

13. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΥΓΕΙΟΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

13.1 Βασικές έννοιες της υγειοφυσικής.

Η ειδικότητα που μελετά την επίδραση της ακτινοβολίας στον άνθρωπο ονομάζεται **υγειοφυσική**.

Η ραδιενεργός ακτινοβολία (σωματιδιακή ή ηλεκτρομαγνητική) προκαλεί διέγερση, ιονισμό και καταστροφή των κυττάρων. Η βλάβη που προκαλείται από την ακτινοβολία εξαρτάται από το είδος της, την ένταση της και τη διάρκεια της έκθεσης.

Ο όρος **έκθεση** (X) χρησιμοποιείται για να δοθεί το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που παράγεται σε μία δεδομένη μάζα ή όγκο αέρα

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

όπου Q το φορτίο και m η μάζα.

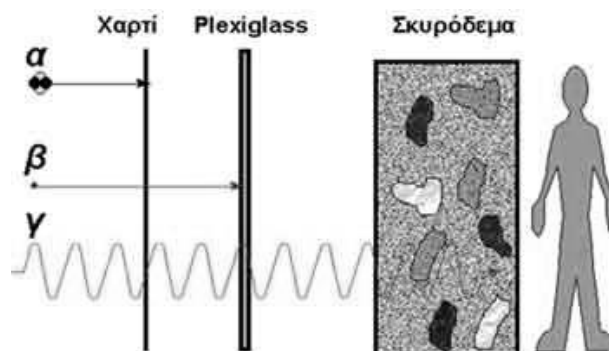
Στο Διεθνές Σύστημα μονάδων (SI) η έκθεση μετριέται σε **Coulomb/kg**. Η παλαιότερη μονάδα **Roentgen** (R) καταργήθηκε το 1985.

Με τον όρο **δόση** χαρακτηρίζεται η ενέργεια που εναποτίθεται από την ακτινοβολία ανά μονάδα διαδρομής της μέσα στην ύλη. Μονάδα της δόσης είναι το **Gray** (Gy). Ένα Gray ισούται με $1 J/kg$. Το Gray αντικατέστησε την παλαιότερα χρησιμοποιούμενη μονάδα δόσεως, που ονομαζόταν **rad** ($1 rad = 10^{-2} J/kg$).

Η βιολογική δραστηριότητα της ακτινοβολίας συνδέεται άμεσα και με την διεισδυτικότητά της μέσα στην ύλη που είναι διαφορετική για κάθε είδος ακτινοβολίας (βλ. Σχήμα 13-1).

Έτσι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ακτινοβολία- X και - γ) λόγω έλλειψης μάζας, έχει μεγαλύτερη διεισδυτικότητα (εμβέλεια) μέσα στην ύλη και προκαλεί μικρότερη ζημιά στο βιολογικό ιστό ανά μονάδα διαδρομής της από τη σωματιδιακή (ακτινοβολία- α και- β).

Από τις σωματιδιακές ακτινοβολίες, οι ακτίνες- α προκαλούν, λόγω της μεγάλης μάζας των σωματιδίων- α και της μικρότερης εμβέλειάς τους,



Σχήμα 13-1: Διεσδυτικότητα των διαφόρων ειδών ακτινοβολίας στην ύλη.

μεγαλύτερη βλάβη στο βιολογικό ιστό από τις ακτίνες-β. Αυτό το γεγονός λαμβάνεται υπόψη και στον υπολογισμό της **ισοδύναμης δόσης**, που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της δόσης επί τον **συντελεστή ποιότητας (Q)** της ακτινοβολίας. Ο συντελεστής ποιότητας Q έχει τιμή 1 για τις ακτίνες-Χ, -γ και -β χαμηλής ενέργειας, αλλά πολύ μεγαλύτερη για ακτινοβολία-α ($Q = 4$ ως 20) καθώς επίσης για θερμικά ($Q = 2$) και ταχεία νετρόνια ($Q = 10$), που λόγω της έλλειψης φορτίου έχουν μεγάλη διεσδυτικότητα στο βιολογικό ιστό και απορροφώνται από αυτόν μετά τη μείωση της ενέργειάς τους με ελαστικές και μη-ελαστικές κρούσεων ή με την πραγματοποίηση πυρηνικών αντιδράσεων. Ο συντελεστής ποιότητας για μια σειρά σωματιδίων διαφόρων ενεργειών δίνεται στο Σχήμα 13-2.

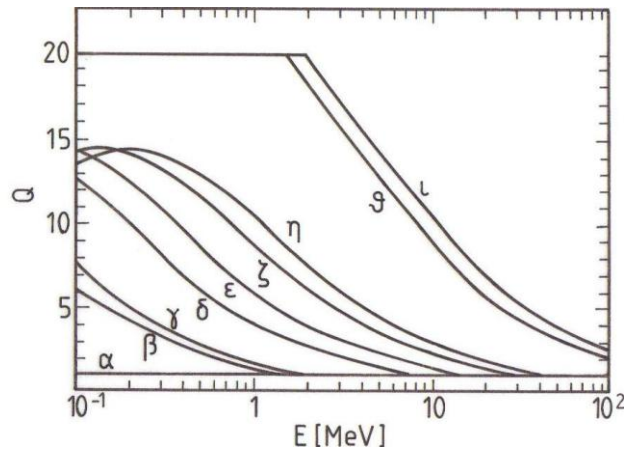
Μονάδα της ισοδύναμης δόσεως είναι το **Sievert (Sv)**:

$$1 \text{ Sv} = \text{δόση σε Gray (Gy)} \times \text{συντελεστή ποιότητας } Q$$

Το Sievert είναι κι αυτό 100 φορές μεγαλύτερο από την προηγουμένως χρησιμοποιούμενη μονάδα, το **rem** ($1 \text{ rem} = \text{δόση σε rad} \times Q$).

Οι επιδράσεις της ακτινοβολίας στους βιολογικούς ιστούς μπορούν να διακριθούν σε **άμεσες** και **έμμεσες**.

Άμεσα αντιδρά η ακτινοβολία με τα μόρια του ύδατος, που αποτελεί ένα πολύ μεγάλο μέρος του σώματος των ζώντων οργανισμών. Τα προϊόντα αυτής της ραδιόλυσης του ύδατος παίζουν τον ρόλο του μεταφορέα ενέργειας. Κατά την αντίδραση της ακτινοβολίας με τα μόρια



Σχήμα 13-2: Τιμές Q για διάφορα είδη ακτινοβολίας (α: e^- , β: σωματίδια-μ (μόνια), γ: σωματίδια-π (πιόνια), δ: σωματίδια-κ (καόνια), ε: p^+ , ζ: ${}^2\text{H}^+$ (d, δευτερόνια), η: ${}^3\text{H}^+$ (t, τριτόνια), θ: ${}^3\text{He}^{++}$, ι: ${}^4\text{He}^{++}$ (σωματίδια-α))

του ύδατος σχηματίζονται πρωτογενή προϊόντα (π.χ. ελεύθερες ρίζες όπως OH^\cdot και H^\cdot), που αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους και με το οξυγόνο παράγουν τελικά H_2O_2 . Έτσι, πολλές ακτινοχημικές αντιδράσεις παρουσιάζουν άμεση εξάρτηση από τη συγκέντρωση του οξυγόνου στον βιολογικό ιστό. Κατ' αυτόν τον τρόπο δικαιολογείται και η ιδιαίτερη ευαισθησία των παιδιών στην ακτινοβολία γιατί οι ιστοί τους είναι πλούσιοι σε ύδωρ και, συνεπώς, σε οξυγόνο. Με τον ίδιο τρόπο εξηγείται και η ευαισθησία των νεοπλασμάτων στην ακτινοβολία σε σύγκριση με τους γειτονικούς παλαιότερους ιστούς, που είναι λιγότερο πλούσιοι σε ύδωρ και οξυγόνο.

Τα διάφορα όργανα δείχνουν διαφορετική ευαισθησία στην ακτινοβολία, που δέχονται, ανά μονάδα ισοδύναμης δόσης. Έτσι, ανά μονάδα ισοδύναμης δόσης, ο κίνδυνος αναπτύξεως μία κακοήθειας κατά την ακτινοβόληση των πνευμόνων από ακτινοβολία είναι μεγαλύτερος απ' ό,τι του θυρεοειδούς αδένου. Πέραν όμως από τις σωματικές βλάβες, που μπορούν ακόμα, στην περίπτωση υπερβολικής έκθεσης, να οδηγήσουν έναν άνθρωπο και στο θάνατο, υπάρχουν κι επιδράσεις της ακτινοβολίας σε ιστούς (π.χ. όρχεις ή ωοθήκες), που προκαλούν γενετικές βλάβες με κληρονομούμενες επιπτώσεις σε μελλοντικές γενιές.

Πίνακας 13-1: Συντελεστές στάθμισης για τα διάφορα όργανα¹

Όργανο	Συντελεστής στάθμισης
Όρχεις	0.20
Μυελός οστών	0.12
Κόλον	0.12
Πνεύμονες	0.12
Στομάχος	0.12
Κύστη	0.05
Στήθος	0.05
Ήπαρ	0.05
Ισοφάγος	0.05
Θυρεοειδής αδένας	0.05
Δέρμα	0.01
Επιφάνεια οστών	0.01
Υπόλοιπο σώματος	0.05
Σύνολο	1.00

Σήμερα αν και δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η ιονίζουσα ακτινοβολία προκαλεί μεταλλάξεις στο ανθρώπινο DNA, ο καθορισμός του μεγέθους του γενετικού κινδύνου είναι δύσκολος, επειδή οι γνώσεις μας είναι ασαφείς λόγω του γεγονότος ότι οι μεταλλάξεις που προκαλούνται από ακτινοβολία δεν διαφέρουν από εκείνες που προκαλούνται από άλλες γνωστές αιτίες. Αυτό δυσκολεύει και την ποσοτική εκτίμησή τους, επειδή δεν είναι δυνατός ο στατιστικά επαρκής δειγματοληπτικός πειραματισμός. Γνωρίζουμε επίσης ότι, εκτός από μερικές περιπτώσεις χρωματοσωμικών θραύσεων, οι περιπτώσεις μεταλλάξεων στο ανθρώπινο DNA είναι πολύ λίγες. Οι γνώσεις μας κυρίως στηρίζονται σε αποτελέσματα

¹ “Radiation, people and the environment”, IAEA, Vienna, 2004

ραδιοβιολογικών πειραμάτων σε ζώα με επέκταση στον άνθρωπο και από δεδομένα από ειδικές κατηγορίες ανθρώπων που εκτέθηκαν σε μεγάλες δόσεις ακτινοβολίας (π.χ. επιζώντες πυρηνικών ατυχημάτων και εκρήξεων, επαγγελματικά εκτεθειμένοι σε ακτινοβολίες, κάτοικοι περιοχών με υψηλό υπόστρωμα ακτινοβολίας). Τέλος, ακόμη κι αν γνωρίζαμε με λεπτομέρειες το τι συμβαίνει στο ανθρώπινο DNA, δεν έχουμε επαρκείς γνώσεις για το πως εισάγονται και επιδρούν οι γενετικές αυτές μεταβολές, και ειδικότερα οι κληρονομούμενες παθήσεις, στις επόμενες γενεές. Η μελέτη σε μια ανθρώπινη γενεά δεν μπορεί να θεωρηθεί πολύ ευαίσθητος δείκτης γενετικών επιδράσεων.

Οι επιδράσεις των ακτινοβολιών στα διάφορα όργανα του σώματος λαμβάνονται υπόψη με την εισαγωγή ενός σταθμιστικού παράγοντα με τον οποίο πολλαπλασιάζεται η ισοδύναμη δόση (*Πίνακας 13-1*). Το άθροισμα των σταθμισμένων αυτών ισοδυνάμων δόσεων για όλα τα όργανα του σώματος δίνει την **αποτελεσματική δόση**.

13.2 Συνιστώμενα επίπεδα μεγίστης έκθεσης

Για τη θέσπιση ορίων για την έκθεση σε ακτινοβολία τέθηκαν οι παρακάτω προϋποθέσεις, που αναφέρονται και στις αναφορές της Διεθνούς Επιτροπής Ραδιολογικής Προστασίας (ICRP: International Commission on Radiological Protection)²:

1. Η έκθεση πρέπει να δικαιολογείται από το όφελος, που προκύπτει.
2. Λαμβάνοντας υπόψη τους οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες πρέπει σ' όλες τις εκθέσεις σε ακτινοβολία να τηρείται η αρχή A.L.A.R.A. (*as low as reasonably achievable*, τόσο χαμηλή όσο λογικά επιτεύξιμο).
3. Το ισοδύναμο δόσεως δεν πρέπει να υπερβαίνει τα όρια, που έχουν υποδειχθεί για τις αντίστοιχες συνθήκες από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας.

Οι συστάσεις που αφορούν την έκθεση σε σχετικά ακτινοβολία είναι

² i) *1977 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 26. International Commission on Radiation Protection, Oxford, England: Pergamon Press.
ii) *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 60. International Commission on Radiation Protection, Pergamon Press, Oxford, U.K.

πολύπλοκες. Τα πρότυπα αυτά διαφέρουν για τα διάφορα είδη πληθυσμού, τις διάφορες πηγές ακτινοβολίας και τα διάφορα μέλη του ανθρώπινου σώματος.

Βασικά, υπάρχουν δύο ομάδες ατόμων για τις οποίες έχουν θεσπιστεί πρότυπα ακτινοπροστασίας: το ευρύ κοινό και οι επαγγελματικά ασχολούμενοι με ακτινοβολίες³. Για την ιατρική έκθεση δε θεσπίστηκαν συγκεκριμένα όρια. Γενικά όμως, η δόση πρέπει να είναι η χαμηλότερη δυνατή, ώστε να επιτευχθούν τα ευεργετικά αποτελέσματα για τον ασθενή.

Ο Ελληνικός Κανονισμός Ακτινοπροστασίας είναι εναρμονισμένος με την ευρωπαϊκή νομοθεσία και προβλέπει επίσης τις προϋποθέσεις λειτουργίας ερευνητικών και επαγγελματικών εργαστηρίων με πηγές ακτινοβολίας καθώς επίσης τους όρους μεταφοράς και διάθεσης ραδιενεργών ουσιών⁴.

Για το ευρύ κοινό, συνιστάται το προσωπικό όριο των **5 mSv** (500 *mrem*) το χρόνο. Η δόση αυτή δεν περιλαμβάνει τη φυσική έκθεση, αλλά έχουν γίνει προτάσεις αναθεωρήσεως κανονισμών ώστε τα όρια να συμπεριλάβουν και όλες τις πηγές ακτινοβολίας.

Για τους επαγγελματικά εκτιθέμενους καθορίζεται ως ανώτατο προσωπικό όριο τα **50 mSv** (5 *rem*) το χρόνο. Η προστιθέμενη συνολική δόση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα **50(N-18) mSv** ή όπου 5(N-18) *N rem*, όπου N η ηλικία σε χρόνια. Άτομα κάτω των 18 ετών δεν επιτρέπεται να δέχονται μετρήσιμη επαγγελματική δόση ακτινοβολίας.

13.3 Οι ραδιενεργές ουσίες στο περιβάλλον

Ο άνθρωπος, από τη μέρα της εμφάνισής του επάνω στη γή, είναι διαρκώς εκτεθειμένος σε ραδιενεργό ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή προέρχεται από το σύμπαν (κοσμική ακτινοβολία), από τη γη, από το ίδιο μας το σώμα αλλά και από άλλες πηγές όπως η παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας, οι δοκιμές και η χρήση οπλικών συστημάτων, η καύση άνθρακα, η λίπανση εδαφών και οι ιατρικές εξετάσεις.

³ *Laying Down Basic Safety Standards for the Protection of the Health of Workers and the General Public from the Dangers Arising from Ionizing Radiation*. Council Directive 96/29 Euratom of May 13, 1996. Official Journal of the European Communities, Vol. 39, No. L 159, June 29, 1996.

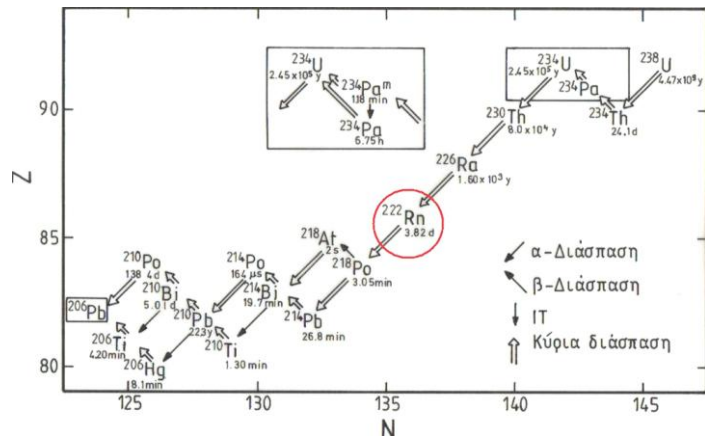
⁴ Υπ. Απ. 1014(ΦΟΡ)94, ΦΕΚ 216B 6/3/2001 (βλ. Νομοθεσία στο <http://www.eeae.gr>)

Η κοσμική ακτινοβολία αποτελείται κυρίως από πρωτόνια υψηλής ενέργειας, τα οποία αλληλεπιδρούν με τα αέρια της ατμόσφαιρας προκαλώντας την εκπομπή διαφόρων σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά δημιουργούν επίσης με πυρηνικές αντιδράσεις ορισμένα ραδιενεργά νουκλίδια, που κατανομούνται στο ζωτικό μας χώρο και αποτελούν συστατικά και του σώματός μας (π.χ. άνθρακας-14, τρίτιο κλπ). Η μέση ετήσια δόση που δέχεται ο άνθρωπος από την κοσμική ακτινοβολία στο επίπεδο της θάλασσας υπολογίστηκε ότι είναι περίπου 0.4 mSv. Η δόση αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος. Υψηλότερη δόση από την κοσμική ακτινοβολία λαμβάνουν οι κάτοικοι πόλεων σε υψηλό υψόμετρο (π.χ. περ. 0.8 mSv στις πόλεις Denver ή Mexico City, που βρίσκονται σε υψόμετρο 1600 και 2250 m αντίστοιχα). Υψηλότερη δόση δέχονται επίσης αυτοί που ταξιδεύουν συχνά με αεροπλάνο (5-10 μSv την ώρα ανάλογα με το ύψος πτήσεως).

Ένα άλλο συστατικό της φυσικής ραδιενέργειας είναι η ακτινοβολία, που προέρχεται από ορισμένα μακρόβια ραδιενεργά νουκλίδια στη φύση. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις είναι το **ουράνιο-238**, το **ουράνιο-235** και το **θόριο-232**, καθώς επίσης τα ραδιενεργά προϊόντα της διασπάσεώς τους. Το μακρόβια αυτά νουκλίδια είναι τα μητρικά των **φυσικών ραδιενεργών οικογενειών του ουρανίου-ραδίου, ακτινίου και θορίου**, που καταλήγουν μετά από σειρά διασπάσεων αντίστοιχα στα σταθερά νουκλίδια **μόλυβδο-206, μόλυβδο-207 και μόλυβδο-208**.

Μέλος της ραδιενεργού οικογένειας του ουρανίου-ραδίου είναι και το **ραδόνιο-222**, που είναι προϊόν της α-διασπάσεως του **ραδίου-226** με χρόνο υποδιπλασιασμού 3.82 ημέρες (Σχήμα 13-3). Το ραδόνιο-222, που είναι αέριο μπορεί να διαλυθεί σε νερά ή να φθάσει στην ατμόσφαιρα και να εισέλθει στους χώρους των κατοικιών μας, όπου και συνεχίζει να διασπάται. Στην εισπνοή ραδονίου-222 οφείλεται το μεγαλύτερο ποσοστό της έκθεσης του ανθρώπου στη φυσική ακτινοβολία υπό κανονικές συνθήκες (Πίνακας 3-1). Όριο του ραδονίου στον εισπνεόμενο αέρα σε ανοιχτούς χώρους θεωρείται το 150 Bq/m³ και για κλειστούς χώρους το 200-400 Bq/m³. Το ραδόνιο θεωρείται διεθνώς ως η δεύτερη αιτία, μετά το κάπνισμα, για την εμφάνιση καρκίνου στους πνεύμονες. Στο ραδόνιο-222 οφείλεται επίσης σε μεγάλο βαθμό η ραδιενέργεια διαφόρων πηγών, που χρησιμοποιούνται από την προϊστορική ήδη εποχή για θεραπευτικούς σκοπούς⁵. Παρ' όλον ότι

⁵ K. Becker, *One century radon therapy*, Intern. Journal of Low Radiation, 1(2004) 333



Σχήμα 13-3: Η φυσική ραδιενεργός οικογένεια του ουρανίου - ραδίου

η ιαματική δράση του ραδονίου δεν είναι επακριβώς διευκρινισμένη, υπάρχουν ενδείξεις ότι το ραδιενεργό αυτό αέριο προσεγγίζει μέσω του αίματος όλα τα μέλη του σώματος και προκαλεί στα κύτταρα, με την ακτινοβολία-α που εκπέμπει, βιοχημικές διεργασίες και ορμονικές ή και νευρικές αντιδράσεις με θεραπευτικά επακόλουθα⁶. Η κυριότερη ραδιενεργός πηγή στην Ελλάδα είναι αυτή της Ικαρίας, η οποία θεωρείται και μία από τις ισχυρότερες της Ευρώπης (μέση ενεργότητα περ. 13 kBq/L).

Τα ισότοπα του ραδονίου ^{219}Rn ($T_{1/2} = 3.96$ s) και ^{220}Rn ($T_{1/2} = 55.6$ s), που ανήκουν στις ραδιενεργές οικογένειες του ακτινίου και θορίου, έχουν μικρότερη ραδιολογική σημασία για τον άνθρωπο λόγω του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού τους.

Ένα τμήμα της φυσικής ακτινοβολίας οφείλεται επίσης στην παρουσία του ισότοπου του καλίου με μαζικό αριθμό $A = 40$ ($T_{1/2} = 1.29 \cdot 10^9$ χρόνια). Το ^{40}K , παρά τη μικρή αφθονία του στη φύση (0.012%), εκπέμπει ακτινοβολία-γ που επιβαρύνει το φυσικό υπόστρωμα ακτινοβολίας.

⁶ Z. Zdrojewicz and J. Strzelczyk, *Radon treatment controversy*, Dose-Response 4(2006)106

B.E. Erickson, *Radiation and Health: An Overview of Radon Therapy in the United States and Europe*, Dose-response 5(2007)48

Πίνακας 13-2: Ετήσια αποτελεσματική δόση από φυσική ακτινοβολία βασισμένη στο UNSCEAR 2000⁷.

Πηγή έκθεσης	Παγκόσμια μέση ετήσια αποτελεσματική δόση (mSv)	Τυπική περιοχή απόκλισης (mSv)
Κοσμική ακτινοβολία	0.4	0.3 - 1.0
γ- ακτινοβολία	0.5	0.3 - 0.6
Εισπνοή ραδονίου	1.2	0.2 - 1.0
Εσωτ. ακτινοβολήση	0.3	0.2 - 0.8
Σύνολον	2.4	1.0 – 10.0

Τα περισσότερα μέλη των φυσικών ραδιενεργών οικογενειών που διασπώνται με εκπομπή ακτινοβολίας-α εκπέμπουν παράλληλα και ακτινοβολία-γ. Ακτινοβολία-γ εκπέμπεται επίσης από το κάλιο-40. Η ετήσια αποτελεσματική δόση από τη φυσική έκθεση στην ακτινοβολία-γ είναι της τάξεως των 0.5 mSv. Η τιμή αυτή διαφέρει κατά πολύ από τόπο σε τόπο και εξαρτάται και από τη γεωλογική σύσταση του εδάφους.

Ο Πίνακας 13-2 δίνει την παγκόσμια μέση αποτελεσματική δόση από φυσική ακτινοβολία. Η εσωτερική έκθεση, που αναφέρεται στον πίνακα αυτόν, οφείλεται κυρίως στον ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po και ⁴⁰K, που λαμβάνονται με τις τροφές και ακτινοβολούν το σώμα μας εσωτερικά.

Για τον υπολογισμό της συνολικής αποτελεσματικής δόσεως πρέπει, φυσικά, να ληφθεί υπόψη και η δόση από τεχνητές πηγές ακτινοβολίας, όπως από ιατρικές εξετάσεις, πυρηνικές δοκιμές και ατυχήματα, παραγωγή πυρηνικής ενέργειας κλπ. Από αυτές τις μέσες ετήσιες αποτελεσματικές δόσεις οι ιατρικές εξετάσεις αποτελούν το μεγαλύτερο συστατικό (0.4 mSv το χρόνο), ενώ το σύνολο των υπολοίπων δεν υπερβαίνει το 0.01 mSv.

⁷ Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly 2000 (UNSCEAR 2000).