψηλές δόσεις (ακτινικό ατύχημα), ενδιαφέρει, επί καθημερινής βάσεως, η έκθεση σε χαμηλές δόσεις και χαμηλούς ρυθμούς δόσεων. Από την ISRP ως χαμηλή ορίζεται δόση μικρότερη του 0,2 Gy (20 rad) και ρυθμός μικρότερος του 0,1 Gy/h (10 rad/h). Η

UNSCEAR ως χαμηλή λαμβάνει δόση από εφάπαξ έκθεση <0.2 Gy, ενώ ως χαμηλό ορίζει ρυθμό <0.1 mGy/min (10mrad/min) ως μέση τιμή από έκθεση διάρκειας 1 h. Για τις χαμηλές δόσεις και τους χαμηλούς ρυθμούς δόσεων τα βιολογικά αποτελέσματα είναι στοχαστικού τύπου.

Πίνακας 30.3. Ουδός καθοριζόμενων αποτελεσμάτων

Ιστός και αποτέλεσμα	Ολικό ισοδύναμο δόσης με μία έκθεση (Sv)	Ετήσιος ρυθμός δόσης με πολλές ή υψηλές εκθέσεις επί έτη (Sv/y)
Όρχεις		
Παροδική στειρότητα	0.15	0.4
Μόνιμη στειρότητα	3.5-6.0	2.0
Ωοθήκες		
στειρότητα	2.5-6.0	>0.2
Φακός οφθαλμών		
Ανιχνεύσιμη θολότητα	0.5-2.0	>0.1
Καταρράκτης	5.0	>0.15
Μυελός οστών		
Καταστολή αιματοποίησης	0.5	>0.4

3. Τα περισσότερα ακτινοβιολογικά δεδομένα από ακτινοβολήσεις ανθρώπων, που αναφέρονται στην πρόκληση στοχαστικών αποτελεσμάτων, προέρχονται από εκθέσεις σε υψηλές δόσεις και υψηλούς ρυθμούς. Για την εφαρμογή των αντίστοιχων συντελεστών κινδύνου στην περιοχή των χαμηλών δόσεων και ρυθμών η ICRP εισάγει μία μείωση κατά ένα παράγοντα 2 που ονομάζεται *παράγοντας αποτελέσματος δόσης και ρυθμού δόσης* (DDREF).

4. Οι συντελεστές κινδύνου για καρκινογένεση στα διάφορα όργανα δίνονται στον **πίνακα 30.4**. Στον **πίνακα 30.5** δίνονται οι ολικοί συντελεστές κινδύνου για τις στοχαστικές βλάβες που ενδιαφέρουν την ακτινοπροστασία.

5. Η κατανομή της δόσης μπορεί να είναι ομοιογενής ή ανομοιογενής. Τούτο θεραπεύεται με τη χρήση της έννοιας της ενεργού ισοδύναμης δόσης.

6. Για τις χαμηλές δόσεις δεν υπάρχει κατώ-

φλι για τα στοχαστικά αποτελέσματα. Δηλαδή για την ακτινοπροστασία μηδενική πιθανότητα στοχαστικού αποτελέσματος υφίσταται μόνο για μηδενική δόση.

Πίνακας 30.4. Πιθανότητα θανάτου από καρκινογένεση συνολική και ανά όργανο

Συντελεστής πιθανότητας θανάτου x 10 ⁻⁴ ανά Sv	
Ουροδόχος κύστη	30
Μυελός οστών	50
Επιφάνεια οστών	5
Μαστός	20
Ορθό	85
Ήπαρ	15
Πνεύμονες	85
Οισοφάγος	30
Ωοθήκη	10
Δέρμα	2
Στόμαχος	110
Θυρεοειδής	8
Υπόλοιπο σώματος	50
Ολικός πληθυσμός	500
Πληθυσμός επαγγελματιών	400

Πίνακας 30.5. Συντελεστές πιθανότητας στοχαστικών βλαβών

Πιθανότητα εισαγωγής βλάβης ανά Sv (x 10 ⁻²)				
Εκτεθείς πληθυσμός	Θανα- τηφόρα νεοπλα- σματα	Μη-θανα- τηφόρα νεοπλα- σματα	Βαρέα κληρονο- μικά απο- τελέσματα	Ολικός συντε- λεστής
Ενήλικες εργαζόμενοι	4.0	0.8	0.8	5.6
Γενικός πληθυσμός	5.0	1.0	1.3	7.3

Όρια δόσεων για εργαζομένους

Μέχρι το 1990 η επιλογή των ορίων δόσεων στηριζόταν, τουλάχιστον σε ό,τι αφορά τους επαγγελματικά εργαζόμενους με ακτινοβολίες, στη λογική της πραγματοποίησης του αυτού επιπέδου ασφαλείας με εκείνη των χαρακτηριζόμενων ασφαλών βιομηχανιών.

Τώρα η ακτινοπροστασία θέτει τα όρια δόσεων ακολουθώντας μία περίπλοκη διαδικασία,

που στηρίζεται, σε πρώτη φάση, στον ποιοτικό χαρακτηρισμό του κινδύνου που οφείλεται στην ακτινοβόληση. Με τον όρο *απαράδεκτος* χαρακτηρίζεται ο κίνδυνος που δεν μπορεί να γίνει αποδεκτός υπό κανονικές συνθήκες πρακτικών. Απαράδεκτες είναι οι εκθέσεις από ακτινικά ατυχήματα.

Με τον όρο *ανεκτός* χαρακτηρίζεται ο κίνδυνος που δεν είναι μεν ευπρόσδεκτος, αλλά είναι επαρκώς αποδεκτός.

Με τον όρο *αποδεκτός* χαρακτηρίζεται ο κίνδυνος που θεωρείται ο μικρότερος που μπορεί να προκύψει μετά από διαδικασία βελτιστοποίησης.

Τα όρια της ακτινοπροστασίας τίθενται στην περιοχή μεταξύ αποδεκτού και ανεκτού κινδύνου.

Η ICRP κατέληξε στην επιλογή των **20 mSv** ενεργού δόσης το έτος για τους επαγγελματικά εργαζομένους¹¹. Το όριο αυτό λαμβάνεται ως μέση τιμή 100 mSv για πέντε έτη, χωρίς όμως καμία ετήσια δόση της πενταετίας να υπερβεί τα 50 mSv. Με αυτή την ετήσια δόση ο επαγγελματικά εργαζόμενος δε θα υπερβεί τη δόση του 1 Sv για ολόκληρη τη διάρκεια της επαγγελματικής ζωής (μέγιστο 47 έτη). Η δόση αυτή αποτελεί τη βασική επιλογή της ICRP. Στον **πίνακα 30.6** φαίνεται το πλήρες σύστημα των ορίων δόσης για τους επαγγελματικά εργαζομένους με ακτινοβολίες και για τον εν γένει πληθυσμό.

Πίνακας 30.6. Όρια δόσεων για στοχαστικά αποτελέσματα

Εφαρμογή	Όρια δόσεων	
	Επαγγελματικά εργαζόμενοι	Εν γένει πληθυσμός
Ενεργός δόση (Μέσος όρος για 5 έτη)	20 mSv/y	1mSv/y
Ετήσιο ισοδύναμο δόσης		
Φακοί οφθαλμών	150 mSv	15 mSv
Δέρμα	500 mSv	50 mSv
Χέρια, πόδια	500 mSv	

Ειδικότερα για τα ραδιονουκλίδια υπάρχουν πίνακες επιτρεπόμενων ενεργοτήτων που μπορεί να εισέλθουν στον οργανισμό με κατάποση ή εισπνοή (ALI).

Η λόγω επαγγέλματος ακτινοβολούμενη γυναίκα

Στην περίπτωση που η επαγγελματικά ασχολούμενη με ιοντίζουσες ακτινοβολίες γυναίκα είναι ή ενδέχεται να είναι έγκυος, πρέπει να λαμβάνονται επί πλέον μέτρα προστασίας του κυήματος. Το έμβρυο σε προωμότερα στάδια είναι περισσότερο ευαίσθητο, είναι δε πιθανόν μετά τη γέννηση να εμφανίσει ασθένειες σχετιζόμενες με την ενδομήτρια ακτινοβολήση.

Στην επαγγελματία γυναίκα εφαρμόζονται τα όρια που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Από τη στιγμή όμως κατά την οποία θα γίνει γνωστή η εγκυμοσύνη επιβάλλεται ένας επιπλέον περιορισμός σύμφωνα με τον οποίο η δόση στο κατώτερο τμήμα του σώματος της εγκύου για το υπόλοιπο της εγκυμοσύνης δεν πρέπει να υπερβεί τα 2mSv. Με τη δόση αυτή εκτιμάται ότι το έμβρυο δε θα προσλάβει δόση μεγαλύτερη από 1 mSv. Τέλος και η εισαγωγή των επιτρεπόμενων ενεργοτήτων ραδιονουκλιδίων στον οργανισμό (ALI) για την έγκυο πρέπει να ελαττωθεί στο 1/20.

Δόσεις για τον εν γένει πληθυσμό

Για τον εν γένει πληθυσμό το βασικό όριο είναι **1 mSv ανά έτος**. Τούτο εφαρμόζεται για τη συνολική δόση των εφαρμοζόμενων πρακτικών και όχι για καθεμία ξεχωριστά. Το γεγονός ότι υπάρχουν πρακτικές, που οδηγούν σε δόσεις συγκρίσιμες με τη φυσική ακτινοβολήση ή και μικρότερες, δε σημαίνει ότι και οι πρακτικές αυτομάτως αιτιολογούνται. Πρέπει πάντα να εφαρμόζονται οι αρχές της αιτιολόγησης και της βελτιστοποίησης. Όπως για τους επαγγελματικά εργαζόμενους, έτσι και για τον εν γένει πληθυσμό υπάρχουν πίνακες επιτρεπτών ορίων ενεργότητας ραδιονουκλιδίων που μπορεί να εισέλθουν στον οργανισμό με την κατάποση ή την εισπνοή (ALI).

Μέτρα ακτινοπροστασίας

Για να επιτευχθούν οι στόχοι της ακτινοπροστασίας, λαμβάνονται μέτρα τα οποία εξειδικεύονται ανάλογα με την πηγή της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Ασφαλώς δεν είναι δυνατό μέσα στα πλαίσια του παρόντος να περιγραφούν λεπτομερώς αυτά τα μέτρα. Γενικά αναφέρονται στον τρόπο κατασκευής των μηχανημάτων και εγκαταστάσεων και τον τρόπο λειτουργίας τους.

Σε ό,τι αφορά τον τρόπο κατασκευής αυτός αναφέρεται κυρίως στη θωράκιση των πηγών είτε αυτές είναι μία λυχνία παραγωγής ακτίνων X για ιατρικούς σκοπούς είτε ένας πυρηνικός αντιδραστήρας.

Σε ότι αφορά τον τρόπο λειτουργίας και χρήσης των πηγών ιοντίζουσας ακτινοβολίας τα μέτρα ακτινοπροστασίας αναφέρονται κυρίως στη θωράκιση του προσωπικού κατά τη λειτουργία των πηγών στην εκπαίδευση του προσωπικού, ώστε η διεξαγωγή των εργασιών να πραγματοποιείται σε όσο το δυνατό μικρότερο χρονικό διάστημα και στον εν γένει έλεγχο των εγκαταστάσεων και την παρακολούθηση των εργαζομένων από ένα σύστημα ακτινοπροστασίας, στο οποίο εντάσσονται τόσο οι εγκαταστάσεις όσο και το προσωπικό.

Για την καλύτερη οργάνωση και έλεγχο των μέτρων ακτινοπροστασίας γίνεται ταξινόμηση των περιοχών εργασίας στις οποίες υπάρχουν πηγές ιοντίζουσών ακτινοβολιών.

α) Ελεγχόμενη περιοχή. Είναι η περιοχή μέσα στην οποία ενδέχεται να γίνει υπέρβαση των 3/10 ετησίων ορίων δόσης που καθορίζονται για τους επαγγελματικά εκτιθέμενους. Η ελεγχόμενη περιοχή πρέπει να ευρίσκεται υπό το συνεχή έλεγχο του υπευθύνου ή του οργάνου ακτινοπροστασίας. Πρέπει να λαμβάνονται μέτρα ανάλογα με τη φύση των εγκαταστάσεων και το είδος των εκτελούμενων εργασιών.

β) Επιβλεπόμενη περιοχή. Κάθε περιοχή στην οποία ο επαγγελματικά εργαζόμενος ενδέχεται να υπερβεί το 1/10 των ετησίων ορίων δόσης, αλλά να μην υπερβεί τα 3/10 αυτών.

Με το παραπάνω σύστημα ταξινόμησης περιοχών ο υπεύθυνος ακτινοπροστασίας διευκολύνεται στον έλεγχο και την εφαρμογή των κατά περίπτωση μέτρων.

Κατά την εφαρμογή των μέτρων ακτινοπροστασίας γίνεται ανάλυση του κόστους σε συνδυασμό με την ωφέλεια από την εφαρμογή τους.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι με όποιο σύστημα, με όποια μέσα και αν χρησιμοποιούνται τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας είναι η απόσταση, η θωράκιση και ο χρόνος.

Στην Ελλάδα ό,τι αφορά τους ισχύοντες Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας περιγράφεται στο ΦΕΚ 216 Β/ 6-3-2001.

Β. ΜΗ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Εισαγωγή

Ενώ οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες του κεχρμπαραριού (ήλεκτρο) περιγράφηκαν από τους αρχαίους Έλληνες, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία δεν ανακαλύφθηκαν παρά το 1888, όταν περιγράφηκαν για πρώτη φορά από τον Holerith Hertz. Αμέσως μετά το 1889 ο d'Arsonval και ο Tesla, ανεξάρτητα, παρατήρησαν για πρώτη φορά επιδράσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε βιολογικούς οργανισμούς. Η πεποίθηση για τις βιολογικές επιδράσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στον άνθρωπο απαντάται και στον Ιπποκράτη, στις προσπάθειές του να θεραπεύσει όγκους στο στήθος με ηλιοθεραπεία (υπεριώδης ακτινοβολία). Ιστορικής σημασίας είναι και οι προσπάθειες του d'Arsonval, ο οποίος εφάρμοσε θεραπευτικά πρωτόκολλα με πεδία εξ επαγωγής, τοποθετώντας τους ασθενείς σε κρεβάτια-πηνία (σώζονται στο μουσείο Welcome του Λονδίνου). Από το 1930 η τεχνολογική πρόοδος έδωσε τη δυνατότητα να δημιουργηθούν ελεγχόμενα και σχετικά ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία και, σχεδόν ταυτόχρονα, άρχισε να διαδίδεται και η βιολογική μελέτη-έρευνα τους. Σήμερα είναι βέβαιο ότι τα εξωγενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία έχουν άμεση σχέση με τις βιολογικές λειτουργίες των ζωντανών οργανισμών¹². Εξωγενή θεωρούνται τα πεδία τα οποία δημιουργούνται εξωτερικά από άλλες δραστηριότητες του ανθρώπου και απορροφώνται από το ανθρώπινο σώμα.

Οι βιολογικές επιδράσεις από την απορρόφηση της μη ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι ένα ζήτημα επίμαχο κοινωνικά. Αφενός οι τεχνολογικά ανεπτυγμένες κοινωνίες μας συμβιώνουν αναγκαστικά με το πρόβλημα (με αυξανόμενους ρυθμούς), αφετέρου οι διάφορες κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές ομάδες προσεγγίζουν το πρόβλημα από διαφορετικές και συχνά αντίπαλες σκοπιές.

Γενικά

Ακτινοβολία είναι η μετάδοση ενέργειας με εκπομπή. Βασικά μεγέθη για το χαρακτηρισμό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι η συχνότητα ν (σε Hertz), το μήκος κύματος λ (σε μέτρα)

και η ενέργεια των φωτονίων E (σε Joule ή σε ηλεκτρονιοβόλτ, eV). Τα μεγέθη αυτά συνδέονται μεταξύ τους με τις σχέσεις $c = \lambda \nu$ και $E = h\nu = hc/\lambda$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και h η σταθερά του Plank.

Όλο το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας χωρίζεται σε δύο βασικές περιοχές, την ιοντίζουσα και τη μη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Βασικό στοιχείο διαχωρισμού είναι η ικανότητα που έχουν τα φωτόνια της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, όταν απορροφηθούν από την ύλη, να προκαλούν ρήξη των χημικών δεσμών στα μόρια και να δημιουργούν ιόντα. Για την ιατρική φυσική ως όριο μεταξύ μη ιοντίζουσας και ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας θεωρείται η ενέργεια των φωτονίων που είναι ικανή να ιοντίσει τα άτομα του μορίου του νερού ($1,978 \cdot 10^{-18}$ Joules ή 12,4 eV). Στο πλήρες φάσμα η ενέργεια αυτή βρίσκεται στην υπεριώδη περιοχή του φωτός (UV) με μήκος κύματος 100 nm. Η μη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αναφέρεται σε συχνότητες του φάσματος μέχρι 10^{15} Hz. Πρακτικά αυτό καλύπτει την περιοχή του φάσματος έως και την υπεριώδη ακτινοβολία.

Γενικά όμως ένα μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας δε συμπεριλαμβάνεται στη μη ιοντίζουσα ακτινοβολία, γιατί ακτινοβολίες με μήκος κύματος μικρότερο από 295 nm απορροφώνται έντονα από την ατμόσφαιρα και δεν παρουσιάζουν μέχρι τώρα ιδιαίτερο βιολογικό ενδιαφέρον, ενώ είναι λίγες οι “σημαντικές” πηγές που χρησιμοποιούν τις συχνότητες αυτές (μερικά μόνο LASER).

Ωστόσο η αναφορά στον όρο αυτό σε θέματα αλληλεπίδρασης με τους βιολογικούς οργανισμούς “περιορίζεται” μέχρι τη συχνότητα των 300 GHz.

Στη συνέχεια με την αναφορά σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή ηλεκτρομαγνητικά πεδία εννοείται η μη ιοντίζουσα ακτινοβολία και τα αντίστοιχα πεδία.

Βασικές αρχές

Η αποθήκευση ενέργειας σε μορφή ηλεκτρικού πεδίου είναι ευρέως γνωστή. Μία συσκευή, η οποία είναι συνδεδεμένη στο ρεύμα, δημιουργεί ένα αντίστοιχο ηλεκτρικό πεδίο, ακόμη και εάν είναι εκτός λειτουργίας. Τα ηλεκτρικά πεδία είναι ισχυρότερα κοντά στη συσκευή και ελαττώ-

νονται με την απόσταση. Κοινά υλικά όπως το ξύλο και τα μέταλλα αποτελούν θωράκιση. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μετράται σε Volt ανά μέτρο.

Εξίσου γνωστή θεωρείται και η αποθήκευση ενέργειας σε μορφή μαγνητικού πεδίου. Μία συσκευή η οποία είναι συνδεδεμένη στο ρεύμα έχει ένα αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο, μόνο όταν λειτουργεί και διαρρέεται από ρεύμα. Η έντασή του είναι ανάλογη του ρεύματος που χρησιμοποιεί και μειώνεται γρήγορα με την απόσταση. Τα περισσότερα κοινά υλικά δεν αποτελούν θωράκιση και τα διαπερνά εύκολα. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου μετράται σε Ampère ανά μέτρο. Συχνά εκφράζεται με την αντίστοιχη μαγνητική επαγωγή και μετράται σε Tesla. Συχνά επίσης εκφράζεται και σε Gauss, όπου ένα Tesla ισοδυναμεί με 10.000 Gauss.

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκπέμπεται, όταν υπάρχει επιτάχυνση ή επιβράδυνση στην κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Η ύπαρξη και η κίνηση ηλεκτρικών φορτίων σε ένα σώμα δημιουργεί στο γύρω χώρο ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο, στο οποίο αποθηκεύεται ενέργεια. Η συνεχής μεταβολή στην κίνηση των φορτίων αυτών δημιουργεί μία συνεχή ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του σώματος (ηλεκτρικού κυκλώματος) και του γύρω χώρου. Κατά την ανταλλαγή αυτή ένα μέρος της ενέργειας “χάνεται” στο χώρο και εκπέμπεται ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Η ικανότητα ενός σώματος να ακτινοβολεί εξαρτάται σημαντικά από τη γεωμετρία του. Στην **εικόνα 30.3** φαίνονται οι δύο ακραίες περιπτώσεις του πυκνωτή (μέγιστη αποθήκευση ενέργειας) και του δίπολου (μέγιστη εκπομπή ενέργειας). Δίπολο ή κεραία θεωρούνται συχνά δύο έννοιες ταυτόσημες, αφού ο ένας πόλος της κεραίας είναι η γη.

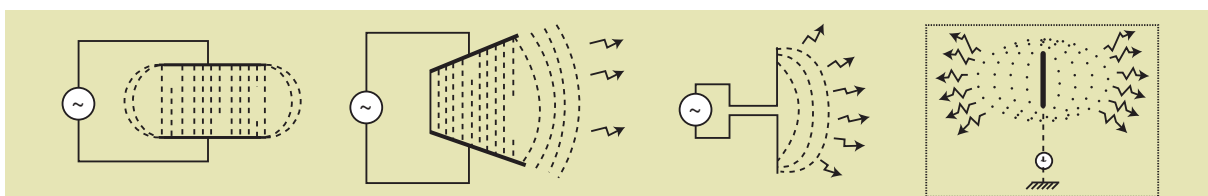
Η ενέργεια που εκπέμπεται αποθηκεύεται και διαδίδεται μέσω δύο πεδίων, ενός ηλεκτρι-

κού και ενός μαγνητικού. Κατά τη διάδοση η ενέργεια εναλλάσσεται μεταξύ των δύο αυτών πεδίων τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα. Εάν σε κάποιο σημείο αναιρεθεί το ένα, σταματά η διάδοση. Για το λόγο αυτό είναι εξίσου δόκιμο η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία να αναφέρεται και ως ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Για τη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αναπτύχθηκαν διάφορες θεωρίες με επικρατέστερη την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell. Με ένα σύστημα από τέσσερις διαφορικές εξισώσεις, τις γνωστές εξισώσεις του Maxwell, περιγράφονται τα φαινόμενα της εκπομπής, της διάδοσης και της απορρόφησης από την ύλη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι εξισώσεις, βέβαια, αυτές δεν είναι καθόλου εύχρηστες και συνήθως χρησιμοποιούνται μερικές λύσεις ή κατά περίπτωση και “πρακτικές” λύσεις.

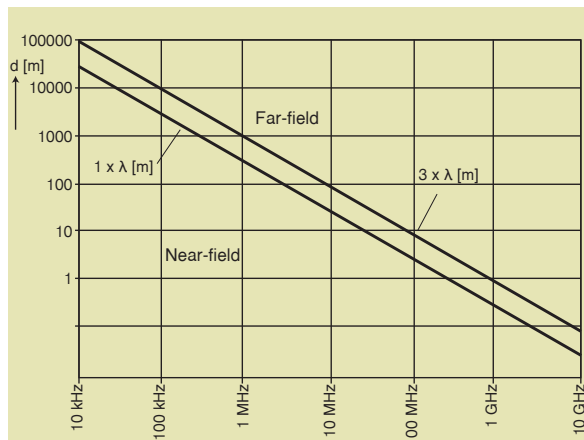
Κατά τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων διακρίνονται δύο περιοχές, το εγγύς (κοντινό) πεδίο (near field) και το απόμακρο (μακρινό) πεδίο (far field)¹³. Τα δύο αυτά πεδία διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ως προς τη “φυσική” τους, ως προς την ένταση και την εξέλιξη των φαινομένων αλλά και ως προς τα αποτελέσματα της διάδοσης και της απορρόφησης τους. Τα εγγύς πεδία εκτός του ότι είναι ισχυρότερα είναι πλέον περίπλοκα και περισσότερο “επικίνδυνα”. Γενικά ο χώρος του εγγύς πεδίου συμπεριφέρεται παρόμοια με τις συνθήκες συντονισμού και κάθε σημείο του μπορεί να θεωρηθεί ως σημείο εκπομπής. Πρακτικά το όριο μεταξύ του εγγύς και του απόμακρου πεδίου εξαρτάται από τη μέγιστη διάσταση L της κεραίας εκπομπής και από το μήκος κύματος λ της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτό βρίσκεται σε απόσταση $D=2L^2/\lambda$ από το σημείο εκπομπής.

Στις τεχνολογικές εφαρμογές το μήκος L της κεραίας εκπομπής προσαρμόζεται στο μήκος κύματος. Κατά συνέπεια τα όρια μεταξύ κοντινού



Εικόνα 30.3. Παραδείγματα ικανότητας εκπομπής ακτινοβολίας από δύο διαφορετικές επιφάνειες.

και μακρινού πεδίου μπορεί να προσδιοριστούν πρακτικά με βάση μόνο τη συχνότητα της ακτινοβολίας από το διάγραμμα (Εικ. 30.4). Η μεταβολή δεν είναι απότομη και για τις συνθήκες κοντινού πεδίου προτιμάται η καμπύλη 3λ του διαγράμματος.



Εικόνα 30.4. Διάγραμμα εκτίμησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Ο διαχωρισμός μεταξύ κοντινού και μακρινού πεδίου αναφέρεται σε εκπεμπόμενη ακτινοβολία και όχι στην περίπτωση που για τη μετάδοση χρησιμοποιείται κυματοδηγός, όπως για παράδειγμα στις διαθερμίες που χρησιμοποιούνται στη χειρουργική για αιμόσταση ή τομή ιστών.

Η διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διέπεται μεν από τις εξισώσεις του Maxwell, πρακτικά όμως αντιμετωπίζεται και μελετάται σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, ανάλογα με τη σχέση του μήκους κύματος λ της ακτινοβολίας και τη μέγιστη διάσταση L του σώματος που την εκπέμπει. Έτσι όταν το λ είναι πολύ μικρότερο του L , εφαρμόζεται η θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Όταν είναι της ίδιας τάξης (λ και L), εφαρμόζεται η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και των μικροκυμάτων. Όταν το λ είναι πολύ μεγαλύτερο του L , εφαρμόζεται η θεωρία της οπτικής και της γεωμετρικής οπτικής. Σε όλες όμως τις περιπτώσεις, για την εξέλιξη και την ένταση των φαινομένων εμπλέκονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μέσου με το οποίο γίνεται η διάδοση.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία απορροφάται από όλα τα υλικά τα οποία βρίσκονται μέσα

στο χώρο που διαδίδεται, και φυσικά και από τους ζωντανούς οργανισμούς. Στην περίπτωση αυτή, τα κυριότερα χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (μετράται σε Volt/m), η ένταση του μαγνητικού πεδίου (μετράται σε Ampère/m) και η πυκνότητα ισχύος (μετράται σε Watt/m²).

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας ακολουθεί αντίστοιχους με την εκπομπή νόμους. Για την ανίχνευση και τη συλλογή της ενέργειας και των πληροφοριών που μεταφέρει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χρησιμοποιούνται αντίστοιχα με την εκπομπή δίπολα και κεραίες.

Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης

Η μελέτη για τα βιολογικά αποτελέσματα από την απορρόφηση της μη ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι ακόμη αντικείμενο έρευνας αιχμής¹². Τελικά αποτελέσματα από την απορρόφηση ενέργειας από τους βιολογικούς ιστούς διακρίνονται, γενικά, σε τρεις κατηγορίες¹⁴.

- Τα θερμικά αποτελέσματα τα οποία είναι και τα πλέον γενικά.
- Τα μη θερμικά αποτελέσματα τα οποία μπορεί να συνυπάρξουν ή να είναι απόρροια θερμικών αποτελεσμάτων. Κυρίως είναι αποτελέσματα που προέρχονται από την αντίδραση του οργανισμού μέσω του θερμορυθμιστικού του συστήματος.
- Τα αθερμικά αποτελέσματα, που είναι και τα πλέον επικίνδυνα, προέρχονται από μεταβολές στις λειτουργίες κυττάρων, ιστών και οργάνων, αφού, για παράδειγμα, μεγάλο μέρος των λειτουργιών τους βασίζεται στην κίνηση ιόντων, η οποία επηρεάζεται άμεσα από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Δοσιμετρία - εκθεσημετρία

Μερικά από τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, εκτός από την ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, είναι και τα παρακάτω¹⁵.

- Το ρεύμα επαφής (I_c). Είναι το ρεύμα μεταξύ ενός ατόμου και ενός αντικειμένου και εκφράζεται σε ampère (A). Ένα αγωγίμο σώμα που βρίσκεται μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να φορτιστεί από αυτό.

- Η πυκνότητα ρεύματος (J). Είναι το ρεύμα που διέρχεται από μοναδιαία διατομή ενός τρισδιάστατου αγωγού, όπως είναι το ανθρώπινο σώμα, κάθετα προς τη διεύθυνση του ρεύματος και εκφράζεται σε ampère ανά τετραγωνικό μέτρο (A/m^2).
- Η πυκνότητα ισχύος (S). Είναι το μέγεθος που χρησιμοποιείται για πολύ υψηλές συχνότητες, όταν το βάθος της διείσδυσης στο σώμα είναι μικρό. Είναι η ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα προς την επιφάνεια του σώματος, διαιρούμενη με το εμβαδόν της επιφάνειας και εκφράζεται σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2).
- Η ειδική απορρόφηση ενέργειας. Είναι η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα βάρους βιολογικού ιστού και εκφράζεται σε Joule ανά χιλιόγραμμα (J/Kgr). Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των μη θερμικών επιπτώσεων από την ακτινοβολία παλμικών μικροκυμάτων.
- Ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης (Specific Absorption Rate-SAR). Είναι ένα από τα βασικότερα μεγέθη που χρησιμοποιούνται και υπολογίζεται είτε ως μέση τιμή για όλο το σώμα είτε για μέρη αυτού. Είναι η ταχύτητα με την οποία απορροφάται η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους ιστούς του σώματος ανά μονάδα βάρους και εκφράζεται σε Watt ανά χιλιόγραμμα (W/Kgr). Ο SAR είναι γενικά το πλέον αποδεκτό μέγεθος για την εκτίμηση των δυσμενών βιολογικών επιδράσεων από την απορρόφηση μη ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους ζωντανούς οργανισμούς. Εκτός από τη μέση τιμή του SAR για όλο το σώμα συχνά χρησιμοποιούνται και οι τιμές του για περιορισμένα μέρη του σώματος, ώστε να εκτιμηθεί η απορρόφηση ενέργειας που οφείλεται σε ειδικές συνθήκες έκθεσης, όπως για παράδειγμα η χρήση κινητού τηλεφώνου.

Από τα παραπάνω μεγέθη άλλα μπορεί να μετρηθούν άμεσα και άλλα να εκτιμηθούν με υπολογισμούς.

Σε συνθήκες έκθεσης, οι μετρήσεις και ο ποσοτικός χαρακτηρισμός της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας απαιτεί ιδιαίτερη τεχνογνωσία και προσοχή. Το ίδιο πρόβλημα ανακύπτει, ακόμη και όταν μελετάται η ακτινοβολία από συγκεκριμένα πηγή με δεδομένα όλα τα χαρακτηριστικά

της. Γιατί είναι σχετικά δύσκολο να προσδιοριστούν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των υλικών μέσω των οποίων διαδίδεται και των υλικών από τα οποία απορροφάται.

Για τη μελέτη των βιολογικών επιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν επαρκεί η γνώση μόνο της έντασης ή και ορισμένων άλλων χαρακτηριστικών των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ο θεωρητικός υπολογισμός της ενέργειας που απορροφά το ανθρώπινο σώμα είναι συχνά ανεπαρκής, λόγω της εμπλοκής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που προέρχονται από πολλές και διαφορετικές πηγές, του διαφορετικού τρόπου με τον οποίο διαδίδονται στο χώρο, της διαφορετικής συμπεριφοράς του μέσου στο οποίο διαδίδονται και για διάφορους άλλους λόγους.

Για συγκεκριμένη έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, οι τιμές του SAR παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις μέσα στο ίδιο σώμα. Τα βιολογικά αποτελέσματα από την έκθεση σε μη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εξαρτώνται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που εφαρμόζονται στο εσωτερικό των ζώντων οργανισμών και, συνεπώς, μεγαλύτερη σημασία για τη μελέτη έχει ίσως ο προσδιορισμός της ενέργειας η οποία απορροφάται από τους ζωντανούς οργανισμούς. Επιπλέον όταν εισέρχεται η ίδια ενέργεια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τα χαρακτηριστικά του απορροφώμενου μέρους αυτής είναι διαφορετικά στα ζώα από ότι στον άνθρωπο. Γενικά όταν ένα σώμα εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η απορροφώμενη ενέργεια, η ανακλώμενη ενέργεια και η διερχόμενη ενέργεια της ακτινοβολίας εξαρτώνται από τη συχνότητά της, το μέγεθος του ακτινοβολούμενου σώματος, τη σύστασή του, το σχήμα του, τον προσανατολισμό του σε σχέση με τη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, την απόστασή του από την πηγή και από άλλους παράγοντες.

Η κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μέσα στα βιολογικά υλικά και η κατανομή της ενέργειας που απορροφάται καθορίζονται από τη διηλεκτρική τους σταθερά, την αγωγιμότητα, τη γεωμετρία του οργάνου καθώς και από τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας, στην οποία εκτίθενται. Η γνώση της κατανομής αυτής στο εσωτερικό του οργανισμού είναι σημαντική, διότι συνδέεται με συγκεκριμένες αντιδράσεις, διευκολύ-

νει την κατανόηση φαινομένων και συνεισφέρει στον προσδιορισμό των μηχανισμών αλληλεπίδρασης. Έχουν αναπτυχθεί πολλά θεωρητικά πρότυπα, τα οποία έχουν και πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμούς στην εφαρμογή τους. Για το θεωρητικό υπολογισμό του μέσου SAR για το ανθρώπινο σώμα για συχνότητες μέχρι 600 MHz χρησιμοποιούνται αριθμητικές τεχνικές, όπου όλο το σώμα χωρίζεται σε ομογενείς κυψελίδες, οι οποίες διαφέρουν ως προς τη σύνθεσή τους. Για μεγαλύτερες συχνότητες χρησιμοποιούνται αναλυτικές εξισώσεις και το ανθρώπινο σώμα χωρίζεται σε κυλινδρικές ζώνες. Για συχνότητες μεγαλύτερες από 7GHz χρησιμοποιούνται πρότυπα γεωμετρικής οπτικής, στα οποία η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία περιγράφεται με διαδιδόμενες ακτίνες.

Είναι χαρακτηριστικό ότι οι διάφοροι ιστοί που αποτελούν το ανθρώπινο σώμα παρουσιάζουν επιλεκτική απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ως προς την συχνότητά της. Η μέγιστη απορρόφηση παρατηρείται για τη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 30MHz και 300MHz, δηλαδή για συχνότητες που χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τις τηλεπικοινωνίες των μαζικών μέσων ενημέρωσης (ραδιοφωνία και τηλεόραση).

Εκτός από την εξάρτηση του SAR από τη συχνότητα της ακτινοβολίας, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει εξάρτηση και από τα χαρακτηριστικά πόλωσης της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο σώμα αλλά και από το ρυθμό εισόδου (συνεχής ή παλμικός).

Για τον περιορισμό της έκθεσης σε μη ιοντίζουσες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες καθορίζονται όρια επικινδυνότητας και όχι όρια ασφαλείας, όπως και στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες, γιατί καμία δόση ακτινοβολίας δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ασφαλής, όσο μικρή και αν είναι.

Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '50 η έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία πυκνότητας ισχύος 100mW/cm^2 θεωρούνταν καταστροφική για τους ζώντες οργανισμούς. Στη συνέχεια κατά καιρούς έχουν προταθεί όρια επικινδυνότητας $0,1\text{mW/cm}^2$, 1mW/cm^2 και 10mW/cm^2 .

Τα όρια επικινδυνότητας της μη ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που έχουν καθιερωθεί μέχρι τώρα, διαφέρουν σημαντικά *ανάλογα με τον επιστημονικό οργανισμό που τα κα-*

θιέρωσε και το κράτος που τα αποδέχεται. Η βασικότερη αιτία είναι η διαφορετική εκτίμηση ως προς τους σημαντικότερους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τους ιστούς. Όταν εκτιμώνται κυρίως τα θερμικά αποτελέσματα από την αλληλεπίδραση αυτή, τα όρια επικινδυνότητας είναι αρκετά υψηλά. Αντίθετα όταν συνεκτιμώνται και τα αθερμικά αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τους βιολογικούς ιστούς, τα όρια επικινδυνότητας είναι σημαντικά χαμηλότερα.

Από την Ευρωπαϊκή Ένωση οριστικοποιήθηκαν το 1999 συστάσεις για τον περιορισμό της έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0Hz-300GHz)¹⁶.

Για την εφαρμογή περιορισμών που βασίζονται στην εκτίμηση πιθανών επιπτώσεων στην υγεία από ηλεκτρομαγνητικά πεδία πρέπει να γίνεται διαφοροποίηση μεταξύ βασικών περιορισμών και επιπέδων αναφοράς. Οι βασικοί περιορισμοί και τα επίπεδα αναφοράς για τον περιορισμό της έκθεσης καταρτίστηκαν ύστερα από διεξοδική ανασκόπηση όλης της δημοσιευμένης βιβλιογραφίας και μετά από την πενταετή δοκιμαστική ισχύ κανονισμών που είχαν προταθεί το 1994. Σκοπός των κριτηρίων που εφαρμόστηκαν κατά την ανασκόπηση αυτή ήταν να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και ως βάση χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι αποδεδειγμένες βιολογικές επιδράσεις. *Δε θεωρήθηκε ότι έχει αποδειχτεί η πρόκληση καρκίνου από μακροχρόνια έκθεση σε πεδία πολύ χαμηλής συχνότητας.* Ωστόσο, επειδή μεταξύ των οριακών τιμών για τις οξείες επιπτώσεις και των βασικών περιορισμών υπάρχουν συντελεστές ασφαλείας μεγέθους 50, η παρούσα σύσταση καλύπτει σιωπηρά τις υπάρχουσες μακροπρόθεσμες επιπτώσεις ολόκληρου του φάσματος συχνοτήτων.

Ως βασικοί περιορισμοί χαρακτηρίζονται οι αφορώντες σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία, που στηρίζονται άμεσα σε αποδεδειγμένες επιπτώσεις στην υγεία με βάση βιολογικές μελέτες. Ανάλογα με τη συχνότητα του πεδίου, για να προσδιορισθούν αυτοί οι περιορισμοί, χρησιμοποιούνται τα φυσικά μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω, η πυκνότητα μαγνητικής ροής, η πυ-

κνότητα ρεύματος, ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης και η πυκνότητα ισχύος.

Τα επίπεδα αναφοράς χρησιμοποιούνται για την πρακτική εκτίμηση της έκθεσης, προκειμένου να διαπιστωθεί το ενδεχόμενο υπέρβασης των βασικών περιορισμών. Ορισμένα επίπεδα αναφοράς προέρχονται από σχετικούς βασικούς περιορισμούς με τη χρήση μετρήσεων ή/και διαδικασιών υπολογισμού, ενώ άλλα περιλαμβάνουν την αντίληψη και τις δυσμενείς έμμεσες επιπτώσεις της έκθεσης σε ΗΜΠ. Σε κάθε κατάσταση έκθεσης οι μετρούμενες ή οι υπολογιζόμενες τιμές πολλών μεγεθών μπορεί να συγκριθούν με το αντίστοιχο επίπεδο αναφοράς. Η συμμόρφωση με το επίπεδο αναφοράς εξασφαλίζει τη συμμόρφωση με τον αντίστοιχο βασικό περιορισμό. Εάν η μετρούμενη τιμή υπερβαίνει το επίπεδο αναφοράς, δεν έπεται κατ' ανάγκη και υπέρβαση του βασικού περιορισμού. Οποσδήποτε κάτω από αυτές τις συνθήκες θα πρέπει να εξακριβωθεί η συμμόρφωση ή μη με το βασικό περιορισμό.

Στη σύσταση δεν προβλέπονται ποσοτικοί περιορισμοί για τα στατικά ηλεκτρικά πεδία. Εντούτοις συνιστάται η αποφυγή ενοχλητικών ηλεκτρικών φορτίων επιφανείας και ενοχλητικών ή εκνευριστικών εκκενώσεων σπινθήρων.

Τα δοσιμετρικά - εκθεσημετρικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των βασικών περιορισμών από ηλεκτρομαγνητικά πεδία επιλέγονται για διάφορες ζώνες συχνότητας ανάλογα με τα κυριότερα βιολογικά τους αποτελέσματα:

- Για τα περίπου στατικά και ημιστατικά πεδία μέχρι 1 Hz προβλέπονται βασικοί περιορισμοί

για την πυκνότητα της μαγνητικής ροής και την πυκνότητα ρεύματος, ώστε να προληφθούν επιπτώσεις στο καρδιαγγειακό και στο κεντρικό νευρικό σύστημα.

- Για συχνότητες από 1 Hz μέχρι 10 MHz προβλέπονται βασικοί περιορισμοί για την πυκνότητα ρεύματος με στόχο την πρόληψη επιπτώσεων σε λειτουργίες του νευρικού συστήματος.
- Για συχνότητες από 100 KHz μέχρι 10 GHz προβλέπονται βασικοί περιορισμοί για το SAR με στόχο την πρόληψη θερμοπληξίας ολόκληρου του σώματος και υπερβολικής τοπικής θέρμανσης των ιστών.
- Για συχνότητες από 10 GHz μέχρι 300 GHz προβλέπονται βασικοί περιορισμοί για την πυκνότητα ισχύος με στόχο την πρόληψη της θέρμανσης των ιστών στην επιφάνεια του σώματος ή κοντά της.

Στον **πίνακα 30.6** φαίνονται οι βασικοί περιορισμοί για την έκθεση του γενικού πληθυσμού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, στους οποίους ελήφθησαν υπόψη οι αβεβαιότητες που υπάρχουν σε ό,τι αφορά την ατομική ευαισθησία (electrosensitivity), τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τις διαφορές στην ηλικία και στην κατάσταση της υγείας των ατόμων¹⁷.

Πολλά από τα μεγέθη για τα οποία προβλέπονται βασικοί περιορισμοί δεν είναι άμεσα μετρήσιμα. Για λόγους σύγκρισης για τις τιμές μετρούμενων μεγεθών προβλέπονται επίπεδα αναφοράς σχετικά με την έκθεση. Η μη υπέρβαση όλων των προτεινόμενων επιπέδων αναφοράς, που περιλαμβάνονται στον **πίνακα 30.7**, θα εξασφαλίσει την τήρηση βασικών περιορισμών.

Πίνακας 30.6. Βασικοί περιορισμοί έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία

Ζώνη συχνοτήτων	Πυκνότητα μαγνητικής ροής (mT)	Πυκνότητα ρεύματος (mA/m ²) (rms)	Μέσο SAR για όλο το σώμα (W/Kgr)	SAR σε κεφαλή και κορμό (W/Kgr)	SAR σε άκρα (W/Kgr)	Πυκνότητα ισχύος (W/m ²)
0 Hz	40	-	-	-	-	-
> 0,1 Hz	-	8	-	-	-	-
1 - 4 Hz	-	8 / f	-	-	-	-
4 - 1000 Hz	-	2	-	-	-	-
1 KHz - 100 KHz	-	f / 500	-	-	-	-
100 KHz - 10 MHz	-	f / 500	0,08	2	4	-
10 MHz - 10 GHz	-	-	0,08	2	4	-
10 GHz - 300 GHz	-	-	-	-	-	10

Πίνακας 30.7. Επίπεδα αναφοράς ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Ζώνη συχνοτήτων	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου (A/m)	Πυκνότητα μαγνητικής ροής (μ T)	Ισοδύναμη πυκνότητα ισχύος επιπέδου κύματος (W/m ²)
0 - 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1 - 8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	-
8 - 23 Hz	10 000	$4 000 / f$	$5 000 / f$	-
25 - 800 Hz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	-
0,8 - 3 KHz	$250 / f$	5	6,25	-
3 - 150 KHz	87	5	6,25	-
0,15 - 1 MHz	87	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-
1 - 10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-
100 - 400 MHz	28	0,073	0,073	2
0,4 - 2 GHz	$1,375 \times f^{1/2}$	$0,0037 \times f^{1/2}$	$0,0046 \times f^{1/2}$	$f / 200$
2 - 300 GHz	61	0,16	0,20	10

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ICRP 60: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1990.
- Ευρωπαϊκή Ένωση Οδηγία 96/29/ Ευρατόμ 31-5-96.
- Beir: Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. Washington DC: National Academy Press, 1980.
- Beuc: Chernobyl, The Aftermath, BEUC /118/86, 31.7.1986.
- Steel G G Ed. Basic Clinical Radiobiology (Sevenoaks: Edward Arnold), 1993.
- Lyman J T, Wolbarst A B. Optimization of radiation therapy III: a method of assessing complication probabilities from dose-volume histograms. Int J Radiat Oncol Biol Phys 1987, 13: 103-9.
- UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, 1993.
- Kutcher G J, Burman C. Calculation of complication probability factors for nonuniform normal tissue irradiation: the effective volume method. Int J Radiat Oncol Biol Phys 1989, 16: 1623-30.
- Webb S, Najum A E. A model for calculating tumour control probability in radiotherapy including the effects of inhomogeneous distributions of dose and clonogenic cell density. Phys Med Biol 1993, 38: 653-66.
- ICRP 26: Recommendations of International Commission on Radiological Protection. Oxford: Publication 26, Pergamon Press, 1977.
- ICRP 39: principles for Limiting Exposures of the Public to Natural Sources of Radiation. Publication 39. International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, 1984.
- Electromagnetism and life. Robert Becker-Andrew Marino. Handbook of biological effects of electromagnetic fields Charles Polk-Elliot Postow CRC Press 1995.
- Radio-Frequency and ELF electromagnetic energies. A handbook for health professionals. R. Timothy Hitchcock-Robert M. Patterson International Thomson Publishing Inc 1994.
- Human Health and exposure to electromagnetic radiation J.A. Denniw-C.R. Muirhead-J.R. Ennis National radiological protection board NRPB 1994.
- Biological effects of exposure to non-ionizing electromagnetic fields and radiation. R.D. Saunders-C.I. Kowalczuk-Z.J. Sienkiewicz National radiological protection board NRPB 1995.
- Σύσταση του Συμβουλίου της 12 Ιουλίου 1999 L199/59 Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων.
- Διυπουργική απόφαση 53571/3839 ΦΕΚ 1105/6-9-2000.

