

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΟΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΘΕΣΗ ΣΤΗ ΓΑΜΜΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Γ. Τραμπίδου, Ι. Σταματελάτος, Π. Κρητίδης, Ε. Φλώρου.
Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας-Ακτινοπροστασίας
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», 15310 Αγία Παρασκευή
Αθήνα, e-mail: johncats11@netonline.gr

Περίληψη

Ο ρυθμός δόσης από τη γ-ακτινοβολία (φυσική και τεχνητή) του εδάφους εκτιμήθηκε με τη χρήση διαφόρων μεθόδων: Μετρήσεις πεδίου, αναφερόμενες σε μετρήσεις ραδιοδιασκόπησης και θεωρητικές εκτιμήσεις με εφαρμογή του κώδικα MCNP και αναλυτικών μοντέλων στις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στο έδαφος. Η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών μεθόδων έδειξε ότι βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ τους.

Λέξεις κλειδιά: *Εξωτερική έκθεση, γ-ακτινοβολία του εδάφους, ραδιοδιασκόπηση κώδικας MCNP, θεωρητικές εκτιμήσεις*

Εισαγωγή

Ο ρυθμός δόσης από την έκθεση στα γ-ραδιονουκλίδια του εδάφους εκτιμάται με τη χρήση διαφόρων μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται σε α) μετρήσεις πεδίου β) θεωρητικούς υπολογισμούς βασισμένους στην εφαρμογή εξισώσεων στις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στο έδαφος και γ) θεωρητικά μοντέλα προσομοίωσης με βάση υπολογισμούς με τη μέθοδο Monte Carlo. Για πληρέστερη και πιο αξιόπιστη εκτίμηση είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται συνδυασμός των τριών προσεγγίσεων [1,2].

Η παρούσα εργασία αφορά στον υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης λόγω της έκθεσης σε γ-ακτινοβολία προερχόμενη από την επιφάνεια της γης. Ειδικότερα, οι ρυθμοί εξωτερικής δόσης από την έκθεση στη γάμμα ακτινοβολία του εδάφους εκτιμήθηκαν ως εξής:

- Ραδιοδιασκόπηση – επιτόπιες μετρήσεις πεδίου (in situ).
- Θεωρητικοί υπολογισμοί με βάση τις συγκεντρώσεις στο έδαφος.
- Υπολογισμοί Monte Carlo με τη χρήση του κώδικα MCNP, με βάση τις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στο έδαφος.

Οι μετρήσεις πεδίου και τα αντίστοιχα σημεία συλλογής των δειγμάτων τοποθετούνται στη νήσο Ικαρία. Η Ικαρία, με έκταση 267 km², ευρίσκεται στο Ανατολικό Αιγαίο. Το φυσικό ραδιενεργό υπόβαθρο της Νήσου το οποίο χαρακτηρίζεται κυρίως από τις πηγές υψηλών συγκεντρώσεων φυσικών ραδιονουκλιδίων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε σχέση με το αβιοτικό και βιοτικό περιβάλλον. Οι περιοχές δειγματοληψίας επιλέχθηκαν με βάση κατάλληλους γεωλογικούς χάρτες [3, 4, 5].

Υλικά και Μέθοδοι

Ραδιοδιασκόπηση

Με τον όρο “ραδιοδιασκόπηση” εννοούμε την χαρτογράφηση του ρυθμού εξωτερικής έκθεσης σε μία περιοχή, με τις μετρήσεις γ ακτινοβολίας. Μ’ αυτή τη μέθοδο, η πυκνότητα της ροής φωτονίων και οι ρυθμοί δόσης υπολογίστηκαν σε ευρύ δίκτυο σημείων μέτρησης, στη νήσο Ικαρία. Για τον καθορισμό των επιπέδων γ-ακτινοβολίας στις περιοχές μελέτης πραγματοποιήθηκε γ-ραδιοδιασκόπηση με κυλινδρικό σπινθηριστή NaI(Tl) διαστάσεων 1” x 1” (συντελεστής βαθμολόγησης $3.5 \times 10^{-3} \mu\text{R h}^{-1} \text{cpm}^{-1}$ για πηγή ^{226}Ra στο 1m). Οι τιμές του ρυθμού εξωτερικής δόσης που προέκυψαν από τις μετρήσεις της γ ακτινοβολίας στην Ικαρία κυμαίνονται από $0.05 \mu\text{Gy h}^{-1}$ έως $0.21 \mu\text{Gy h}^{-1}$, με την μέση τιμή των $0.14 \mu\text{Gy h}^{-1}$ σε περιοχές άμεσης γειτνίασης με τις αναβλύσεις των ιαματικών πηγών.

Μετρήσεις γ-φασματομετρίας – Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού δόσεων στη γ-ακτινοβολία

Για τον καθορισμό των επιπέδων γ-ακτινοβολίας και της αντίστοιχης επιβάρυνσης του πληθυσμού, δείγματα εδάφους αναλύθηκαν με μετρήσεις γ-φασματομετρίας. Οι συγκεντρώσεις φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων στα δείγματα εδάφους μετρήθηκαν σε σύστημα γ-φασματομετρίας υψηλής διακριτικής ικανότητας με ανιχνευτή HpGe 20% σχετικής απόδοσης ως προς ανιχνευτή 3” x 3” NaI.

Οι συγκεντρώσεις των ^{40}K , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra και ^{228}Th καθορίστηκαν σε Bq kg^{-1} . Θεωρήθηκε ότι τα αέρια νουκλίδια ραδόνιο και θορόνιο δεν διαφεύγουν από το έδαφος. Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης υπολογίστηκε με την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων του Πίνακα 1 στα αποτελέσματα των μετρήσεων φυσικών ραδιονουκλιδίων στα δείγματα εδάφους [5].

Πίνακας 1. Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού δόσεων εξωτερικής έκθεσης σε γ-ακτινοβολία.

| |
|---|
| $D1(\mu\text{Sv y}^{-1}) = 2.618 \text{As}(^{238}\text{U}) + 2.093 \text{As}(^{232}\text{Th}) + 0.264 \text{As}(^{40}\text{K})$ [1, 6, 7, 8] |
| $D2(\mu\text{Sv y}^{-1}) = 3.017 \text{As}(^{238}\text{U}) + 2.409 \text{As}(^{232}\text{Th}) + 0,294 \text{As}(^{40}\text{K})$ [9,10] |
| $D3(\mu\text{Sv y}^{-1}) = 3,550 \text{As}(^{226}\text{Ra}) + 2.416 \text{As}(^{232}\text{Th}) + 0.235 \text{As}(^{40}\text{K})$ [11, 12] |
| $D4(\mu\text{Sv y}^{-1}) = 0.061 \text{As}(^{238}\text{U}) + 3.1 \text{As}(^{226}\text{Ra}) + 2.582(^{228}\text{Th}) + 1.741 \text{As}(^{228}\text{Ra}) + 0.276 \text{As}(^{40}\text{K})$ [13] |

όπου:

D_i = ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε $\mu\text{Sv y}^{-1}$

$\text{As}(i)$ = συγκέντρωση ενεργότητας του ραδιονουκλιδίου i στο έδαφος σε Bq kg^{-1}

Κώδικας MCNP

Σκοπός αυτής της δραστηριότητας ήταν η εφαρμογή του κώδικα MCNP-4B στον αποτελεσματικό και ακριβή υπολογισμό της μεταφοράς των ακτίνων γ στο περιβάλλον. Το πρόγραμμα έχει σχεδιαστεί να υπολογίζει τη μεταφορά των ακτίνων γ αποτελεσματικά και εύκολα: Λαμβάνονται υπόψη δύο συνιστώσες, οι απευθείας

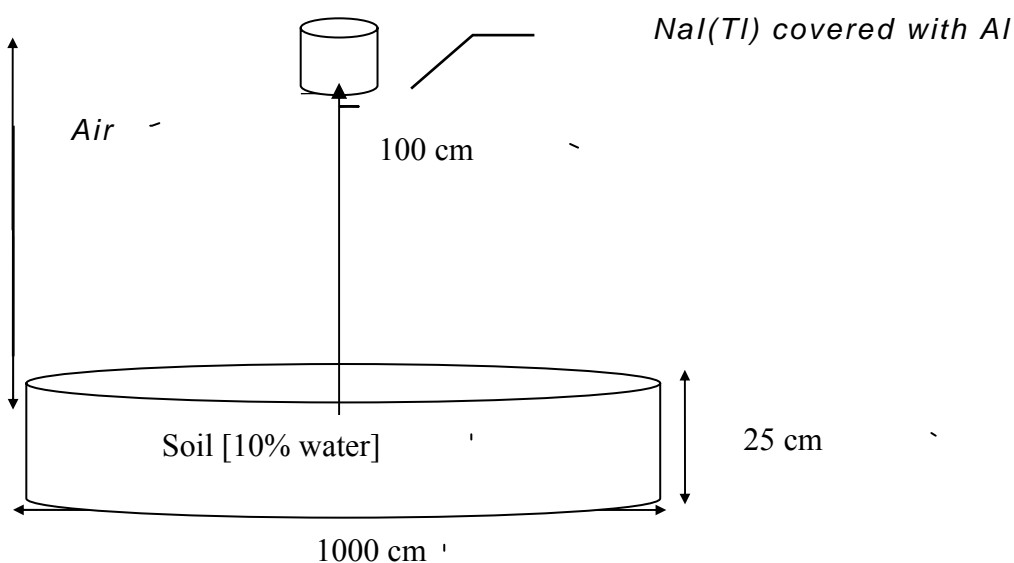
ακτίνες γ από το έδαφος και οι σκεδαζόμενες ακτίνες γ από το έδαφος ή τον αέρα. Ο υπολογισμός του ενεργού ισοδύναμου δόσης βασίζεται στη θεώρηση της σταθμισμένης δόσης οργάνων, όπως συνιστάται από το ICRP. Οι συντελεστές μετατροπής του ICRP χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή των απορροφούμενων σημειακών στον αέρα δόσεων σε ενεργά ισοδύναμα δόσης.

Περιγραφή κώδικα. Ο κώδικας MCNP-4B είναι ένας γενικής χρήσης Monte Carlo κώδικας ο οποίος χρησιμοποιείται ευρύτατα σε προβλήματα μεταφοράς νετρονίων, φωτονίων και ηλεκτρονίων σε γενικευμένη τρισδιάστατη γεωμετρία [14]. Οι ενεργές διατομές φωτονίων και ηλεκτρονίων που χρησιμοποιούνται στον κώδικα προέρχονται από τις ENDL και ENDF βιβλιοθήκες διατομών.

Με βάση θεωρήσεις της βιβλιογραφίας [15, 16, 17, 18, 19, 13] και τις συγκεκριμένες συνθήκες πεδίου (στρώμα εδάφους, ομοιογένεια, κλίση εδάφους, υποκείμενο πέτρωμα) επιλέχθηκε η γεωμετρία του Σχ 1. Αρχικά για το έδαφος επιλέχθηκε κύλινδρος ακτίνας 5m και ύψους 25cm. Στη συνέχεια στον άξονα του κυλίνδρου και σε ύψος 1m τοποθετήθηκε εικονικός ανιχνευτής με τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου σ' αυτή τη μελέτη ανιχνευτή. Το έδαφος δρα ως ομοιογενής πηγή γ ακτινοβολίας.

Τα υλικά που εισήχθηκαν στη γεωμετρία του προβλήματος είναι τυπικό έδαφος 10% υγρασίας, αέρας και υλικά του ανιχνευτή (Al, NaI). Ο αέρας θεωρήθηκε ότι συνίσταται από N_2 , O_2 , Ar, ενώ το έδαφος θεωρήθηκε ότι συνίσταται βασικά από SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, K_2O και H_2O [5]. Στον Πίνακα 2 δίνονται η πυκνότητα και η χημική σύσταση του αέρα και του εδάφους αντίστοιχα.

Ο εικονικός ανιχνευτής στη γεωμετρία του προβλήματος ανιχνεύει ροή φωτονίων (φωτόνια/cm².φωτόνιο πηγής). Η μετατροπή της ροής των φωτονίων σε ρυθμούς δόσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των συντελεστών μετατροπής του ICRP51 [20].



Σχήμα 1. Γεωμετρία του μοντέλου.MCNP

Πίνακας 2. Χημική σύσταση και πυκνότητα του εδάφους (10% υγρασία) και του αέρα αντίστοιχα [21].

| ΕΛΑΦΟΣ | | ΑΕΡΑΣ | |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| | Abundance (% by weight) | | Abundance (% by weight) |
| Si | 26.60 | N | 75.5 |
| Al | 7.84 | O | 23.2 |
| Fe | 4.83 | Ar | 1.3 |
| Ca | 3.47 | | |
| K | 3.47 | | |
| O | 53.60 | | |
| H | 1.11 | | |
| Πυκνότητα (g.cm ⁻³) | 1.0 | Πυκνότητα (g.cm ⁻³) | 1.205 x 10 ⁻³ |

Για τον κώδικα MCNP χρησιμοποιήθηκε η τεχνογνωσία του Εργαστηρίου Ερευνητικού Αντιδραστήρα του Ινστιτούτου Πυρηνικής Τεχνολογίας – Ακτινοπροστασίας του ΕΚΕΦΕ “Δ”.

Αποτελέσματα και συζήτηση

Για τον υπολογισμό του ρυθμού δόσης με την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων και του κώδικα MCNP, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα εδάφους τα οποία συλλέχθηκαν σε σημεία όπου πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις πεδίου γ ακτινοβολίας. Απαραίτητες προϋποθέσεις για την επιλογή των σημείων δειγματοληψίας και μετρήσεων πεδίου ήταν να εμφανίζουν ομοιογενή δομή στο έδαφός τους και να έχουν επίπεδη (σχεδόν) επιφάνεια, ώστε να ισχύει η μαθηματική σχέση βάσει της οποίας έγιναν οι θεωρητικές εκτιμήσεις του ρυθμού δόσης και η γεωμετρία πεδίου να προσεγγίζει τη γεωμετρία προσομοίωσης του κώδικα MCNP.

Στον Πίνακα 3α δίνονται οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές της ετήσιας ισοδύναμης δόσης ($\mu\text{Sv y}^{-1}$) που προκύπτουν από την εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων:

- Μετρήσεις γ ακτινοβολίας της παρούσας εργασίας.
- Υπολογισμοί Monte Carlo με τη χρήση του κώδικα MCNP, όπως εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, με βάση τις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στο έδαφος.
- Θεωρητικές εκτιμήσεις, με την εφαρμογή των τύπων της βιβλιογραφίας (Πίνακας 1) στις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στο έδαφος.

Πίνακας 3α. Ρυθμοί ετήσιας ισοδύναμης δόσης που προκύπτουν από τις μετρήσεις γ ακτινοβολίας και τη χρήση του κώδικα MCNP σε 33 δείγματα εδάφους της παρούσας μελέτης ($\mu\text{Sv y}^{-1}$).

| Ελάχιστο | Μέγιστο | Μέση τιμή | Μέθοδος υπολογισμού | Κωδικός |
|----------|---------|-----------|--------------------------------------|---------|
| 230 | 3000 | 450 | Πειραματική τιμή [Παρούσα μελέτη] | D5 |
| 125 | 3130 | 485 | Υπολογισμοί MCNP [Παρούσα μελέτη] | D6 |

Πίνακας 3β. Ρυθμοί ετήσιας ισοδύναμης δόσης που προκύπτουν από την εφαρμογή θεωρητικών τύπων της βιβλιογραφίας σε συγκεντρώσεις φυσικών ραδιονουκλιδίων 33 δειγμάτων εδάφους ($\mu\text{Sv y}^{-1}$).

| Ελάχιστο | Μέγιστο | Μέση τιμή | Μέθοδος υπολογισμού | Κωδικός |
|----------|---------|-----------|---------------------|---------|
| 160 | 3605 | 645 | Θεωρητική εκτίμηση | D1 |
| 180 | 4130 | 735 | Θεωρητική εκτίμηση | D2 |
| 240 | 3750 | 705 | Θεωρητική εκτίμηση | D3 |
| 200 | 3310 | 635 | Θεωρητική εκτίμηση | D4 |

Από τον παραπάνω πίνακα 3α παρατηρούμε ότι οι εκτιμήσεις των δόσεων (D6) της παρούσας μελέτης χρησιμοποιώντας τον κώδικα MCNP βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές (D5) από τις μετρήσεις της γ ακτινοβολίας. Η τυπική απόκλιση μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών στο σύνολο των 33 ζευγών είναι 30%, ενώ η συστηματική απόκλιση (η διαφορά των μέσων τιμών) είναι 13%.

Συγκρίνοντας τις τιμές της ισοδύναμης δόσης που προκύπτουν από τις μετρήσεις της γ ακτινοβολίας (D5) και την εφαρμογή των υπόλοιπων θεωρητικών αναλυτικών σχέσεων (D1, D2, D3, D4) της βιβλιογραφίας παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των. Οι διαφορές στις τιμές του ρυθμού δόσης μεταξύ των μετρήσεων γ ακτινοβολίας και των θεωρητικών εκτιμήσεων που προκύπτουν από τις μετρήσεις γ φασματοσκοπίας είναι αρκετά μικρές και αναμενόμενες. Οι διαφορές αυτές αποδίδονται τόσο στα στατιστικά σφάλματα, όσο και στη διαφορά ανάμεσα στα ενεργειακά φάσματα του πεδίου βαθμονόμησης του ανιχνευτή NaI (πηγή ^{226}Ra) και στα φάσματα των μετρούμενων πεδίων (^{40}K και τα ραδιονουκλίδια των σειρών ^{238}U και του ^{232}Th).

Οι εκτιμήσεις των δόσεων της παρούσας μελέτης χρησιμοποιώντας τον κώδικα MCNP (D6) σε σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή των υπόλοιπων θεωρητικών σχέσεων (D1, D2, D3, D4) της βιβλιογραφίας παρουσιάζουν μια γενική συμφωνία μεταξύ των. Όμως, οι προκύπτουσες από τον κώδικα MCNP τιμές είναι μικρότερες των αντίστοιχων τιμών που προκύπτουν από τους αναλυτικούς υπολογισμούς. Οι διαφορές αυτές μπορούν να αποδοθούν στην καλύτερη αντιπροσώπευση των περιβαλλοντικών παραμέτρων της συγκεκριμένης περιοχής μελέτης στην προσομοίωση του κώδικα MCNP, σε σχέση με τις υπόλοιπες θεωρητικές εκτιμήσεις. Σημειώνεται ότι ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης που υπολογίστηκε με την εφαρμογή της σχέσης D4 υποθέτει 100% έκθεση εξωτερικών χώρων και επομένως προσεγγίζει καλύτερα την προσομοίωση του κώδικα MCNP.

Σύμφωνα με τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι θεωρητικές εκτιμήσεις του ρυθμού εξωτερικής δόσης βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις της ολικής γ ακτινοβολίας. Οι θεωρητικές εκτιμήσεις, πιθανόν, προσεγγίζουν τις πραγματικές τιμές λόγω της διαφοράς μεταξύ των πεδίων βαθμονόμησης και μέτρησης και της καλύτερης προσομοίωσης της γεωμετρίας του περιβάλλοντος με τη χρήση του κώδικα MCNP.

Συμπέρασμα

Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης που προκύπτει από την εφαρμογή του κώδικα MCNP είναι συγκρίσιμος με την αντίστοιχη πειραματική τιμή και μικρότερος από την τιμή που προκύπτει με χρήση τύπων της βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα εξηγούνται από τα εξής:

- Η χρήση του κώδικα MCNP προσφέρει τη δυνατότητα καλύτερης προσομοίωσης της συγκεκριμένης γεωμετρίας εδάφους-ανιχνευτή.
- Για την εξομοίωση του κώδικα MCNP λαμβάνεται υπόψη η χημική σύσταση και η υγρασία του εδάφους στις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Βιβλιογραφία

1. UNSCEAR (1988). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 Report. *Sources, effects and Risks of Ionizing Radiation*. (New York's united Nations)
2. A. Baeza, J. M. Paniagua, E. Suarez and J. A. Fernandez. (1997). *Determination of the dose rate from external irradiation. Geological considerations in sampling optimization*. J. Environ. Radioactivity, **34**, 9-27.
3. Ktenas, C.A. and Marinos, G. (1969). *La Geologie de L'ile de Nikaria*. Geological and Geophysical Research (Institute for Geology and Subsurface Research, Athens)
4. G. Trabidou, H. Florou, A. Angelopoulos and L. Sakelliou.(1996). *Environmental study of the radioactivity of the spas in the island of Ikaria*. Radiat. Protec. Dosim., **63**(1), 63-67.
5. Γ. Τραμπίδου. *Ραδιολογική έρευνα περιοχών ραδιενεργών ιαματικών πηγών*. Διδακτορική Διατριβή, Παν. Αθηνών, 2004.
6. UNSCEAR, 1977. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Report to the General Assembly (with annexes), United Nations, New York, USA.
7. UNSCEAR, 1982. *Ionizing radiation : Sources and Biological Effects*. Report to the General Assembly (with annexes). United Nations, New York, U.S.A.
8. Lin Y., Lin P., Chen C., and Huang C (1987). *Measurements of ionizing terrestrial gamma radiation in Taiwan, Republic of China*. Hlth Phys. **52**(6), 805-811.
9. Nero A.V. (1983). *Airborne Radionuclides and Radiation in Buildings*. A review. Hlth Phys. **45**(2), 303-322.
10. Beck H. L. (1982). *The Physics of Environmental Gamma Radiation Fields*. The Natural Gamma Environment II, USERDA, CONF-720805-P2, pp. 101-134.
11. Papastefanou C., Manopoulou M. and Charalambous S., (1984). *Exposure from the Radioactivity in Building Materials*. Hlth Phys. **47**(5), 775-783.
12. Zastawny A. (1978). *Theoretical calculations of the γ -radiation dose rate in building materials*. . Hlth Phys. **47**(5), 775-783.

13. Probonas, M. and Kritidis P. (1993). *The exposure of the Greek population to natural Gamma radiation of terrestrial origin*. Radiat. Protec. Dosim., **46**(2), 123-126.
14. Briesmeister J. E. (1991). MCNP- A General Monte Carlo code for Neutron and Photon Transport. Version 3A. LA-7396-M, Rev.2
15. Kocher, D. C. and Sjoreen, A. L. (1985). *Dose-rate conversion factors for external exposures to photon emitters in soil*. Hlth Phys., **48**, 193-205.
16. K. Saito and S. Moriuchi (1985). *Development of a Monte Carlo code for the calculation of Gamma Ray transport in the natural environment*. Radiat. Protec. Dosim., **12**(1), 21-28.
17. P. Jacob, H. G. Paretzke, H. Rosenbaum and M. Zankl (1986). *Effective dose equivalents for photon exposures from plane sources on the ground*. Radiat. Protec. Dosim., **14**(4), 299-310.
18. P. Jacob, H. G. Paretzke, H. Rosenbaum (1988). *Organ doses from radionuclides on the ground. Part II. Non-trivial time dependences*. Hlth Phys., **55**(1), 37-49.
19. S.Y. Chen (1991). *Calculation of effective dose-equivalent responses for external exposure from residual photon emitters in soil*. Hlth Phys., **60**(3), 411-426.
20. ICRP (1987). International Commission on Radiological Protection “Data for use in protection against external radiation” ICRP Publication 51. Pergamon Press, Oxford.
21. Engineering Compendium on Radiation Shielding. Editor (R.G. Jaeger), Vol. II Shielding Materials, Springer-Verlag Berlin, 1975. D. Spielberg in P. 346.