ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΟΣΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΟΥ ^{137}CS ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ, ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ της

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ-ΕΛΙΚΩΝΙΔΑΣ ΜΑΡΟΥΔΗ
Σπουδάστριας της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Μ.Ι. Αναγνωστάκης (Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.)
Συνεργασία: Κ.Λ. Καρφόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2009

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Δ.Ε. με τίτλο «ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΟΣΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΟΥ ^{137}CS ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ, ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO» αποτελεί το επιστέγασμα των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος «Δοσιμετρία και Ακτινοπροστασία» της κατεύθυνσης Ενεργειακών Μηχανολόγων Μηχανικών και υποστηρίχθηκε από τον τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες και ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον καθηγητή μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Μάριο Αναγνωστάκη, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, για την στήριξή του και την συνεργασία κατά την ανάθεση και εκπόνηση της παρούσας Δ.Ε., αλλά κυρίως γιατί μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ πιο ενδελεχώς με κάτι που τόσο με ενδιαφέρει και να αισθανθώ την πληρότητα και την ικανοποίηση της δημιουργίας καθώς και στον καθηγητή μου, Λέκτορα κ. Νικόλαο Πετρόπουλο, γιατί μου έδωσε το έναυσμα να ασχοληθώ και τελικά να αγαπήσω την Πυρηνική Τεχνολογία.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Καρφόπουλο, ο οποίος συνέβαλε ουσιαστικά και καθοριστικά στην πραγματοποίηση αυτής της Δ.Ε. Τον ευχαριστώ πολύ για τις πολύτιμες συμβουλές του, το αμείωτο ενδιαφέρον του, την ηθική ενδυνάμωση και τις επιστημονικές κατευθύνσεις που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα και βέβαια για την… αστείρευτη και δοκιμασμένη υπομονή του.

Ευχαριστώ επίσης όλα τα μέλη του τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας για τις τεχνικές συμβουλές και για την καθοδήγηση τους καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας Δ.Ε.

Τέλος, θα ήθελα πάνω απ' όλα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και τους φίλους μου, που όχι μόνο μου στάθηκαν συμπαραστάτες και συνοδοιπόροι όλα αυτά τα χρόνια, αλλά με στήριξαν και πίστεψαν σε εμένα σε κάθε μου βήμα και επιλογή.

Αθήνα, Μάρτιος 2009

Αικατερίνη-Ελικωνίδα Δ. Μαρούδη

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....i

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....ii

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....4

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΣΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΗΣ γ-ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΟΥ ^{137}Cs ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ.....4

2.1. Θεμελιώδη μεγέθη από την δοσιμετρία και την ακτινοπροστασία.....6

2.2. Θεωρητικός υπολογισμός απορροφώμενης δόσης εξαιτίας σημειακής πηγής φωτονίων.....7

2.3. Θεωρητικός υπολογισμός απορροφώμενης δόσης εξαιτίας δισκοειδούς πηγής φωτονίων.....10

2.4. Θεωρητικός υπολογισμός απορροφώμενης δόσης εξαιτίας κυλινδρικής πηγής φωτονίων.....13

2.5. Υπολογισμός της δόσης εξαιτίας της ραδιενέργειας του ^{137}Cs στο έδαφος.....17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....34

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΩΜΕΝΗΣ ΔΟΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO.....34

3.1. Εισαγωγή στην προσομοίωση με την μέθοδο Monte Carlo.....34

3.2. Ο κώδικας PENELOPE.....35

3.2.1. Ο κώδικας χρήστη PENMAIN.....37

3.2.1.1. Τα αρχεία εισόδου δεδομένων του κώδικα PENMAIN.....37

3.2.1.2. Εικονικοί ανιχνευτές.....39

3.2.1.2.α. Ανιχνευτής Αποτιθέμενης Ενέργειας.....40

3.2.1.2.β. Ανιχνευτής Δόσης.....41

3.2.1.2.γ. Ανιχνευτής Αληλεπίδρασης.....42

3.2.1.3. Τα αρχεία αποτελεσμάτων του κώδικα PENMAIN.....42

3.2.1.3.1. Το αρχείο penmain.dat 42

3.2.1.3.2. Το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. 44

3.2.1.3.3. Τα αρχεία εξόδου του ανιχνευτή δόσης..... 44

3.3. Δοσιμετρικοί υπολογισμοί με χρήση του κώδικα PENMAIN 45

3.3.1. Υπολογισμός της δόσης εξαιτίας σημειακής πηγής φωτονίων..... 45

3.3.1.1. Υπολογισμός της δόσης μέσω του κώδικα PENELOPE 46

3.3.1.1.α. Άμεσος προσδιορισμός μέσω του Ανιχνευτή Δόσης (Dose Enclosure)..... 48

3.3.1.1.β. Έμμεσος Υπολογισμός μέσω του Ανιχνευτή Αποτιθέμενης Ενέργειας (Energy Deposition Detector) 48

3.3.1.2. Θεωρητικός υπολογισμός..... 49

3.3.1.3. Σύγκριση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα 50

3.4. Μελέτη της εξάρτησης της εκτιμούμενης δόσης από την ακτίνα της δισκοειδούς πηγής..... 51

3.4.1. Τροποποίηση του κώδικα χρήστη PENMAIN για δισκοειδή πηγή φωτονίων 51

3.4.1.1. Έλεγχος της τυχαιότητας του σημείου εκπομπής φωτονίων της επίπεδης πηγής 53

3.4.2. Υπολογισμός δόσης εξαιτίας δισκοειδούς πηγής, με χρήση του κώδικα PENELOPE, για διάφορες ακτίνες της πηγής..... 53

3.4.3. Θεωρητικός υπολογισμός δόσης εξαιτίας δισκοειδούς πηγής..... 59

ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3 61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4..... 73

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΟΣΗΣ, ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΗΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥ ^{137}Cs ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ PENELOPE 73

4.1. Γενικά 73

4.2. Τυπικό έδαφος..... 73

4.2.1. Σύσταση χώματος..... 74

4.2.2. Πυκνότητα χώματος 77

4.2.3. Χαρακτηριστικά χώματος της διάταξης της παρούσας ΔΕ..... 81

4.3. Υπολογισμός δόσης εξαιτίας του ραδιενεργού 137Cs του εδάφους, με χρήση του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE 87

4.3.1. Τροποποίηση κώδικα χρήστη PENMAIN για κυλινδρική πηγή φωτονίων 88

4.3.1.1. Έλεγχος της θέσης εκπομπής φωτονίου μέσα σε κυλινδρική πηγή 89

4.3.2. Δημιουργία αρχείων δεδομένων 90

4.3.2.1. Αρχεία υλικών .mat 90

4.3.2.2. Αρχείο γεωμετρίας .geo 92

4.3.2.3. Αρχείο εισόδου .in 93

4.3.3. Προσομοιώσεις 94

4.3.3.1. Επαλήθευση αποτελεσμάτων προσομοίωσης 96

4.3.3.2. Αποτελέσματα προσομοιώσεων 99

4.3.4. Υπολογισμός ρυθμού δόσης βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης 100

ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4 104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 109

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΟΣΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΟΥ ^{137}Cs ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ, ΓΙΑ ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑ ΒΑΘΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗ 109

5.1. Γενικά 109

5.2. Κατακόρυφο προφίλ ^{137}Cs στο έδαφος 109

5.3. Ρυθμός δόσης για συγκεκριμένο κατακόρυφο προφίλ του ^{137}Cs στο έδαφος 122

5.4. Συμπεράσματα 131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 133

ΕΠΙΛΟΓΟΣ 133

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 138

Π.1.1. Ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης του αέρα 138

Π.1.2. Ολικός μαζικός συντελεστής απορρόφησης ανθρώπινου μαλακού ιστού 140

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 142

Π.2.1. Στοιχεία (κωδικός αριθμός = ατομικός αριθμός) 142
Π.2.2. Ενώσεις και Μίγματα (αλφαβητικά)..... 144
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 147
ΕΜΜΕΣΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΟΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΑΠΟΤΙΘΕΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ENERGY DEPOSITION DETECTOR) 147
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 150
ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ & ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ 150
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5 155
ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑ - ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΑ (TLDs) 155
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6 157
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΝΕΩΝ ΑΡΧΕΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ 157
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 159

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός αλγορίθμου εκτίμησης της δόσης εξαιτίας της ύπαρξης οιουδήποτε ραδιενεργού ισοτόπου στο έδαφος, με χρήση του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκε η περίπτωση εκτίμησης του ρυθμού δόσης εξαιτίας του ραδιενεργού Καισίου (^{137}Cs) στο έδαφος.

Η ύπαρξη ^{137}Cs στα οικοσυστήματα και, στην περίπτωσή μας, στο έδαφος οφείλεται κατά κύριο λόγο στο πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl αλλά και σε πυρηνικές δοκιμές. Το ^{137}Cs που εναποτέθηκε στα οικοσυστήματα έχει μακροπρόθεσμο αντίκτυπο στο περιβάλλον, όπως η αύξηση του ρυθμού δόσης από εξωτερική γ-ακτινοβόληση.

Ο ρυθμός δόσης από την έκθεση σε ακτίνες-γ εξαιτίας των ραδιενεργών ισοτόπων του εδάφους εκτιμάται με την χρήση διαφόρων μεθόδων. Οι μέθοδοι και οι τεχνικές υπολογισμού της δόσης αφορούν είτε μετρήσεις πεδίου, είτε εφαρμογή θεωρητικών σχέσεων, βάσει των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος, είτε θεωρητικά μοντέλα προσομοίωσης με εφαρμογή του κώδικα Monte Carlo. Σε κάθε περίπτωση, η εκτίμηση της δόσης εξαιτίας των ραδιενεργών ισοτόπων του εδάφους αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα για λόγους ακτινοπροστασίας.

Αρχικά, στο 2ο Κεφάλαιο, ορίζονται ορισμένα θεμελιώδη μεγέθη και μονάδες δοσιμετρίας ακτινοβολιών και παρουσιάζονται οι θεωρητικές σχέσεις υπολογισμού της δόσης εξαιτίας πηγών σχετικά απλής γεωμετρίας, όπως η σημειακή, δισκοειδής και κυλινδρική πηγή φωτονίων. Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε τις μεθόδους που εντοπίστηκαν στην βιβλιογραφία, οι οποίες αφορούν σε σχετικές μεθοδολογίες υπολογισμού της δόσης εξαιτίας της ύπαρξης ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος. Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν είτε θεωρητικούς υπολογισμούς, μέσω σχέσεων δοσιμετρίας, είτε πειραματικά αποτελέσματα, είτε προσομοιώσεις και άλλες υπολογιστικές μεθόδους.

Στο 3ο Κεφάλαιο περιγράφεται σύντομα ο κώδικας προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων σωματιδίων και φωτονίων με την ύλη PENELOPE, ο οποίος χρησιμοποιείται στα πλαίσια της ΔΕ, και ιδιαίτερα η χρήση του για τον υπολογισμό δόσεων, όπως περιγράφεται στην βιβλιογραφία. Επιπλέον, γίνεται εισαγωγή στις έννοιες οι οποίες είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό δόσεων μέσω της προσομοίωσης Monte-Carlo· κυρίως του ανιχνευτή απορροφώμενης δόσης ή Dose enclosure (DE), καθώς και του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας ή Energy Deposition Detector (EnDDet). Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μία σειρά προσομοιώσεων, για σημειακή και δισκοειδή πηγή φωτονίων, οι οποίες είχαν ως στόχο την πλήρη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και των αποτελεσμάτων του κώδικα και της λειτουργίας ενός εικονικού ανιχνευτή απορροφώμενης δόσης, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον κώδικα με αποτελέσματα θεωρητικών υπολογισμών. Τέλος, γίνεται έλεγχος της εξάρτησης του ρυθμού δόσης που οφείλεται σε μία δισκοειδή πηγή από την ακτίνα της πηγής.

Αφού εξακριβώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ο τρόπος που λειτουργεί ο ανιχνευτής απορροφώμενης δόσης και αφού επιβεβαιώθηκε η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που δίνει, στο 4ο Κεφάλαιο γίνεται το επόμενο βήμα για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων. Το πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίστηκε στο παρόν Κεφάλαιο είναι αυτό της ύπαρξης ραδιενεργού Καισίου στο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, για το πρόβλημα αυτό ελήφθησαν υπόψη η τυπική σύσταση του εδάφους και η κατά βάθος μεταβολή της πυκνότητάς του. Για τις περιπτώσεις αυτές, υπολογίστηκε η δόση που δέχεται ανθρώπινος ιστός, εξαιτίας της ύπαρξης του ^{137}Cs σε διάφορα στρώματα μέσα στο έδαφος και προσδιορίστηκαν συντελεστές μετατροπής της συγκέντρωσης του ^{137}Cs στο έδαφος σε ρυθμό δόσης σε ανθρώπινο ιστό, για τα στρώματα αυτά.

Ακολουθεί το 5ο Κεφάλαιο, όπου παρουσιάζονται διάφορα προφίλ κατανομής του ^{137}Cs στο έδαφος, όπως αυτά προκύπτουν από την βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, λαμβάνοντας υπόψη την κατά βάθος κατανομή του ισοτόπου στο έδαφος, ώστε να προσδιοριστεί ο συνολικός ρυθμός δόσης εξαιτίας αυτής. Τέλος, συγκρίνονται τα τελικά αποτελέσματα με τις αντίστοιχες τιμές που δίνονται στην βιβλιογραφία, όπως παρατέθηκαν στο 2ο Κεφάλαιο.

Στο 6ο και τελευταίο Κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των όσων έγιναν στα πλαίσια της εκπόνησης αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν τα οποία είναι και άμεσα εφαρμόσιμα και δίνεται μια ιδέα για το τι μπορεί να αποτελέσει το μέλλον αυτής της μεθόδου, πού μπορεί να χρησιμοποιηθεί, πώς μπορεί να αναπτυχθεί περαιτέρω και ποιες επιλογές μπορεί να δώσει σε αυτόν που θα επιλέξει να την χρησιμοποιήσει ή να την βελτιώσει.

Η εργασία ολοκληρώνεται με έξι Παραρτήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΣΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΗΣ γ-ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΟΥ ^{137}Cs ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

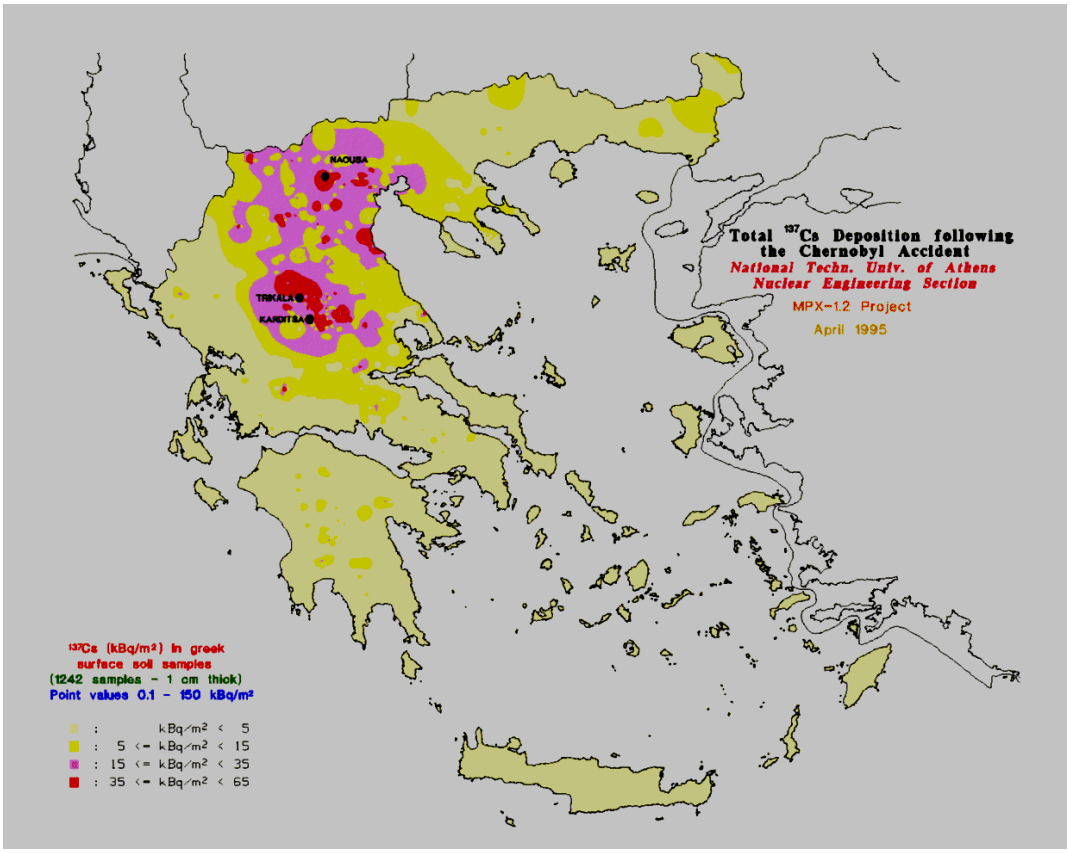
Η ραδιενεργός ρύπανση του εδάφους, λόγω ανθρωπογενούς δραστηριότητας, είναι ένα θέμα που συχνά έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα τις τελευταίες δεκαετίες. Μολονότι η ακτινοβόληση από φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που ούτως ή άλλως υπάρχουν στο έδαφος, παρουσιάζει επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις ενδιαφέρον, αυτό που συνήθως απασχολεί είναι η ακτινοβόληση και η συνακόλουθη δοσιμετρική επιβάρυνση από ραδιενεργά ισότοπα, που έχουν αποτεθεί στο έδαφος λόγω ανθρωπογενούς δραστηριότητας. Μάλιστα, αυτό που συνήθως ενδιαφέρει είναι η ακτινοβόληση εξαιτίας τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων που έχουν αποτεθεί στο έδαφος, μετά από ένα πυρηνικό ή ραδιολογικό ατύχημα, ή πυρηνική δοκιμή. Από τα τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα, αυτό που συνηθέστερα ενδιαφέρει είναι το ^{137}Cs, καθώς η απόθεση του στο χώμα μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη συνολική ραδιενεργό επιβάρυνση των ζωντανών οργανισμών, οι οποίοι παραμένουν για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα στην περιοχή που έχει υποστεί την ρύπανση. Το ^{137}Cs είναι β-ραδιενεργό, εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 662 keV, με υψηλό ποσοστό εκπομπής (85%) και έχει μεγάλο χρόνο ημιζωής ($T_{½}$=30.17 yr). Επιπλέον, σύμφωνα με τους Pommé et al. (1998), έχει σχετικά υψηλή πτητικότητα, υψηλή διαλυτότητα και οι φυσικο-χημικές του ιδιότητες ομοιάζουν με αυτές του κατιόντος Καλίου (K^+). Για όλους τους παραπάνω λόγους το ^{137}Cs θεωρείται ως ένα από τα πιο επικίνδυνα ραδιενεργά ισότοπα.

Το ατύχημα του Chernobyl, στις 26 Απριλίου του 1986, προκάλεσε ευρεία ραδιενεργό ρύπανση, τόσο στις χώρες τις πρώην Σοβιετικής Ένωσης, όσο και στην υπόλοιπη Ευρώπη. Η γεωγραφική κατανομή της ρύπανσης καθορίστηκε, κατά κύριο λόγο, από τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν τις ημέρες μετά το ατύχημα. Μαζί με το ^{137}Cs διεσπάρησαν και μία σειρά από ραδιενεργά ισότοπα, προϊόντα σχάσεως, όπως τα ^{134}Cs, ^{103}Ru, ^{106}Ru, ^{141}Ce, ^{144}Ce, ^{95}Zr, ^{54}Mn, ^{110m}Ag ^{131}I, ^{130}I κλπ. Η διασπορά των παραπάνω ραδιοϊσοτόπων και η κατανομή τους στο έδαφος

επηρεάσθηκε σε μεγάλο βαθμό από τις διαφορετικές φυσικές και χημικές τους ιδιότητες. Τα περισσότερα από τα παραπάνω ισότοπα είναι αρκετά βραχύβια και απομειώθηκαν σημαντικά μέσα στους πρώτους μήνες ή στα λίγα πρώτα χρόνια μετά το ατύχημα, και ως συνέπεια τα επίπεδα της συνολικής εξωτερικής ακτινοβόλησης στις ρυπανθείσες περιοχές μειώθηκαν κατακόρυφα. Από τα εναπομείναντα ραδιοϊσότοπα με μεγάλους χρόνους ημιζωής, το ^{137}Cs, το οποίο με το πέρασμα του χρόνου διεισδύει στο χώμα, αποτελεί πλέον την κύρια πηγή ακτινοβόλησης.

Σύμφωνα με τους Timms et al. (2004, 2005), η δόση εξαιτίας της εξωτερικής ακτινοβόλησης από το ^{137}Cs καθορίζεται από την αρχική απόθεσή του στο έδαφος, την έκταση της κατακόρυφης μετακίνησής του μέσα στο χώμα και την ικανότητα του χώματος να εξασθενεί τα φωτόνια που εκπέμπονται μέσα στο χώμα. Η κατακόρυφη μετακίνηση του ^{137}Cs στο χώμα (vertical migration) εξαρτάται, πλέον του χρόνου, και από παράγοντες όπως είναι οι καιρικές συνθήκες στην περιοχή, η δομή του χώματος, το ποσοστό διείσδυσης του νερού, καθώς και τα χαρακτηριστικά προσρόφησης του συγκεκριμένου ραδιενεργού ισοτόπου. Επιπλέον, όπως αναφέρουν οι Arapis et al. (2004), ο ρυθμός μετανάστευσης του ^{137}Cs στο χώμα, τόσο οριζόντια (επιφανειακά) όσο και κατακόρυφα (εις βάθος), εξαρτάται και από την προσρόφηση του ^{137}Cs σε μόρια χώματος, την σταθεροποίησή του από μεταλλικά και οργανικά συστατικά και την χαμηλή περιεκτικότητα σε ενώσεις ^{137}Cs που μπορούν να μετακινηθούν ευκολότερα, όπως ιόντα και υδατοδιαλυτές ενώσεις.

Στην Ελλάδα, όπως προκύπτει από τις μελέτες των Simopoulos (1989) και Petropoulos et al. (2001) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1, οι περιοχές με την μεγαλύτερη απόθεση ^{137}Cs, μετά το ατύχημα του Chernobyl, ήταν αυτές της βορειοδυτικής Θεσσαλίας και της Δυτικής Μακεδονίας. Το μεγαλύτερο τμήμα του ^{137}Cs, σήμερα, εξακολουθεί να βρίσκεται στα ανώτερα στρώματα του εδάφους. Η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs στο έδαφος πλησιάζει την εκθετική, καταλήγοντας σε μία σταθερή τιμή. Εκτιμάται δε, σύμφωνα με τους Clouvas et al. (2005), ότι η σταθερή τιμή, στην οποία τείνουν οι συγκεντρώσεις του ^{137}Cs, αντιστοιχεί στην συγκέντρωση ^{137}Cs εξαιτίας των πυρηνικών δοκιμών, ενώ το εκθετικό προφίλ περιγράφει την κατανομή του εξαιτίας του ατυχήματος του Chernobyl.



Σχήμα 2.1. Συνολική απόθεση ^{137}Cs στην ελληνική επικράτεια, μετά το ατύχημα του Chernobyl [Simopoulos (1989)].

Συμπερασματικά, η εκτίμηση της δόσης εξαιτίας της ύπαρξης ραδιενεργού ^{137}Cs στο έδαφος, καθώς και η μελέτη της κατά βάθος κατανομής του, αποτελούν αντικείμενα εξαιρετικού ενδιαφέροντος. Ποικίλες μέθοδοι και προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί, με αυτό το στόχο. Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζονται στο παρόν Κεφάλαιο. Προηγουμένως όμως, παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένες έννοιες, μεγέθη και σχέσεις από την δοσιμετρία.

2.1. Θεμελιώδη μεγέθη από την δοσιμετρία και την ακτινοπροστασία

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η μεθοδολογία υπολογισμού δόσεων, η οποία απαντάται στη βιβλιογραφία, είναι απαραίτητη η εισαγωγή ορισμένων σημαντικών εννοιών και μεγεθών που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς αυτούς.

- **Ραδιενέργεια** μίας ποσότητας ραδιενεργού υλικού είναι το πλήθος των πυρήνων που διασπώνται στην μονάδα του χρόνου, δηλαδή ο ρυθμός διασπάσεων των πυρήνων της ποσότητας αυτής. Η μονάδα ραδιενέργειας στο

σύστημα SI είναι η μονάδα **Becquerel** (**Bq**), που ορίζεται ως η ραδιενέργεια μίας πηγής στην οποία πραγματοποιείται μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο. Αρχικά, χρησιμοποιείτο η μονάδα **Curie** (**Ci**), η οποία αντιστοιχεί σε εκείνη την ποσότητα ραδιενεργών ομοειδών πυρήνων, στην οποία ο αριθμός των διασπάσεων που πραγματοποιούνται ανά δευτερόλεπτο είναι $3.7 \cdot 10^{10}$. Η αντιστοιχία των μονάδων είναι: **1 Ci=3.7·10¹⁰ Bq**.

- Ως **απορροφώμενη δόση** (**D**) ορίζεται η, από οποιοδήποτε είδος ιοντίζουσας ακτινοβολίας, αποτιθέμενη ενέργεια στην μονάδα μάζας οποιουδήποτε είδους απορροφητή. Είναι δηλαδή:

$$\boxed{D = \frac{\Delta E}{\Delta m}} \qquad (2.1)$$

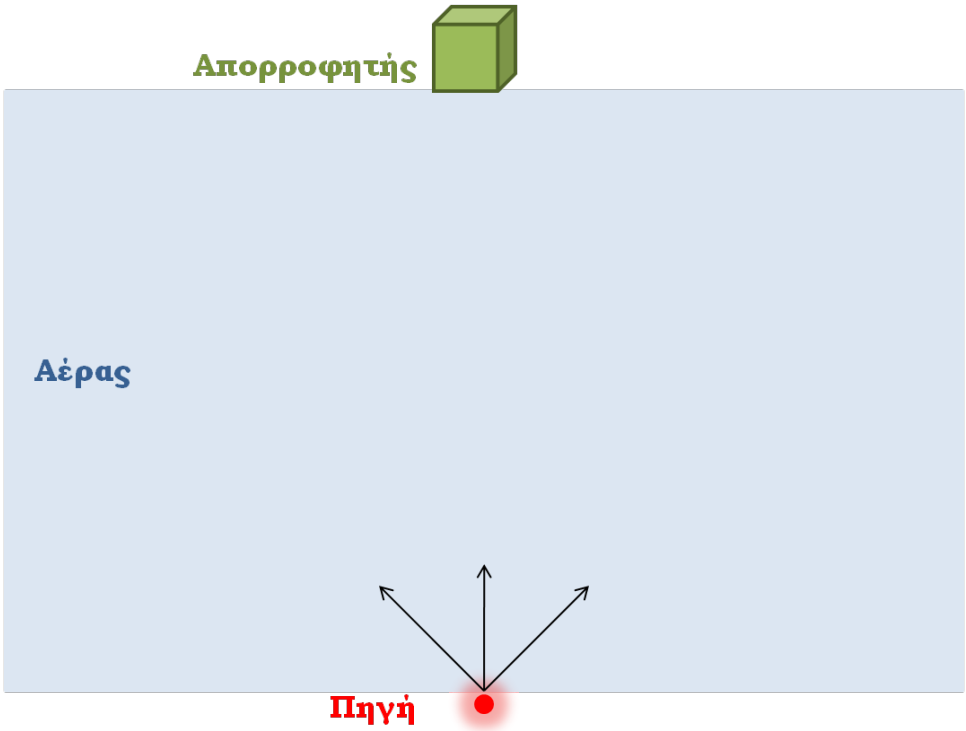
Στο σύστημα SI η μονάδα μέτρησης της απορροφώμενης δόσης είναι η μονάδα **Grey** (**Gy**), για την οποία ισχύει 1 Gy = 1 J/kg. Επιπλέον, σπανιότερα σήμερα, χρησιμοποιείται η μονάδα **rad** (**r**adiation **a**bsorbed **d**ose), για την οποία ισχύει **1 rad = 0.01 J/kg = $6.25 \cdot 10^{7}$ MeV/g**. Η αντιστοιχία των μονάδων εδώ είναι: **1 Gy = 100 rad**.

- Κατά την διέλευση της ακτινοβολίας μέσα από την ύλη παρατηρείται **εξασθένηση** της ροής της ακτινοβολίας (fluence φωτόνια/cm²·s), με αποτέλεσμα την μείωση της δυνατότητάς της να προκαλέσει ιονισμούς και να αποθέσει ενέργεια στο υλικό με το οποίο τελικά αλληλεπιδρά· συνεπώς, μειώνεται και η απορροφώμενη δόση. Η εκθετική εξασθένηση των φωτονίων μέσα από την ύλη περιγράφεται από την σχέση:

$$\boxed{I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}} \qquad (2.2)$$

2.2. Θεωρητικός υπολογισμός απορροφώμενης δόσης εξαιτίας σημειακής πηγής φωτονίων

Έστω ισότροπη σημειακή πηγή μονοενεργειακών φωτονίων και, σε δεδομένη απόσταση, μάζα απορροφητή στον οποίον ενδιαφέρει ο υπολογισμός της απορροφώμενης δόση. Ενδιαμέσως παρεμβάλλεται στρώμα αέρα. Οι διαστάσεις του απορροφητή θεωρούνται πολύ μικρές σε σχέση με την απόσταση πηγής απορροφητή. Η γεωμετρία αυτή παρουσιάζεται ακολούθως:



Σχήμα 2.2. Γεωμετρία υπολογισμού της απορροφώμενης δόσης εξαιτίας σημειακής πηγής φωτονίων.

Η ροή των φωτονίων εξαιτίας της πηγής εξασθενεί εξαιτίας:

- Της απομείωσης της ροής εξαιτίας της απόστασης (Νόμος αντιστρόφου τετραγώνου)
- Της εξασθένησης της ακτινοβολίας στον αέρα

Η ροή των φωτονίων που φτάνουν τελικά στον απορροφητή έχει ως συνέπεια την απόθεση ενέργειας στο υλικό του απορροφητή.

Εάν η πηγή εκπέμπει Q φωτόνια ενέργειας E_γ, τότε η δόση η οποία τελικά απορροφάται στο κέντρο του απορροφητή, εξαιτίας του συνολικού αριθμού των εκπεμπομένων φωτονίων, θα δίνεται από την σχέση:

$$D = \frac{Q}{4\pi R^2} \times E_\gamma \times e^{-\mu_{air} d_{air}} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{\rho} \right)_{\alpha\pi o\rho.} \quad (\mathrm{eV/g})$$

ή, αν η δόση είναι ανηγμένη ανά φωτόνιο που εκπέμπεται από την πηγή:

$$D = \frac{1}{4\pi R^2} \times E_\gamma \times e^{-\mu_{air} d_{air}} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{\rho}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \quad \text{(eV/(g·φωτόνιο))} \qquad (2.3)$$

όπου ο όρος:

- $\frac{Q}{4\pi R^2}$ εκφράζει την απομείωση της ροής εξαιτίας του Νόμου αντιστρόφου τετραγώνου

- $e^{-\mu_{air} d_{air}}$ εκφράζει την εξασθένηση της δέσμης των φωτονίων εξαιτίας της ύπαρξης του αέρα

- $\left(\frac{\mu_\alpha}{\rho}\right)_{\alpha\pi o\rho.}$ εκφράζει την πιθανότητα φωτόνιο συγκεκριμένης ενέργειας να αποδώσει την ενέργειά του μέσα στο υλικό του απορροφητή

όπου:

- Q: ο συνολικός αριθμός των εκπεμπομένων φωτονίων

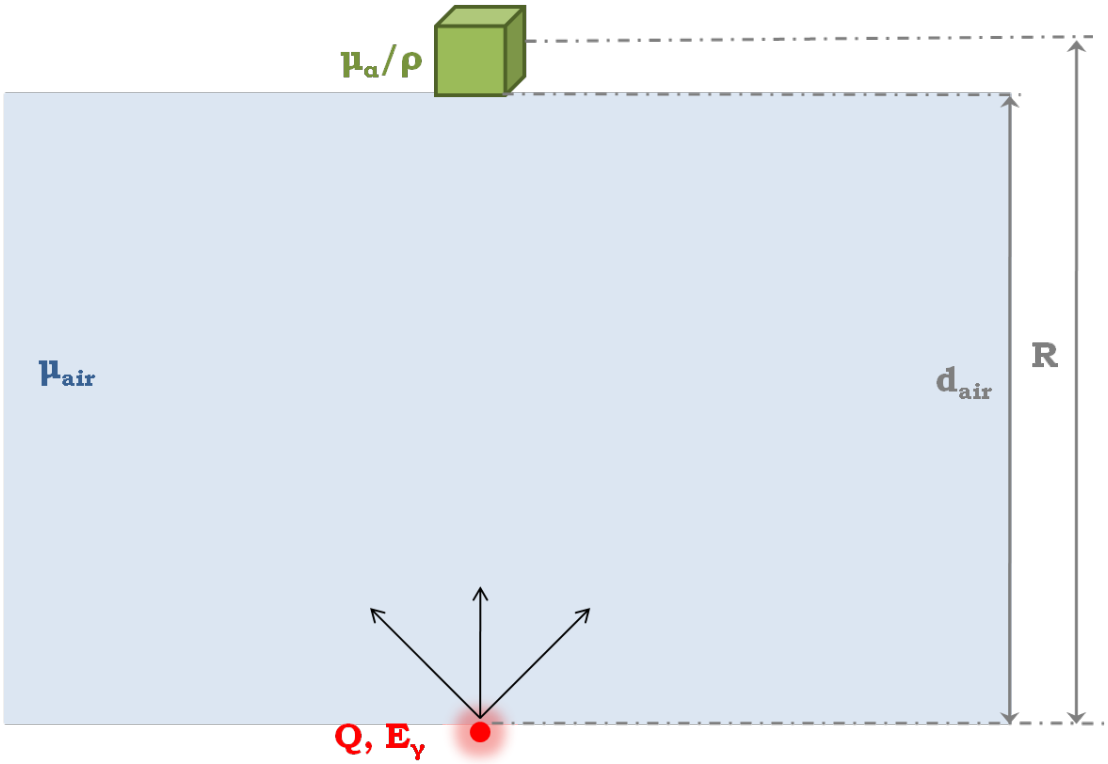
- E_γ: η ενέργεια των εκπεμπομένων φωτονίων (eV)

- R: η απόσταση της πηγής από το κέντρο του απορροφητή, όπου και υπολογίζεται η δόση (cm)

- d_{air}: η απόσταση της πηγής από την βάση του απορροφητή, δηλαδή το ύψος του στρώματος αέρα (cm)

- μ_{air}: ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του αέρα, για φωτόνια ενέργειας E_γ (cm^{-1}), για τον οποίο ισχύει $\mu_{air} = (\mu/\rho)_{air} \times \rho_{air}$, όπου $(\mu/\rho)_{air}$ ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης του αέρα για την δεδομένη ενέργεια. Για Κανονικές Συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης ισχύει $\rho_{air} = 1.20479 \times 10^{-3}$ g/cm^3.

- $(\mu_\alpha/\rho)_{\alpha\pi o\rho}$: ο ολικός μαζικός συντελεστής απορρόφησης του απορροφητή, για φωτόνια ενέργειας E_γ (cm^2/g)

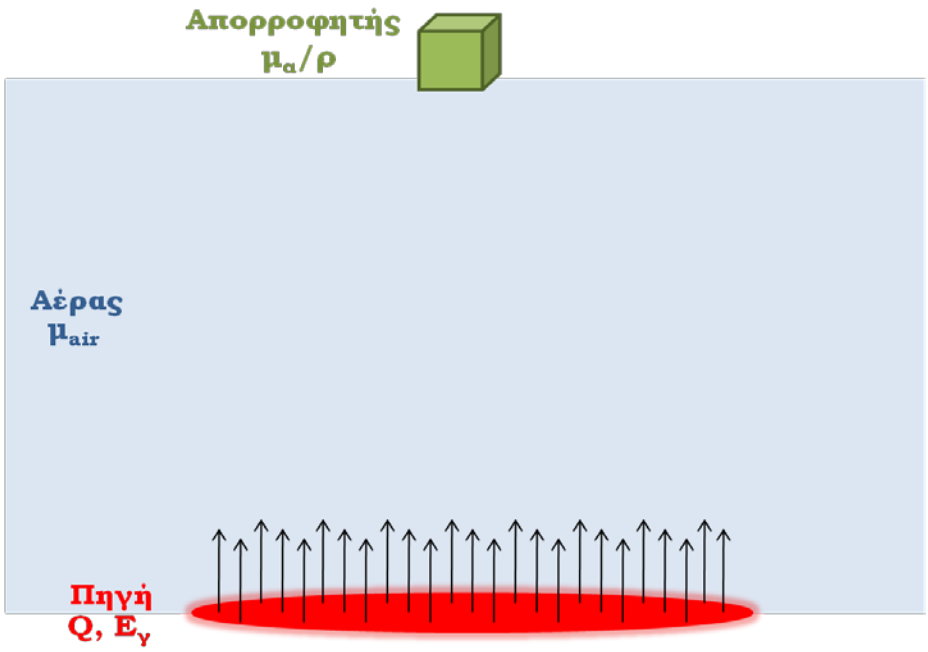


Σχήμα 2.3. Μεγέθη υπολογισμού της απορροφώμενης δόσης εξαιτίας σημειακής πηγής φωτονίων.

Οι τιμές για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένησης του αέρα $(\mu/\rho)_{air}$ και τον ολικό μαζικό συντελεστή απορρόφησης του απορροφητή $(\mu_a/\rho)_{απορ}$, για συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων στα πλαίσια της ΔΕ λαμβάνονται από τον δικτυακό τόπο του NIST (National Institute of Standards and Technology) [http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/]. Οι αντίστοιχοι πίνακες παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1.

2.3. Θεωρητικός υπολογισμός απορροφώμενης δόσης εξαιτίας δισκοειδούς πηγής φωτονίων

Η θεωρούμενη διάταξη πηγής-απορροφητή της εφαρμογής αυτής είναι όμοια με την προηγούμενη εφαρμογή, με την διαφορά ότι εδώ χρησιμοποιείται δισκοειδής πηγή μονοενεργειακών φωτονίων, η οποία εκπέμπει φωτόνια ισότροπα από όλη την επιφάνειά της. Η γεωμετρία αυτή καθώς και τα σημαντικά γεωμετρικά μεγέθη της διάταξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4 που ακολουθεί.

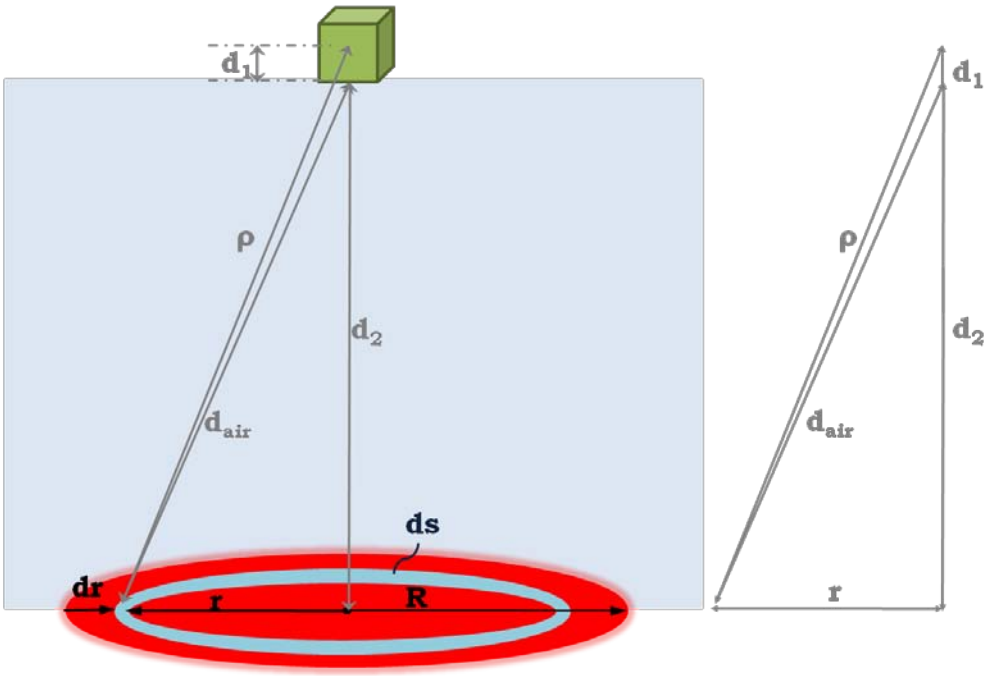


Σχήμα 2.4. Γεωμετρία και μεγέθη υπολογισμού της απορροφώμενης δόσης εξαιτίας δισκοειδούς πηγής φωτονίων.

Έστω η στοιχειώδης δακτυλιοειδής επιφάνεια dA = 2πr × dr, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Από την γεωμετρία της διάταξης προκύπτει ότι:

$$d_{air} = \sqrt{d_2^{\,2} + r^2}$$

$$\rho = \sqrt{(d_1 + d_2)^2 + r^2}$$



Σχήμα 2.5. Υπολογισμός δόσης εξαιτίας στοιχειώδους δακτυλιοειδούς επιφάνειας.

Εάν Q είναι τα συνολικά φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή, τότε από την στοιχειώδη πηγή dA εκπέμπονται dQ=(Q/A)×dA φωτόνια. Επομένως, η δόση εξαιτίας της στοιχειώδους επιφάνειας, σύμφωνα με τους παράγοντες εξασθένησης της ακτινοβολίας, υπολογίζεται από την σχέση:

$$dD = \frac{Q}{A \times 4\pi\rho^2} \times E_\gamma \times e^{-\mu_{air} d_{air}} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times dA$$

$$\Rightarrow dD = \frac{Q}{A \times 4\pi\rho^2} \times E_\gamma \times e^{-\mu_{air} d_{air}} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times 2\pi r \times dr$$

$$\Rightarrow dD = \frac{Q}{2A} \times E_\gamma \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times \frac{1}{\rho^2} \times e^{-\mu_{air} d_{air}} \times r \times dr$$

$$\Rightarrow dD = \frac{Q}{2A} \times E_\gamma \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times \frac{1}{(d_1 + d_2)^2 + r^2} \times e^{-\mu_{air}\sqrt{d_2^{\,2} + r^2}} \times r \times dr$$

Επομένως, η συνολική δόση εξαιτίας της επιφανειακής πηγής προκύπτει ολοκληρώνοντας την τελευταία σχέση:

$$D = \frac{Q}{2A} \times E_\gamma \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times \int_0^R \frac{e^{-\mu_{air}\sqrt{d_2^{\,2} + r^2}}}{(d_1 + d_2)^2 + r^2} \times r \times dr \quad \text{(eV/g)}$$

ή

$$\boxed{D = \frac{E_\gamma}{2\mathrm{A}} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times \int_0^R \frac{e^{-\mu_{air}\sqrt{d_2^{\,2} + r^2}}}{(d_1 + d_2)^2 + r^2} \times r \times dr} \quad \text{(eV/(g·φωτόνιο))} \quad (2.4)$$

Η σχέση (2.4) δίνει τη δόση ανά φωτόνιο που εκπέμπεται από τη δισκοειδή πηγή.

Στις σχέσεις αυτές είναι:

- Q: ο συνολικός αριθμός των εκπεμπομένων φωτονίων (φωτόνια)
- E_γ: η ενέργεια των εκπεμπομένων φωτονίων (eV)
- A: η επιφάνεια της πηγής (cm^2)

- R: η ακτίνα της δισκοειδούς πηγής (cm)

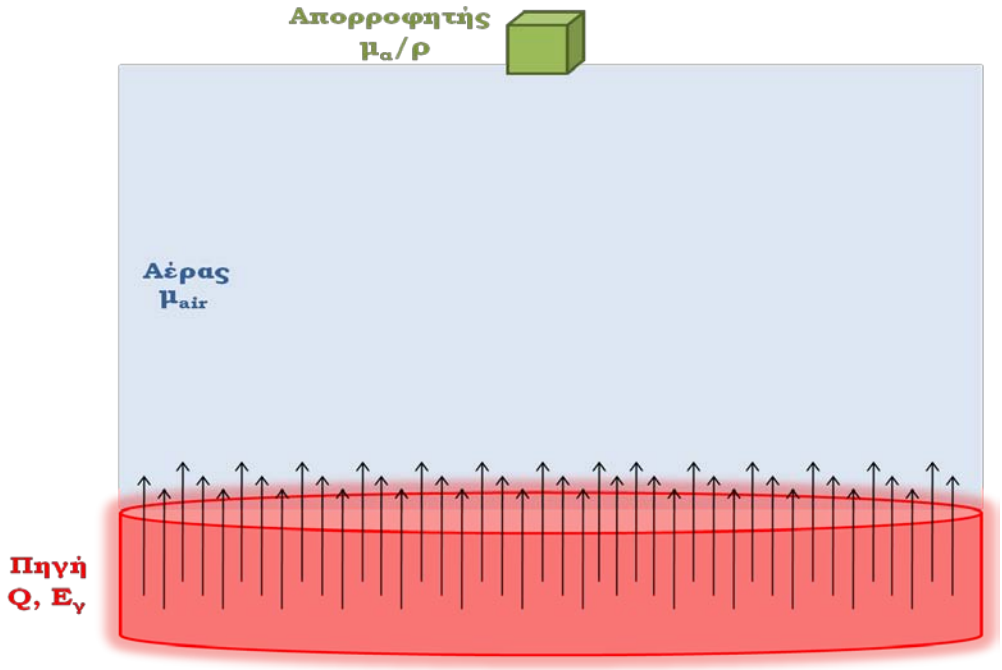
- d_1, d_2, d_{air}, ρ: στοιχεία της γεωμετρίας, όπως φαίνονται στο σχήμα (cm)

- μ_{air}: ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του αέρα, για φωτόνια ενέργειας E_γ (cm^{-1})

- $(\mu_a/\rho)_{απορ}$: ο ολικός μαζικός συντελεστής απορρόφησης του απορροφητή, για φωτόνια ενέργειας E_γ (cm^2/g)

2.4. Θεωρητικός υπολογισμός απορροφώμενης δόσης εξαιτίας κυλινδρικής πηγής φωτονίων

Σε αυτήν την παράγραφο, προσδιορίζουμε μία θεωρητική σχέση υπολογισμού της απορροφώμενης δόσης, εξαιτίας κυλινδρικής πηγής φωτονίων. Για τον σκοπό αυτό, θεωρούμε κυλινδρική πηγή φωτονίων, ακτίνας R και ύψους H, η οποία εκπέμπει ισότροπα από όλο τον όγκο της και η οποία περιέχεται σε συγκεκριμένο υλικό, το οποίο στην περίπτωσή μας είναι χώμα. Σε δεδομένη απόσταση d_2 από την επιφάνεια της πηγής, κατά τον άξονά της, θεωρούμε απορροφητή, κυβικού σχήματος, ακμής $2d_1$. Ο χώρος μεταξύ της πηγής και του απορροφητή θεωρούμε ότι πληρούται από αέρα. Η γεωμετρία αυτή, καθώς και τα σημαντικά μεγέθη της διάταξης, παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα:

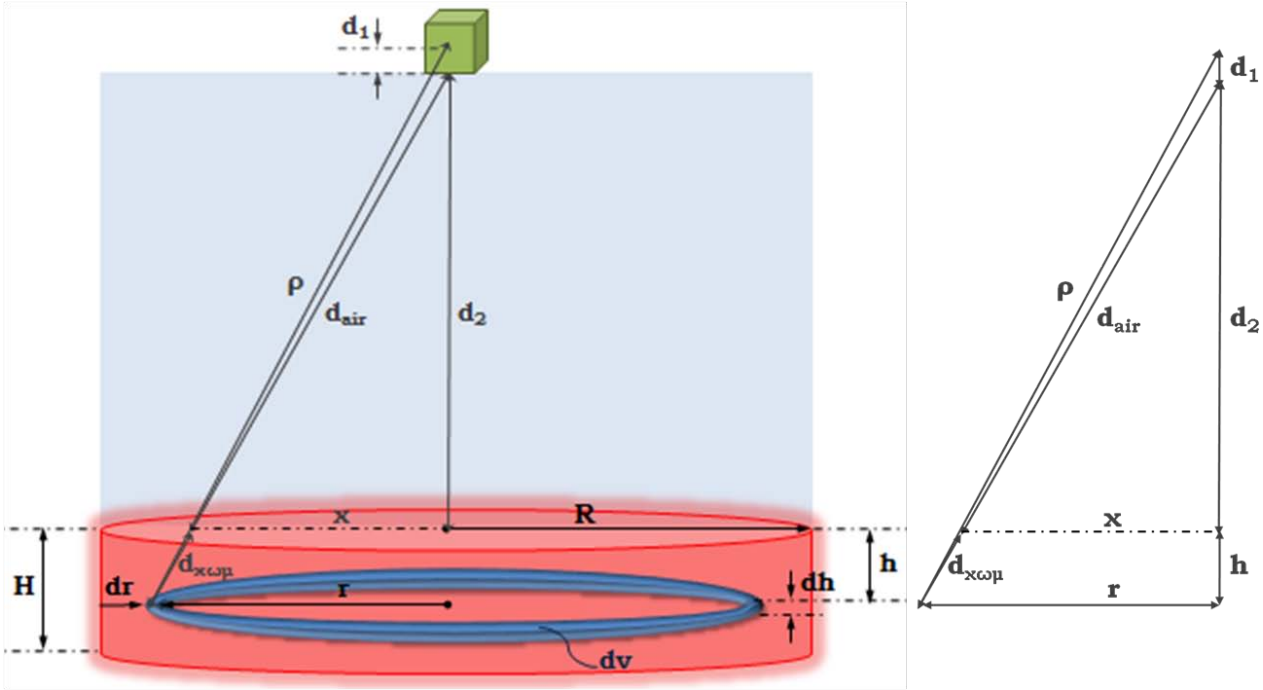


Σχήμα 2.6. Γεωμετρία και μεγέθη υπολογισμού της απορροφώμενης δόσης εξαιτίας κυλινδρικής πηγής φωτονίων.

Στην κυλινδρική πηγή, θεωρούμε τον στοιχειώδη όγκο που φαίνεται στο επόμενο σχήμα, ο οποίος ισούται με:

dv = ds × dh

⇒ dv = 2πr × dr × dh.



Σχήμα 2.7. Υπολογισμός δόσης εξαιτίας στοιχειώδους όγκου.

Όπως προκύπτει από την παραπάνω γεωμετρία, ισχύουν τα εξής:

$$\rho = \sqrt{(d_1 + d_2 + h)^2 + r^2}$$

$$d_{air} = \sqrt{d_2{}^2 + x^2}$$

Επιπλέον, από την ομοιότητα τριγώνων, προκύπτει ότι:

$$\frac{d_2 + h}{d_2} = \frac{r}{x}$$

$$\Rightarrow (d_2 + h) \cdot x = d_2 \cdot r$$

$$\Rightarrow x = \frac{d_2 \cdot r}{d_2 + h}$$

Επομένως, είναι:

$$d_{air} = \sqrt{d_2^{\,2} + \left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2 + h}\right)^2}$$

Ακόμη, προκύπτει ότι:

$$d_{\chi\omega\mu} = (d_{air} + d_{\chi\omega\mu}) - d_{air}$$

$$\Rightarrow d_{\chi\omega\mu} = \sqrt{(d_2 + h)^2 + r^2} - \sqrt{d_2^{\,2} + \left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2 + h}\right)^2}$$

Η ροή των εκπεμπομένων από την κυλινδρική πηγή φωτονίων εξασθενεί εξαιτίας:

- Της απομείωσης της ροής εξαιτίας της απόστασης (Νόμος αντιστρόφου τετραγώνου)
- Της εξασθένησης της ακτινοβολίας στον αέρα
- Της εξασθένησης της ακτινοβολίας μέσα στο υλικό της πηγής (χώμα)

Η ροή των φωτονίων που φτάνουν τελικά στον απορροφητή έχει ως συνέπεια την απόθεση ενέργειας στο υλικό του απορροφητή.

Εάν Q είναι τα συνολικά φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή όγκου, τότε από την πηγή στοιχειώδους όγκου dv εκπέμπονται dv=(Q/V)×dv φωτόνια. Επομένως, η δόση η οποία απορροφάται στο κέντρο του απορροφητή, εξαιτίας της στοιχειώδους πηγής όγκου που ορίσαμε, θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$dD = \frac{Q}{V \times 4\pi\rho^2} \times E_\gamma \times e^{-\mu_{air} d_{air} - \mu_{\chi\omega\mu} d_{\chi\omega\mu}} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times dv$$

$$\Rightarrow dD = \frac{Q}{V \times 4\pi\rho^2} \times E_\gamma \times e^{-\mu_{air} d_{air} - \mu_{\chi\omega\mu} d_{\chi\omega\mu}} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times 2\pi r \times dr \times dh$$

$$\Rightarrow dD = \frac{Q}{2V} \times E_\gamma \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times \frac{1}{\rho^2} \times e^{-\mu_{air} d_{air} - \mu_{\chi\omega\mu} d_{\chi\omega\mu}} \times r \times dr \times dh$$

$$\Rightarrow dD = \frac{Q}{2V} \times E_\gamma \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times \frac{e^{-\mu_{air}\sqrt{d_2^{\,2}+\left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2+h}\right)^2} - \mu_{\chi\omega\mu}\left(\sqrt{(d_2+h)^2+r^2} - \sqrt{d_2^{\,2}+\left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2+h}\right)^2}\right)}}{(d_1+d_2+h)^2+r^2} \times r \times dr \times dh$$

Επομένως, η συνολική δόση εξαιτίας της κυλινδρικής πηγής προκύπτει ολοκληρώνοντας την τελευταία σχέση καθ' ύψος και κατ' ακτίνα:

$$D = \frac{Q}{2V} \times E_\gamma \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times \int_0^H \int_0^R \frac{e^{-\mu_{air}\sqrt{d_2^{\,2}+\left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2+h}\right)^2} - \mu_{\chi\omega\mu}\left(\sqrt{(d_2+h)^2+r^2} - \sqrt{d_2^{\,2}+\left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2+h}\right)^2}\right)}}{(d_1+d_2+h)^2+r^2} \times r \times dr \times dh$$

(eV/g)

ή

$$\boxed{D = \frac{E_\gamma}{2V_\pi} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times \int_0^H \int_0^R \frac{e^{-\mu_{air}\sqrt{d_2^{\,2}+\left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2+h}\right)^2} - \mu_{\chi\omega\mu}\left(\sqrt{(d_2+h)^2+r^2} - \sqrt{d_2^{\,2}+\left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2+h}\right)^2}\right)}}{(d_1+d_2+h)^2+r^2} \times r \times dr \times dh}$$

σε (eV/ (g·φωτόνιο)) (2.5)

Η σχέση (2.5) δίνει τη δόση ανά φωτόνιο που εκπέμπεται από την κυλινδρική πηγή.

Στις σχέσεις αυτές είναι:

- Q: ο συνολικός αριθμός των εκπεμπομένων φωτονίων
- E_γ: η ενέργεια των εκπεμπομένων φωτονίων (eV)
- V_π: ο όγκος της πηγής (cm^3)
- R, H: η ακτίνα και το ύψος, αντιστοίχως, της κυλινδρικής πηγής (cm)
- d_1, d_2, d_{air}, $d_{\chi\omega\mu}$, ρ: στοιχεία της γεωμετρίας, όπως φαίνονται στο σχήμα (cm)

- μ_{air}: ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του αέρα, για φωτόνια ενέργειας E_γ (cm^{-1})

- $\mu_{χωμ}$: ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του χώματος, για φωτόνια ενέργειας E_γ (cm^{-1})

- $(\mu_a/\rho)_{απορ}$: ο ολικός μαζικός συντελεστής απορρόφησης του απορροφητή, για φωτόνια ενέργειας E_γ (cm^2/g)

Η σχέση (2.5) προσδιορισμού της απορροφώμενης δόσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της δόσης εξαιτίας κυλινδρικής πηγής φωτονίων, χωρίς όμως να συνυπολογίζεται η επαύξηση της δόσης εξαιτίας του υλικού στο οποίο περιέχεται η πηγή (στην συγκεκριμένη περίπτωση, εξαιτίας του χώματος).

2.5. Υπολογισμός της δόσης εξαιτίας της ραδιενέργειας του ^{137}Cs στο έδαφος

Με το χρόνο το ^{137}Cs διεισδύει μέσα στο χώμα και τμήμα της γ-ακτινοβολίας που εκπέμπει, απορροφάται από τα υπερκείμενα στρώματα χώματος. Ο ρυθμός δόσης λόγω της έκθεσης στην γ-ακτινοβολία του ^{137}Cs που υπάρχει στο έδαφος, εκτιμάται στην βιβλιογραφία με την χρήση διαφόρων μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου, σε θεωρητικούς υπολογισμούς και στην ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης με τη μέθοδο Monte Carlo.

Η εκτίμηση της δόσης λόγω της παρουσίας του ^{137}Cs στη βιβλιογραφία, έχει πραγματοποιηθεί για ποικίλα οικοσυστήματα, φυσικά ή μη, που αφορούν σε αστικό περιβάλλον, σε δάσος, σε πεδιάδα, σε λιβάδι, σε διαφορετικά υψόμετρα, σε νησί ή σε ηπειρωτική χώρα, σε περιοχές με μεγάλη ή μικρότερη βροχόπτωση, σε περιοχές που επηρεάστηκαν έντονα από το πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl ή σε άλλες, λιγότερο επηρεασμένες. Πρέπει να επισημανθεί ότι οι παραπάνω μετρήσεις ή εκτιμήσεις της δόσης έχουν γίνει για διαφόρους τύπους εδαφών (ανόργανα ή οργανικά) με διαφορετικές συστάσεις, πυκνότητες και κατά βάθος κατανομές ^{137}Cs.

Σημειώνεται, επιπλέον, ότι το χώμα αποτελεί ικανοποιητική θωράκιση για την εκπεμπόμενη α- και β-ακτινοβολία, όμως δεν συμβαίνει το ίδιο και με την γ-ακτινοβολία, καθώς, ανάλογα με την ενέργειά της, η μέση ελεύθερη

διαδρομή μπορεί να είναι αρκετά εκατοστά. Επιπλέον, στο ρυθμό δόσης από τη γ-ακτινοβόληση πρέπει να συνυπολογιστεί και η παραγόμενη δευτερεύουσα ακτινοβολία. Βεβαίως, το πρόβλημα περιπλέκεται ακόμη περισσότερο από την ανομοιόμορφη κατανομή του ^{137}Cs, ως αποτέλεσμα της κατακόρυφης μετατόπισής του με το χρόνο, καθώς και από την παρατηρούμενη κατακόρυφη κατανομή της μαζικής πυκνότητας του χώματος.

Ακολούθως, θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τις εργασίες των Timms et al. (2005), Timms et al. (2004), Ramzaev et al. (2006), Bunzl et al. (2001) και Clouvas et al. (2005), στην κατεύθυνση υπολογισμού του ρυθμού δόσης, λόγω της παρουσίας του ^{137}Cs στο έδαφος, και της συγκέντρωσης του ^{137}Cs μέσα σε αυτό, με εφαρμογή πειραματικών μεθόδων, θεωρητικών σχέσεων και μοντέλων προσομοίωσης.

Οι Timms et al. (2005), προσδιόρισαν τη δόση κάτω και πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, ως συνάρτηση του βάθους του χώματος, σε περιοχές μολυσμένες από ^{137}Cs, μετρώντας και συνδυάζοντας τα μεγέθη εξωτερική έκθεση λόγω της παρουσίας ^{137}Cs, συγκέντρωση και κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs. Συγκεκριμένα, μελέτησαν το χωριό Orevichy της περιοχής Gomel, κοντά στον ποταμό Pripyat, στην Λευκορωσία. Οι μετρήσεις πεδίου της δόσης λόγω εξωτερικής έκθεσης σε γ-ακτινοβολία πραγματοποιήθηκαν με την χρήση κατακόρυφης συστοιχίας από δοσίμετρα θερμοφωταύγειας (thermo-luminescent dosimeters - TLDs) σε επίπεδες περιοχές. [Περισσότερα στοιχεία για την θερμοφωταύγεια και τα σχετικά δοσίμετρα παρατίθενται στο Παράρτημα 5]. Σημειώνεται ότι τα πλακίδια αυτά χρησιμοποιούνται εκτεταμένα ως ατομικά δοσίμετρα, καθώς οι ατομικοί αριθμοί των στοιχείων τους είναι κοντινοί σε αυτούς του ανθρώπινου ιστού. Η συστοιχία των δοσιμέτρων σφραγίστηκε και τοποθετήθηκε στο έδαφος, στο επιθυμητό βάθος, φροντίζοντας όμως να ελαχιστοποιηθεί κάθε διαταραχή στο περιβάλλον. Με τη χρήση αυτής της συστοιχίας δοσιμέτρων, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός της δόσης σε διάφορα ύψη στον αέρα, αλλά και βάθη μέσα στο χώμα. Τα TLDs παρέμειναν στο πεδίο μέτρησης, χωρίς άλλη παρέμβαση, για 281 ημέρες, μεταξύ Αυγούστου 2002 και Ιουνίου 2003. Με τη χρήση των συγκεκριμένων δοσιμέτρων, επιτυγχάνεται η καταγραφή της δόσης η οποία προέρχεται μόνο από τη γ-ακτινοβολία του εδάφους, καθώς τα σωματίδια β τα οποία εκπέμπονται από το ^{137}Cs ή άλλα ισότοπα που ανιχνεύτηκαν, π.χ. ^{90}Sr, δε διαπερνούν το περίβλημα των TLDs και επομένως δε συνεισφέρουν στη συνολική δόση.

Επιπρόσθετα, εξήχθησαν κατακόρυφα τμήματα χώματος, από όπου ελήφθησαν δείγματα χώματος, πάχους 1 cm, μέχρι το βάθος των 10 cm, και ακολούθως δείγματα πάχους 5 cm. Με αυτήν την διαδικασία, προσδιορίζεται ποσοτικά η κατακόρυφη κατανομή οποιουδήποτε ραδιοϊσοτόπου και, στην συγκεκριμένη περίπτωση του ^{137}Cs. Η συνολική συγκέντρωση γ-ραδιενεργών ισοτόπων στο χώμα προσδιορίσθηκε με την χρήση ανιχνευτή HPGe, ενώ η συγκέντρωση ^{137}Cs στα δείγματα χώματος προσδιορίσθηκε με ανιχνευτή σπινθηρισμού NaI.

Οι τιμές του ρυθμού δόσης, που προέκυψαν, σε συγκεκριμένα ύψη πάνω από την επιφάνεια του χώματος και βάθη μέσα σε αυτό, για δείγματα και ανόργανου και οργανικού χώματος, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Σημειώνεται ότι το σημείο 0 αντιστοιχεί στην επιφάνεια του χώματος. Επίσης, μία επιπλέον συστοιχία δέκα δοσιμέτρων τοποθετήθηκε έξω από την περιοχή που είχε ρυπανθεί, ώστε να υπολογιστεί και το υπόστρωμα των μετρήσεων, το οποίο προέκυψε ίσο με 0.109 μGy/h και έχει αφαιρεθεί από τις τιμές του Πίνακα αυτού.

Distance (cm)	Site 1 (mineral) recorded dose (μGy/hr) Array number				Site 2 (organic) recorded dose (μGy/hr) Array number			
	1	2	3	4	1	2	3	4
+30	8.88	10.04						
+25	8.83	11.46						
+20	9.14	12.13		10.71				8.81
+15	9.05	12.21	9.46	12.29				9.17
+10	10.82	12.94	10.90	11.02		11.02		8.54
+5	10.14	15.11	12.88	13.06		10.26		9.83
0	13.05	17.06	15.47	13.88	11.76	11.74	9.63	9.63
−5	15.12	17.21	11.17	11.82	14.85	13.63	9.25	13.15
−10	10.27	10.12	6.58	6.52	10.63	14.60	7.70	11.56
−15			5.38	4.15	7.39	7.75	4.52	7.96
−20	5.39	5.86	3.04	2.49	4.00	4.64	2.25	4.17
−25			1.06		2.08	2.97	1.27	
−30				0.70	0.99		0.71	1.04
−35			0.29		0.24	1.70	0.14	
−40						0.00	−0.23	
−50					−0.52		−0.60	

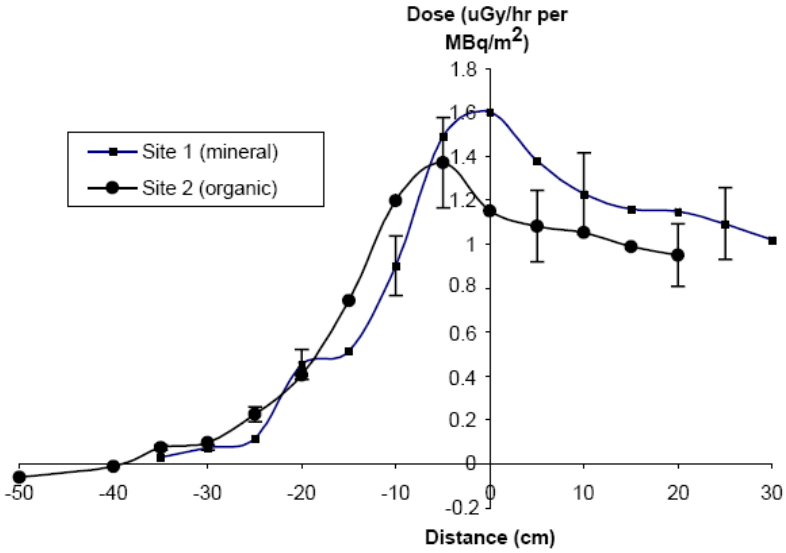
Πίνακας 2.1. Οι μετρηθείσες τιμές του ρυθμού δόσης, ύστερα από αφαίρεση του υποστρώματος, σύμφωνα με τους Timms et al. (2005) Η αβεβαιότητα των μετρήσεων θεωρείται ίση με ±10%.

Οπωσδήποτε οι χρόνοι έκθεσης ήταν τέτοιοι ώστε να εξασφαλίζουν ικανοποιητική ακρίβεια σε όλα τα βάθη. Επίσης, καθώς η αυτοαπορρόφηση της ακτινοβολίας μέσα στο χώμα εξαρτάται από την πυκνότητα του χώματος, τυχόν εποχιακές μεταβολές της υγρασίας ίσως επηρέασαν την καταγραφόμενη δόση. Έτσι, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται [Πίνακας 2.1] αποτελούν την

μέση τιμή των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες χρονικές περιόδους. Οποιαδήποτε κατακόρυφη μετατόπιση κατά τη διάρκεια των μετρήσεων θεωρείται αμελητέα.

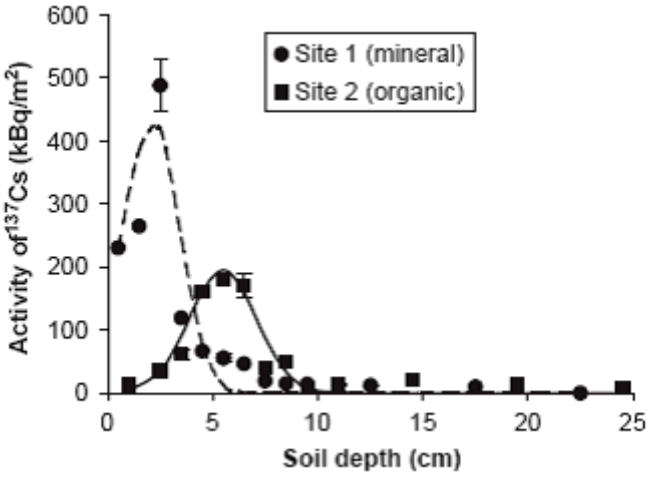
Η διακύμανση των τιμών και των κατανομών της μετρούμενης δόσης στις διαφορετικές θέσεις μέτρησης μπορεί να αποδοθεί σε ποικίλους παράγοντες, που περιλαμβάνουν την διαφορετική απόθεση ^{137}Cs στα διάφορα σημεία της περιοχής που μελετάται, διαφοροποιήσεις στην τοπογραφία της επιφάνειας και στατιστική αβεβαιότητα προερχόμενη από την διαδικασία καταγραφής και ανάγνωσης των δοσιμέτρων.

Οι τιμές αυτές της δόσης κανονικοποιήθηκαν με αναγωγή στην μετρηθείσα συνολική συγκέντρωση ^{137}Cs, κατά την στιγμή της μέτρησης (2002-2003), και έτσι προέκυψαν οι τιμές του ρυθμού δόσης σε μGy/h ανά MBq/m^2 του αποτιθέμενου ^{137}Cs. Έτσι, προκύπτει το Σχήμα 2.8, με τις ανηγμένες τιμές δόσης, ως συνάρτηση της απόστασης από την επιφάνεια του χώματος. Σημειώνεται ότι 1μGy·h^{-1}/MBq·m^{-2} ισοδυναμεί με 1nGy·h^{-1}/ kBq·m^{-2}.



Σχήμα 2.8. Ανηγμένες τιμές δόσης, σε μGy/h ανά MBq/m^2, ως συνάρτηση της απόστασης από την επιφάνεια του χώματος. [Timms et al. (2005)].

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο πεδία, ένα οργανικό και ένα ανόργανο. Στο Σχήμα 2.9 παρατίθεται το κατά βάθος προφίλ του ^{137}Cs, όπως προέκυψε από την γ-φασματοσκοπική ανάλυση στα δύο αυτά πεδία, το οργανικό και το ανόργανο. Η ραδιενέργεια του ^{137}Cs παρουσιάζεται και στον πίνακα που ακολουθεί [Πίνακας 2.2], για κάθε στρώμα χώματος που αναλύθηκε. Οι τιμές που δίνονται στην παρένθεση αντιστοιχούν στις αβεβαιότητες.



Σχήμα 2.9. Το κατά βάθος προφίλ του ^{137}Cs στα δύο πεδία που μελετήθηκαν από τους Timms et al. (2005).

Site 1 (mineral)		Site 2 (organic)	
Soil depth (cm)	Activity kBq/m^2	Soil depth (cm)	Activity kBq/m^2
Vegetation	2.3(0.2)	vegetation	8.6(1.0)
Forest litter	25.6(2.9)	0–2	13.1(1.6)
0–1	230.8(31.6)	2–3	35.6(4.6)
1–2	264.7(36.0)	3–4	61.6(7.8)
2–3	486.5(42.3)	4–5	160.7(18.6)
3–4	119.0(14.3)	5–6	179.5(23.0)
4–5	66.7(4.5)	6–7	170.0(19.0)
5–6	55.9(6.7)	7–8	40.6(5.2)
6–7	46.8(5.2)	8–9	48.2(5.7)
7–8	19.2(2.0)	9–10	8.7(1.2)
8–9	14.7(1.5)	10–12	14.0(1.8)
9–10	13.8(1.4)	12–17	21.9(2.2)
10–15	11.9(1.1)	17–22	13.1(1.2)
15–20	10.0(0.9)	22–27	8.7(0.8)
20–25	0.1(0.0)		
Total inventory	1367.7(66.3)	Total inventory	784.3(37.3)

Πίνακας 2.2. Η ραδιενέργεια του ^{137}Cs, σε kBq/m^2, όπως προκύπτει από την μελέτη των Timms et al. (2005).

Παρατηρείται ότι η συγκέντρωση ^{137}Cs ακολουθεί διαφορετική κατανομή στα δύο πεδία, γεγονός το οποίο οφείλεται στον διαφορετικό ρυθμό κατακόρυφης μετακίνησης του ^{137}Cs στους δύο τύπους χώματος. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις, το 98% της συνολικής συγκέντρωσης (total inventory) ^{137}Cs περιέχεται στα πρώτα 10 cm χώματος.

Σε προηγούμενη μελέτη των ιδίων ερευνητών [Timms et al. (2004)], στη Λευκορωσία, για 9 διαφορετικά πεδία, προσδιορίστηκε η συνολική ποσότητα ^{137}Cs και μετρήθηκε ο ρυθμός δόσης (D_M) σε απόσταση 5 cm και 1 m από την

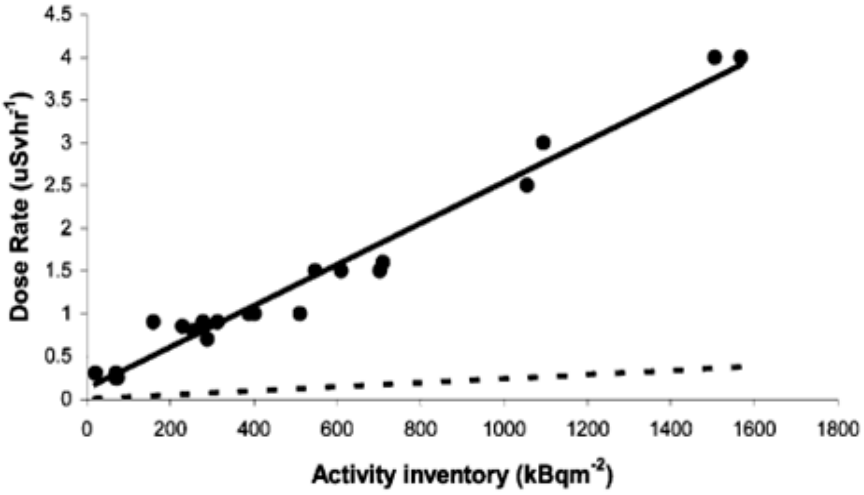
επιφάνεια του εδάφους, στον αέρα. Για τον σκοπό αυτό, ελήφθησαν κυλινδρικά δείγματα χώματος, διαμέτρου 22cm και πάχους 5-10cm, μέχρι το βάθος των 30-60cm [Kudelsky et al. (1996)]. Επιπλέον, υπολογίστηκε ο ρυθμός δόσης (D_C) βάσει του προσδιορισθέντος ^{137}Cs, μέσω του θεωρητικού μοντέλου ADE (Advection - Dispersion Equation) του οποίου όμως η μελέτη δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας ΔΕ [Πίνακας 2.3].

Location	Time (y)	Height (m)	Inventory (kBq m^{-2})	D_C (uSv h^{-1})	D_M (uSv h^{-1})
Veprin	14.02	0.05	1006.2	1.36	0.90
		1.00		1.14	0.70
Krasnoselie	14.03	0.05	3741.1	3.77	4.00
		1.00		3.26	2.50
Krasnoselie	14.03	0.05	3213.0	3.21	4.00
		1.00		2.79	2.50
Babchin	14.03	0.05	725.9	0.91	0.90
		1.00		0.77	0.80
Khmelik	14.04	0.05	349.3	0.28	0.30
		1.00		0.27	0.30
Khmelik	14.36	0.05	402.1	0.29	0.25
		1.00		0.26	0.25
Svyatoye lake catchment	14.03	0.05	1101.5	1.22	1.50
		1.00			
Svyatoye lake-Catchment	14.03	0.05		1.17	1.50
		1.00		0.98	1.00
Svyatoye lake-Catchment	14.03	0.05	1045.1	1.04	
		1.00		1.20	1.60

Πίνακας 2.3. Ο ρυθμός δόσης, όπως προέκυψε από μετρήσεις πεδίου D_M και θεωρητικό υπολογισμό D_C, βάσει του ^{137}Cs που μετρήθηκε, σύμφωνα με τους Timms et al. (2004).

Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται γραφικά η συσχέτιση του μετρούμενου ρυθμού δόσης και της μετρηθείσας συγκέντρωσης ^{137}Cs. Σύμφωνα με τους μελετητές, καθώς τα μεγέθη αυτά παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης, ο μετρούμενος ρυθμός δόσης οφείλεται κυρίως στην γ-ακτινοβόληση από το ^{137}Cs του εδάφους. Επιπλέον, θεωρούν ότι το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών του χώματος (π.χ. υγρασία, σύσταση, πυκνότητα κ.λ.π.) είναι αμελητέα ως προς την επίδρασή της στο ρυθμό δόσης, γεγονός το οποίο έρχεται σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις άλλων μελετητών [Bunzl et al. (2001)]. Σε κάθε περίπτωση, η δόση σε συγκεκριμένη τοποθεσία και χρονικό σημείο, όπως είναι φυσικό, εξαρτάται από τη συγκέντρωση του ^{137}Cs και την κατανομή της στο έδαφος. Επιπλέον, στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται με διακεκομμένη γραμμή ο ρυθμός δόσης, όπως αυτός

προκύπτει υπό την παραδοχή ότι όλη η ποσότητα ^{137}Cs είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στα πρώτα 30 cm. Προφανώς, αυτή η προσέγγιση υποεκτιμά τη δόση. Γενικά πάντως, θεωρείται πως η συγκέντρωση του ^{137}Cs στο χώμα αποτελεί φθίνουσα κατανομή, παρουσιάζοντας την μέγιστη τιμή είτε στην επιφάνεια του χώματος στα πρώτα εκατοστά από την επιφάνεια.



Σχήμα 2.10. Ο ρυθμός δόσης, όπως μετρήθηκε, προκύπτει ευθέως ανάλογος με την συγκέντρωση ^{137}Cs [Timms et al. (2005)].

Σε άλλη μελέτη η οποία πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Bryansk της Ρωσίας [Ramzaev et al. (2006)], προσδιορίσθηκε ο ρυθμός απορροφώμενης δόσης στον αέρα (DR), εξαιτίας της εξωτερικής έκθεσης σε γ-ακτινοβολία, προερχόμενη από τα ραδιενεργά ισότοπα του εδάφους. Η περιοχή αυτή αποτελεί την πλέον ρυπασμένη περιοχή της Ρωσίας, από το ατύχημα του Chernobyl και η αρχική απόθεση (επιφανειακή συγκέντρωση ^{137}Cs) παρουσίαζε τεράστια διακύμανση, από 13 kBq/m^2 έως 4340 kBq/m^2. Οι περιοχές όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις επιλέχθηκαν με τέτοιον τρόπο, ώστε η αναμενόμενη τιμή της ραδιενέργειας των τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων του εδάφους, κυρίως του ^{137}Cs, να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το φυσικό υπόστρωμα.

Κατά τη μελέτη αυτή, πραγματοποιήθηκαν ξεχωριστές εκτιμήσεις για τον απορροφώμενο ρυθμό δόσης εξαιτίας των αποθέσεων του ατυχήματος του Chernobyl και εξαιτίας των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων του εδάφους. Το υπόστρωμα των μετρήσεων, εξαιτίας της κοσμικής ακτινοβολίας και του θορύβου της συσκευής, υπολογίστηκε στα 2 mR/h.

Για τις μετρήσεις του ρυθμού έκθεσης χρησιμοποιήθηκε φορητός ανιχνευτής κρυστάλλου NaI(Tl), ο οποίος τοποθετήθηκε σε ύψος 1 m από την επιφάνεια του εδάφους, με τον κρύσταλλο να έχει κατεύθυνση προς το έδαφος. Η δόση θεωρήθηκε ότι αποτελεί γραμμική συνάρτηση της απόκρισης του ανιχνευτή, στο εύρος των 0.005-99.99 mR/h. Για τα πεδία όπου μετρήθηκε ο συνολικός ρυθμός δόσης στον αέρα, προσδιορίστηκε επιτόπου και ο ρυθμός δόσης εξαιτίας των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων του εδάφους, με χρήση φορητών NaI(Tl) ανιχνευτών γ-φασματοσκοπίας.

Από τα πεδία όπου πραγματοποιήθηκαν οι παραπάνω μετρήσεις, ελήφθησαν επιπλέον και κυλινδρικά δείγματα χώματος, ώστε να προσδιοριστεί η ραδιενέργεια ^{137}Cs ανά μονάδα επιφάνειας. Τα δείγματα χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες. Αυτά που ελήφθησαν από παρθένα εδάφη, είχαν βάθος 20 cm και διαιρέθηκαν σε επιμέρους στρώματα των 2 cm, στα πρώτα 10 cm και των 5 cm ακολούθως. Όσα δε προέρχονταν από καλλιεργημένα εδάφη είχαν βάθος 40 cm και τα επιμέρους στρώματα ήταν ανά 5 cm. Για να προσδιοριστεί η συγκέντρωση του ^{137}Cs, του ^{134}Cs και των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στα στρώματα χώματος πραγματοποιήθηκε γ-φασματοσκοπία, με ανιχνευτές NaI(Tl) και HPGe. Χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές μετατροπής για τον υπολογισμό του ρυθμού απορροφώμενης δόσης, εξαιτίας των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων, όπως αυτοί δίνονται από το UNSCEAR (2000).

Ο ρυθμός απορροφώμενης δόσης $\dot{D}_{air\,Cs}$ (nGy/h ανά kBq/m^2) στον αέρα, εξαιτίας των ραδιενεργών αποθέσεων από το ατύχημα του Chernobyl, ανηγμένος στην συγκέντρωση ^{137}Cs του εδάφους, υπολογίστηκε από την ακόλουθη σχέση:

$$\boxed{\dot{D}_{airCs} = ((R_{device} - BC) \times k - \dot{D}_{airTRN}) / GD_{137}} \quad (2.6)$$

όπου:

- R_{device}: η τιμή του συνολικού ρυθμού έκθεσης, όπως προκύπτει από την συσκευή μέτρησης (mR/h)
- BC: το υπόστρωμα των μετρήσεων, το οποίο προσδιορίστηκε ίσο με 2 mR/h
- k: συντελεστής μετατροπής του ρυθμού έκθεσης στο αέρα (mR/h) σε ρυθμό απορροφώμενης δόσης (nGy/h), ίσος με 8.7

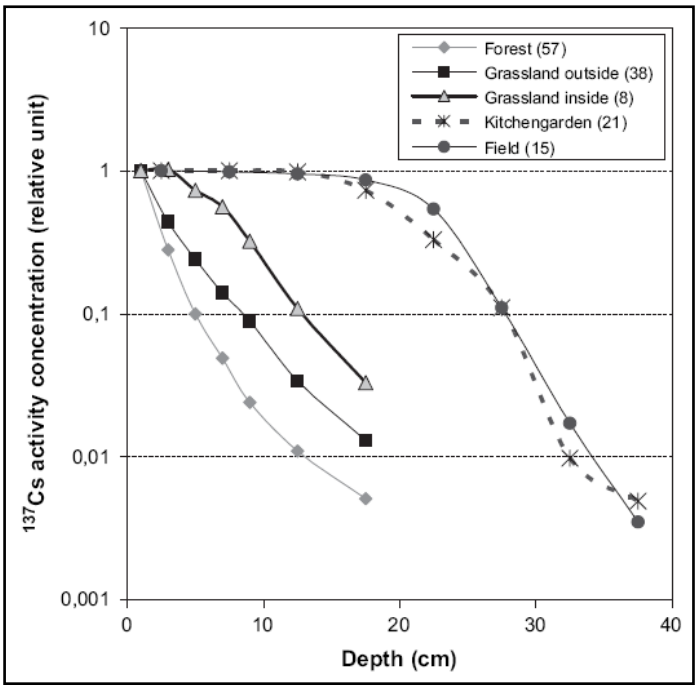
- $\dot{D}_{airTRN}$: ο ρυθμός δόσης στον αέρα εξαιτίας των φυσικών ραδιοϊσοτόπων του εδάφους (nGy/h)
- GD_{137}: η συγκέντρωση ^{137}Cs στο έδαφος, όπως αυτή προσδιορίστηκε από την ανάλυση των στρωμάτων χώματος (kBq/m^2)

Τα αποτελέσματα της προηγούμενης ανάλυσης παρατίθενται στους ακόλουθους Πίνακες 2.4 και 2.5. Ο Πίνακας 2.4 παρουσιάζει την κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs στο έδαφος, η οποία απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 2.11. Στο σχήμα αυτό, η συγκέντρωση του ^{137}Cs στα διάφορα βάθη είναι ανηγμένη στην επιφανειακή συγκέντρωση του ^{137}Cs. Ο δε Πίνακας 2.5 παρουσιάζει τον ρυθμό δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs.

Location, soil layer (cm)	^{137}Cs		
	N	Activity concentration (relative units)	Ground deposition (% to the tc
Forest			
0–2	57	1	64 ± 17
2–4	57	0.28 ± 0.21	21 ± 8
4–6	57	0.10 ± 0.15	7.1 ± 5.3
6–8	57	0.049 ± 0.070	3.4 ± 3.1
8–10	57	0.024 ± 0.030	1.8 ± 1.5
10–15	57	0.011 ± 0.012	2.1 ± 2.3
15–20	57	0.005 ± 0.005	1.0 ± 1.2
Average ± s.d.	–	–	–
Virgin grassland outside settlement			
0–2	38	1	53 ± 22
2–4	38	0.44 ± 0.33	23 ± 9
4–6	38	0.24 ± 0.29	9.2 ± 7.2
6–8	38	0.14 ± 0.18	5.8 ± 5.4
8–10	38	0.089 ± 0.012	3.7 ± 3.5
10–15	38	0.034 ± 0.040	3.5 ± 2.9
15–20	38	0.013 ± 0.015	1.9 ± 1.5
Average ± s.d.	–	–	–
Virgin grassland inside settlement			
0–2	8	1	27 ± 12
2–4	8	1.02 ± 0.27	30 ± 10
4–6	8	0.73 ± 0.44	17 ± 6
6–8	8	0.56 ± 0.45	12 ± 6
8–10	8	0.32 ± 0.37	6.7 ± 5.5
10–15	8	0.11 ± 0.13	5.8 ± 5.1
15–20	8	0.033 ± 0.035	1.9 ± 1.5
Average ± s.d.	–	–	–

Location, soil layer (cm)	^{137}Cs		
	N	Activity concentration (relative units)	Ground deposition (% to the tc
Kitchen garden			
0–5	21	1	24 ± 4
5–10	21	1.00 ± 0.20	23 ± 4
10–15	21	0.98 ± 0.19	24 ± 4
15–20	21	0.73 ± 0.22	18 ± 4
20–25	21	0.33 ± 0.25	7.5 ± 5.7
25–30	21	0.11 ± 0.19	2.3 ± 3.9
30–35	21	0.01 ± 0.01	0.27 ± 0.30
35–40	21	0.005 ± 0.007	0.13 ± 0.18
Average ± s.d.	–	–	–
Field			
0–5	15	1	23 ± 5
5–10	15	0.98 ± 0.13	22 ± 3
10–15	15	0.95 ± 0.17	22 ± 4
15–20	15	0.86 ± 0.20	21 ± 5
20–25	15	0.54 ± 0.44	9.4 ± 7.6
25–30	15	0.11 ± 0.22	2.0 ± 4.1
30–35	15	0.017 ± 0.040	0.30 ± 0.73
35–40	15	0.004 ± 0.008	0.07 ± 0.14
Average ± s.d.	–	–	–

Πίνακας 2.4. Κατανομή συγκέντρωσης ^{137}Cs στο χώμα, σύμφωνα με τους Ramzaev et al. (2006).



Σχήμα 2.11. Σχετικά κατά βάθος κατανομή ^{137}Cs στο χώμα, σύμφωνα με τους Ramzaev et al. (2006).

Location	Absorbed dose rates from terrestrial radionuclides ($nGy\,h^{-1}$)		Normalized absorbed dose rates due to ^{137}Cs fallout ($nGy\,h^{-1}$ per $kBq\,m^{-2}$ ^{137}Cs current ground deposition)	
	N	Mean ± s.d.[a]	*N*	Mean ± s.d.
Forests	27	18 ± 5	57	1.15 ± 0.19
Grasslands outside settlement	38	20 ± 6	38	1.04 ± 0.22
Arable fields	36	25 ± 5	47	0.37 ± 0.07
Grasslands inside settlement	8	24 ± 8	78	0.48 ± 0.12
Dirt surfaces	48	24 ± 5	229	0.26 ± 0.13
Kitchen gardens	52	25 ± 6	281	0.41 ± 0.07
Asphalt surfaces	11	50 ± 10	197	0.15 ± 0.07
One-story wooden houses	29	32 ± 6	164	0.10 ± 0.05
One-story brick and panel houses	16	54 ± 11	52	0.05 ± 0.04

Πίνακας 2.5. Ρυθμός απορροφώμενης δόσης εξαιτίας των φυσικών ραδιοϊσοτόπων του εδάφους και ανηγμένος ρυθμός απορροφώμενης δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs του εδάφους [Ramzaev et al. (2006)].

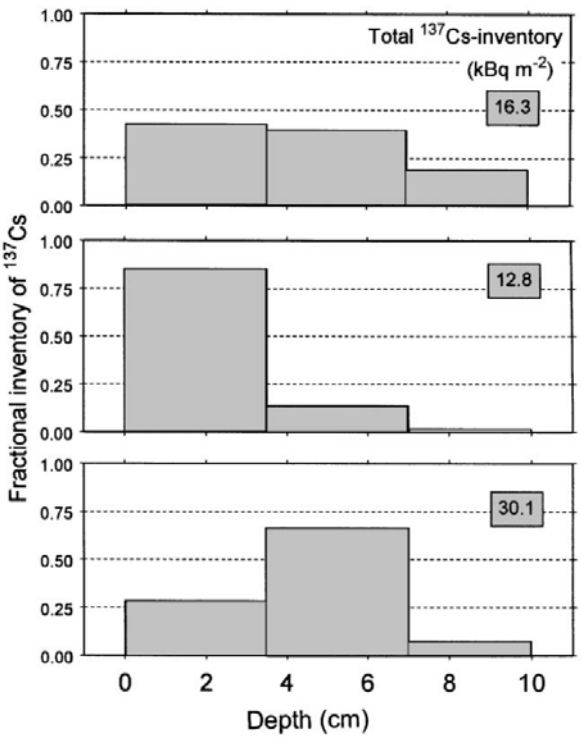
Σύμφωνα με τους Bunzl et al. (2001), οι δύο σημαντικότερες παράμετροι που απαιτούνται για τον υπολογισμό του ρυθμού δόσης εξαιτίας εξωτερικής γ-ακτινοβόλησης, είναι το κατά βάθος προφίλ της ραδιενέργειας του ^{137}Cs και το κατά βάθος προφίλ της μαζικής πυκνότητας του χώματος.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, ελήφθησαν δείγματα από μία περιοχή νότιο-ανατολικά του Μονάχου, στο Berchtesgaden National Park, στην Γερμανία. Τα δείγματα χώματος συλλέχθηκαν από το επιφανειακό χώμα, είχαν διάμετρο 7.5

cm, ύψος 10 cm και το καθένα από αυτά διαιρέθηκε σε επιμέρους στρώματα, ύψους 0-3.5, 3.5-7 και 7-10 cm, αντίστοιχα. Μελετώντας την κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs και του ^{134}Cs, κατά την 1/6/1996, διαπιστώθηκε ότι, όχι μόνο το προερχόμενο από το πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl καίσιο, αλλά και το προερχόμενο από ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, εξαιτίας των πυρηνικών δοκιμών, παραμένει πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και, πρακτικά, οι συγκεντρώσεις καισίου τείνουν να μηδενιστούν σε βάθη μεγαλύτερα των 10 cm. Η διάκριση μεταξύ του ^{137}Cs που προέρχεται από το ατύχημα του Chernobyl και του προερχόμενου από τις πυρηνικές δοκιμές, πραγματοποιείται με υπολογισμό του λόγου $^{137}Cs/^{134}Cs$ και σύγκριση αυτού με βιβλιογραφικές πηγές παλαιότερες του ατυχήματος.

Οι συγκεντρώσεις ^{137}Cs και ^{134}Cs προσδιορίσθηκαν με γ-φασματοσκοπική ανάλυση, με χρήση ανιχνευτή HPGe και πολυκαναλικού ανιχνευτή και οι χρόνοι μετρήσεων προσαρμόστηκαν, ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική ακρίβεια. Επιπλέον, οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις διορθώθηκαν, βάσει της ραδιενεργού απομείωσης, και ανάχθηκαν στην ημέρα που συλλέχθηκαν τα δείγματα.

Από τα δείγματα χώματος που αναλύθηκαν, τρία τυπικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.12. Τα δείγματα χώματος διαμερίζονται σε τρία επιμέρους στρώματα και η κατανομή του ^{137}Cs παρουσιάζεται ως κλάσμα της συνολικής ποσότητας του ραδιοϊσοτόπου. Παρατηρείται ότι η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs προκύπτει μεταβαλλόμενη στα διάφορα δείγματα, με μόνο σταθερό δεδομένο την χαμηλότερη συγκέντρωση στο τρίτο στρώμα. Προκύπτει, επομένως, πως το κατά βάθος προφίλ του καισίου ποικίλλει, αλλά σε κάθε περίπτωση, μετά τα πρώτα 10 cm χώματος, οι συγκεντρώσεις ^{137}Cs μειώνονται δραματικά. Σημειώνεται ότι σημαντικές αποκλίσεις παρατηρήθηκαν και στη συνολικά αποτιθέμενη ποσότητα ^{137}Cs μεταξύ των δειγμάτων και η μεγάλη αυτή διαφοροποίηση των τιμών αποδίδεται κυρίως σε μετεωρολογικές μεταβολές κατά την διάρκεια της απόθεσης, παρά στις ιδιότητες του χώματος.



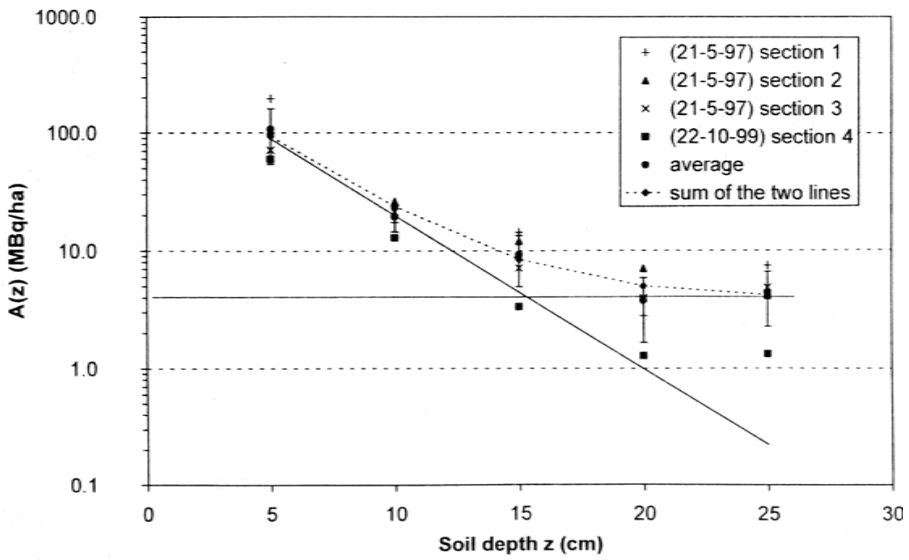
Σχήμα 2.12. Τυπικά κατά βάθος προφίλ του προερχόμενου από το Chernobyl ^{137}Cs στο χώμα. Οι τιμές δίδονται ως ποσοστό της συνολικής ραδιενέργειας ^{137}Cs, σε Bq/m^2 [Bunzl et al. (2001)].

Από τις τιμές της ραδιενέργειας του ^{137}Cs και της πυκνότητας σε κάθε στρώμα χώματος, κάθε δείγματος, υπολογίστηκε ο προκύπτων ρυθμός δόσης εξαιτίας της εξωτερικής γ-ακτινοβόλησης, σύμφωνα με όσα παραθέτουν οι Saito and Jacob (1995). Ο αριθμητικός μέσος για τον ρυθμό δόσης προέκυψε ίσος με **25 nGy/h**. Η διακύμανση των τιμών του ρυθμού δόσης οφείλεται στην διαφοροποίηση της συνολικής ποσότητας ^{137}Cs που κατακρημνίστηκε στο έδαφος, της κατακόρυφης κατανομής του μέσα στο χώμα και της πυκνότητας του χώματος. Έπειτα δε από επιπρόσθετη έρευνα, στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης, προέκυψε ότι η διαφοροποίηση της συνολικής απόθεσης ^{137}Cs αποτελεί την κύρια αιτία διαφοροποίησης του ρυθμού δόσης.

Σημειώνεται, επιπλέον, ότι η διακύμανση των τιμών του ρυθμού δόσης, όπως προέκυψε από αυτές τις εργαστηριακές μετρήσεις, είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που θα προέκυπτε από μετρήσεις πεδίου σε ύψος 1 m από το έδαφος, διότι, σε αυτή την περίπτωση, οι αντίστοιχες τιμές συνυπολογίζουν την συμβολή ολόκληρου του πεδίου.

Οι Clouvas et al. (2005), μελέτησαν ένα οικοσύστημα πευκοδάσους στην Κασσάνδρα της Χαλκιδικής, για διάστημα επτά ετών και προσδιόρισαν την

κατανομή ^{137}Cs στα διάφορα τμήματα του οικοσυστήματος, ωστόσο στην παρούσα ΔΕ θα αναφερθούμε μόνο στο χώμα. Η συνεισφορά του ^{137}Cs στον συνολικό εξωτερικό ρυθμό δόσης στον αέρα προκύπτει με συνδυασμό γ-φασματοσκοπικών μετρήσεων στο πεδίο και προσομοιώσεων Monte-Carlo. Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις πεδίου είναι ένας φορητός ανιχνευτής HPGe, ο οποίος εδράζεται σε τρίποδο, με κατεύθυνση προς το έδαφος και σε απόσταση 1 m από την επιφάνεια του εδάφους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.13 και στον Πίνακα 2.6.



Σχήμα 2.13. Κατανομή ^{137}Cs στο χώμα, σύμφωνα με τις μετρήσεις πεδίου των Clouvas et al. (2005).

Το διάγραμμα του Σχήματος 2.13 παρουσιάζει τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους, το 1997 και το 1999. Από τις μετρήσεις, δεν προκύπτει μεταβολή της κατά βάθος κατανομής με τον χρόνο και οι όποιες διαφορές αποδίδονται κυρίως στη στατιστική των μετρήσεων. Προκύπτει, λοιπόν, ότι το κατακόρυφο προφίλ του καισίου έχει σταθεροποιηθεί και επομένως ότι η μεγαλύτερη ποσότητα ^{137}Cs έχει σταθεροποιηθεί στα ανόργανα στοιχεία του χώματος, ενώ το ελεύθερο καίσιο είναι ελάχιστο. Επιπλέον, το προφίλ του καισίου φαίνεται να ακολουθεί εκθετική μεταβολή με το βάθος και να τείνει στην σταθερή τιμή των 4 MBq/ha[1]. Προκύπτει το λογικό συμπέρασμα πως η σταθερή τιμή, στην οποία

[1] Σημειώνουμε ότι το 1 ha (εκτάριο) αποτελεί μονάδα μέτρησης επιφάνειας και ισχύει 1 ha = 10000 m². Επομένως, ισχύουν οι ισοδυναμίες $1\,{}^{MBq}/_{ha} = 10^2\,{}^{Bq}/_{m^2} = 0.1\,{}^{kBq}/_{m^2}$.

τείνει το προφίλ, περιγράφει την συγκέντρωση ^{137}Cs εξαιτίας των πυρηνικών δοκιμών, ενώ η εκθετική μεταβολή, την κατανομή ^{137}Cs εξαιτίας του ατυχήματος του Chernobyl.

	kg ha^{-1}	MBq ha^{-1}	Contribution (%)
Soil			
0–5 cm	530 000	107.75	71.41
5–10 cm	560 000	19.50	12.92
10–15 cm	560 000	9.22	6.11
15–20 cm	640 000	3.76	2.49
20–25 cm	660 000	4.45	2.95
Subtotal		144.67	95.89
Forest floor			
A00	15 000	2.32	1.54
A0	5000	3.37	2.24
Subtotal		5.69	3.77
Ground vegetation	46 260	0.23	0.15
Biomass			
Wood	65 860	0.05	0.03
Bark	6660	0.17	0.11
Branches	12 070	0.05	0.04
Needles	9520	0.01	0.01
Subtotal		0.28	0.19
Total		150.88	100.00

Πίνακας 2.6. Κατανομή ^{137}Cs, σύμφωνα με τις μετρήσεις πεδίου των Clouvas et al. (2005).

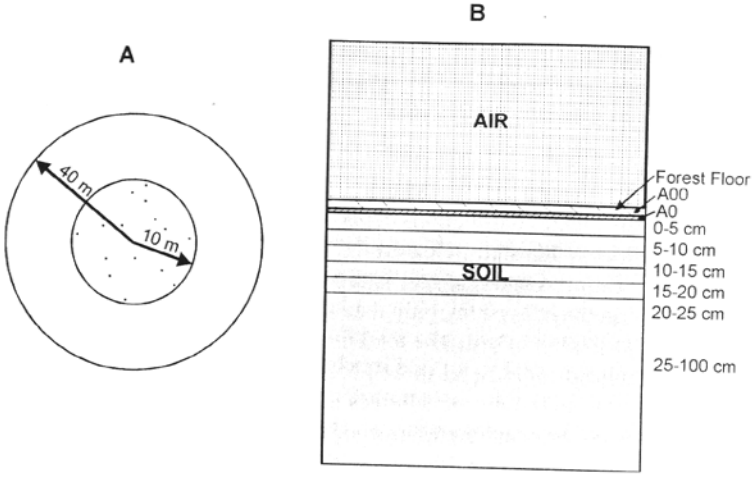
Σύμφωνα με τον Πίνακα 2.6, προκύπτει το συμπέρασμα ότι πάνω από το 80% της συνολικής ποσότητας του ^{137}Cs συγκεντρώνεται στα πρώτα 10 cm του εδάφους. Επιπλέον, από τον πίνακα αυτόν, εύκολα προσδιορίζονται οι συγκεντρώσεις ^{137}Cs σε Bq/kg, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7, μόνο για το χώμα, που απασχολεί την παρούσα ΔΕ

Βάθος (cm)	kg/ha	MBq/ha	Bq/kg
0-5	530000	107.75	**203.30**
5-10	560000	19.50	**34.82**
10-15	560000	9.22	**16.46**
15-20	640000	3.76	**5.88**
20-25	660000	4.45	**6.74**

Πίνακας 2.7. Κατανομή ^{137}Cs.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν, τεχνικές προσομοίωσης Monte-Carlo με στόχο την εκτίμηση της δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs στο έδαφος. Στόχος των προσομοιώσεων ήταν ο προσδιορισμός ενός συντελεστή επαύξησης της δόσης, εξαιτίας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας του ^{137}Cs. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα MCNP και εισήχθησαν δεδομένα για όλα τα τμήματα του δασικού οικοσυστήματος. Στην

παρούσα ΔΕ θα μας απασχολήσει μόνο το χώμα και ο αέρας. Η γεωμετρία του δασικού οικοσυστήματος που προσομοιώθηκε, όπως εισήχθη στον MCNP κώδικα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14. Μοντέλο του πεδίου όπως προσομοιώθηκε στον κώδικα MCNP, από τους Clouvas et al. (2005). Α. Κάτοψη εδάφους του πεδίου, Β. Τομή της διάταξης του πεδίου.

Το χώμα προσομοιώθηκε από πέντε διαδοχικούς κυλίνδρους, ακτίνας 40 m και ύψους 5 cm ο καθένας και σε ακτίνα 10 m τοποθετήθηκαν τα δέντρα [Σχήμα 2.14, Α]. Η πυκνότητα κάθε στρώματος χώματος μετρήθηκε επιτόπου στο δάσος και οι τιμές της κυμαίνονταν από 1.06 g/cm^3 έως 1.32 g/cm^3. Η ατομική σύσταση του χώματος θεωρήθηκε η ακόλουθη: **50% O**, **31% Si**, **6% Al**, **6%H**, **2% Fe**, **2% C**, **2% Ca** και **1% K**. Ο αέρας ελήφθη με ατομική σύσταση 79% N και 21% O.

Από την ενεργειακή κατανομή των φωτονίων που προσομοιώθηκαν, είναι δυνατόν να υπολογισθεί ο Παράγων Επαύξησης της Δόσης (Build-up Factor), από την ακόλουθη σχέση:

$$B = \frac{1}{E_N \times \Phi(E_N) \times \mu(E_N)} \sum_{i=1}^{N} E_i \times \Phi(E_i) \times \mu(E_i) \qquad (2.7)$$

όπου:

- E_i: η μέση ενέργεια του ενεργειακού διαστήματος i
- $\Phi(E_i)$: η ροή η οποία εμπίπτει σε αυτό το ενεργειακό διάστημα
- $\mu(E_i)$: ο μαζικός συντελεστής απορρόφησης του αέρα για ενέργεια E_i

Ο Παράγων Επαύξησης της Δόσης προκύπτει τελικά ίσος με **1.65**.

Για να προσδιορισθεί ο συνολικός ρυθμός δόσης στον αέρα, εξαιτίας φυσικών ραδιοϊσοτόπων και του ^{137}Cs, πραγματοποιείται γ-φασματοσκοπική μέτρηση στο πεδίο και αναλύεται το προκύπτον φάσμα.

Η συνολική απορροφώμενη δόση, στον αέρα, υπολογίστηκε από την ακόλουθη σχέση:

$$\boxed{\dot{D}_t = \sum_{i=1}^{N} E_i \times \Phi(E_i) \times \mu(E_i)} \qquad (2.8)$$

και προέκυψε ίση με **80 nGy/h**.

Η δόση εξαιτίας μόνο των παρθενικών φωτονίων υπολογίστηκε, από την φωτοκορυφή του ^{137}Cs, με εφαρμογή της σχέσης:

$$\boxed{\dot{D}_{unsc} = E \times (A/\varepsilon) \times \mu(E)} \qquad (2.9)$$

όπου:

- E = 0.661 MeV
- μ(E): ο μαζικός συντελεστής απορρόφησης του αέρα για την ενέργεια E
- A: ο αριθμός των γεγονότων στην φωτοκορυφή ανά μονάδα χρόνου (counts per minute)
- ε: ο ρυθμός καταγραφής των γεγονότων στην φωτοκορυφή (counts per minute) ανά μονάδα ροής παρθενικών (φωτόνια/cm^2s), για παράλληλη δέσμη μονοενεργειακών φωτονίων

και προέκυψε ίση με **5.5 nGy/h**.

Πολλαπλασιάζοντας την τιμή αυτή με τον παράγοντα επαύξησης της δόσης B=1.65, όπως προέκυψε από την προσομοίωση Monte Carlo, προκύπτει τελικά ο ρυθμός δόσης στον αέρα, εξαιτίας του ^{137}Cs, ίσος με:

$$\dot{D}_{Cs} = 9\ nGy/h$$

το οποίο αποτελεί περίπου το 10% του συνολικού ρυθμού δόσης.

Στα πλαίσια της εργασίας των Clouvas et al (2005) προκύπτει συντελεστής μετατροπής της συγκέντρωσης καισίου σε ρυθμό δόσης, για το συγκεκριμένο δασικό οικοσύστημα, ίσος με **0.82 nGy/h ανά kBq/m²**.

Συμπερασματικά, μελετώντας την βιβλιογραφία ως προς τις μεθόδους υπολογισμού της δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs του εδάφους διαπιστώθηκε ότι ο προσδιορισμός της δόσης αυτής παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Μάλιστα, διαπιστώθηκε πως υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις διάφορες έρευνες, ως προς τους παράγοντες που επηρεάζουν την δόση λόγω του ^{137}Cs του εδάφους, ως προς τις παραδοχές που αφορούν στην κατανομή της συγκέντρωσης του ^{137}Cs στο χώμα και στα χαρακτηριστικά του χώματος, ακόμη και ως προς τον βαθμό συνεισφοράς της ακτινοβόλησης εξαιτίας του ^{137}Cs στον συνολικό ρυθμό δόσης. Οι μέθοδοι που εντοπίστηκαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω αφορούν κυρίως σε μετρήσεις πεδίου ή εργαστηριακές μετρήσεις. Υπάρχουν ωστόσο και εφαρμογές κώδικα προσομοίωσης και θεωρητικών σχέσεων οι οποίες δεν εστιάζουν στον υπολογισμό της δόσης αποκλειστικά (με κώδικα προσομοίωσης ή με θεωρητικές σχέσεις), αλλά στον προσδιορισμό βοηθητικών στοιχείων, συνδυάζοντας και τα πειραματικά δεδομένα. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του ρυθμού δόσης πραγματοποιείται στον αέρα και όχι σε ανθρώπινο ιστό, όπως ενδιαφέρει στην παρούσα ΔΕ. Σημαντικό, τέλος, συμπέρασμα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αποτελεί η διαπίστωση, αφενός μεν ότι οι πλέον καθοριστικοί παράγοντες για το επίπεδο της δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs είναι, πέραν της αρχικής αποθέσεως, η κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του ^{137}Cs μέσα στο χώμα και η κατά βάθος κατανομή της πυκνότητας του χώματος, αφετέρου δε ότι σήμερα η μεγαλύτερη ποσότητα του ^{137}Cs παραμένει στα πρώτα εκατοστά του χώματος, με αποτέλεσμα η δόση λόγω του ^{137}Cs του εδάφους να είναι σημαντική σε ορισμένες περιπτώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΩΜΕΝΗΣ ΔΟΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO

3.1. Εισαγωγή στην προσομοίωση με την μέθοδο Monte Carlo

Η μελέτη των προβλημάτων της μετάδοσης της σωματιδιακής και της φωτονιακής ακτινοβολίας βασίστηκε αρχικά στη χρήση απλών αναλυτικών σχέσεων, η οποία, ωστόσο, έχει περιορισμένες δυνατότητες και παρουσιάζει δυσκολίες για την επίλυση προβλημάτων με περίπλοκες γεωμετρίες. Στα τέλη της δεκαετίας του '50, με την εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, άρχισε να αναπτύσσεται μια νέα μέθοδος υπολογισμού και επίλυσης προβλημάτων, η οποία βασίζεται στην προσομοίωση με τη μέθοδο Monte Carlo. Η ονομασία «Monte Carlo» επινοήθηκε τη δεκαετία του '40 από τους επιστήμονες που εργάζονταν στο πυρηνικό πρόγραμμα του Los Alamos, για να υποδείξει μια κατηγορία αριθμητικών μεθόδων βασισμένων στη χρήση των τυχαίων αριθμών. Η ονομασία αυτή προέρχεται από την πόλη του Μονακό, εξαιτίας των καζίνο που διαθέτει.

Επειδή η δημιουργία και η εξέλιξη μιας ιστορίας ενός φωτονίου ή ενός σωματιδίου είναι τυχαίας φύσεως, η μέθοδος Monte Carlo είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη για την μελέτη τέτοιων φαινομένων. Η μέθοδος Monte-Carlo (M-C) βασίζεται στην δημιουργία και εξέλιξη μίας σειράς «ιστοριών», φωτονίων ή σωματιδίων, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Για παράδειγμα, κατά την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων φωτονιακής ακτινοβολίας με την ύλη, μία «ιστορία» αντιστοιχεί στην παρακολούθηση της πορείας ενός φωτονίου, από τη στιγμή της εκπομπής του από την πηγή, έως την οριστική εξαφάνισή του. Για τη δημιουργία μίας ιστορίας, σε κάθε φάση της, επιλέγεται με τυχαίο τρόπο, μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, μια τιμή για κάθε ένα μέγεθος-χαρακτηριστικό του φωτονίου ή σωματιδίου (π.χ. αρχική διεύθυνση, θέση που θα πραγματοποιήσει την πρώτη αλληλεπίδραση, είδος της αλληλεπίδρασης κλπ). Στη συνέχεια, μετά από μια σειρά υπολογισμών, προκύπτει το τελικό ζητούμενο μέγεθος, το οποίο και καταγράφεται. Αν η διαδικασία αυτή

επαναληφθεί πολλές φορές, αν δηλαδή δημιουργηθούν πολλές ιστορίες και κάθε φορά καταγράφονται τα αποτελέσματά τους, η μέση τιμή του αποτελέσματος που προκύπτει προσεγγίζει την πραγματική τιμή της ποσότητας που ενδιαφέρει, με μεγάλη ακρίβεια. Εξυπακούεται ότι η διαδικασία της προσομοίωσης στηρίζεται πάνω σε διάφορα μοντέλα αλληλεπίδρασης του σωματιδίου με την ύλη, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους φυσικούς νόμους και μηχανισμούς που διέπουν το φαινόμενο.

Στην προσομοίωση της μετάδοσης της ακτινοβολίας, με την μέθοδο Monte Carlo, η ιστορία ενός σωματιδίου αντιμετωπίζεται ως μια τυχαία ακολουθία από ελεύθερες διαδρομές του, όπου κάθε μία ολοκληρώνεται με μια αλληλεπίδραση του σωματιδίου. Κατά την αλληλεπίδραση αυτή, το σωματίδιο αλλάζει την κατεύθυνση κίνησής του, χάνει ένα μέρος της ενέργειάς του και, σε ορισμένες περιπτώσεις, διεγείρει την ύλη και προκαλεί την παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι το σωματίδιο να χάσει όλη του την ενέργεια και να απορροφηθεί, ή μέχρι αυτό να εξέλθει των ορίων του συστήματος που εξετάζεται, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα να επιστρέψει στο σύστημα (π.χ. λόγω οπισθοσκέδασης σε κάποιο υλικό).

Τα προβλήματα τα οποία επιλύονται μέσω της προσομοίωσης (M-C) είναι πολλά και ποικίλα, όπως προβλήματα υπολογισμού θωρακίσεων, υπολογισμού και βελτιστοποίησης της απόκρισης ανιχνευτικών συστημάτων ιοντιζουσών ακτινοβολιών, προβλήματα δοσιμετρίας (Computational Dosimetry), όπως στην παρούσα ΔΕ, προβλήματα ακτινοθεραπείας με δέσμες, προβλήματα βραχυθεραπείας κλπ.

Κατά καιρούς έχουν δημιουργηθεί μία σειρά από κώδικες Monte Carlo, προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων και φωτονίων με την ύλη. Οι κώδικες αυτοί είναι διαθέσιμοι δωρεάν, μέσω της NEA-DB (Nuclear Energy Agency Data Base) του Ο.Ο.Σ.Α. (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης), που εδρεύει στο Παρίσι. Ένας τέτοιος κώδικας είναι και ο κώδικας PENELOPE, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ

3.2. Ο κώδικας PENELOPE

Ο κώδικας PENELOPE αναπτύχθηκε από τους F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea και J. Sempau στο Πανεπιστημίο της Βαρκελώνης, για πρώτη φορά το 1996. Η έκδοση του κώδικα PENELOPE, η οποία και

χρησιμοποιείται στην ΔΕ, κυκλοφόρησε το 2005 (PENELOPE 2005) και περιέχει σημαντικές διαφορές και βελτιώσεις από τις προηγούμενες εκδόσεις. Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της ΔΕ κυκλοφόρησε και νέα έκδοση (PENELOPE 2007).

Ο κώδικας PENELOPE πήρε αυτή την ονομασία από τα αρχικά των λέξεων **PEN**etration and **E**nergy **LO**ss of **P**ositrons and **E**lectrons. Στο όνομα δεν αναφέρεται η προσομοίωση των φωτονίων, καθώς αυτή δεν συμπεριλαμβανόταν στην αρχική έκδοση, αλλά προστέθηκε ως επιπλέον δυνατότητα του κώδικα, αργότερα. Ο κώδικας αυτός προσομοιώνει την διάδοση των ηλεκτρονίων, των φωτονίων και των ποζιτρονίων μέσα στην ύλη, μέσα από σύνθετες κατασκευές, αποτελούμενες από ποικίλα υλικά. Ο αλγόριθμος της προσομοίωσης βασίζεται στο μοντέλο του διασκορπισμού, το οποίο συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων, μαζί με αναλυτικά μοντέλα της ενεργού διατομής, για διάφορους μηχανισμούς αλληλεπιδράσεων, και μπορεί να εφαρμοστεί για μία ευρεία ενεργειακή περιοχή, από 50 eV έως και 1 GeV.

Ο κώδικας αποτελείται από ένα σύνολο υπορουτινών, οι οποίες ουσιαστικά καλούνται να πραγματοποιήσουν την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με την ύλη. Ο χρήστης καλείται να γράψει το δικό του Κυρίως Πρόγραμμα, στο οποίο περιγράφει την γεωμετρία του προς εξέταση προβλήματος, ελέγχει την εξέλιξη της «ιστορίας» του κάθε σωματιδίου-φωτονίου κατά την προσομοίωση και καταχωρεί σε αρχεία τις ποσότητες που ενδιαφέρουν.

Για διευκόλυνση του χρήστη, διατίθενται μαζί με τον κώδικα προσομοίωσης και ορισμένοι κώδικες χρήστη, κατάλληλοι για την επίλυση προβλημάτων για συγκεκριμένες γεωμετρίες. Πιο συγκεκριμένα, στην έκδοση του κώδικα PENELOPE που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ, διατίθενται οι ακόλουθοι κώδικες:

- PENSLAB: για την προσομοίωση της διάδοσης ηλεκτρονίων/φωτονίων, τα οποία διέρχονται από επίπεδη πλάκα συγκεκριμένου υλικού.
- PENCYL: για την προσομοίωση της διάδοσης ηλεκτρονίων/φωτονίων, τα οποία διέρχονται από σύνθετες κυλινδρικές κατασκευές.
- PENMAIN: για την προσομοίωση της διάδοσης ηλεκτρονίων/φωτονίων, διερχομένων από σύνθετες κατασκευές. Αποτελεί την γενικότερη

περίπτωση κώδικα χρήστη και χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές και για πολύπλοκες γεωμετρίες. Αυτός είναι και ο κώδικας χρήστη ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ και, για τον λόγο αυτό, επιπλέον στοιχεία για αυτόν δίνονται ακολούθως.

3.2.1. Ο κώδικας χρήστη PENMAIN

Ο κώδικας PENMAIN είναι γενικής μορφής και μπορεί να εφαρμοστεί για την επίλυση μια μεγάλης ποικιλίας πρακτικών προβλημάτων, αφού προσομοιώνει την διάδοση σωματιδίων-φωτονίων μέσα από σύνθετες κατασκευές. Καθώς είναι διαθέσιμος ο κώδικας σε source μορφή, είναι δυνατόν ο χρήστης να τον τροποποιήσει κατάλληλα, προκειμένου να προσομοιωθούν πιο πολύπλοκα προβλήματα. Κάτι τέτοιο έγινε στα πλαίσια της ΔΕ, όπως περιγράφεται στην § 3.4.1.

Στην περίπτωση του κώδικα PENMAIN, η πηγή που εκπέμπει τα πρωτογενή σωματίδια είναι σημειακή, με καθορισμένη ενέργεια ή καθορισμένο φάσμα ενεργειών. Η αρχική κατεύθυνση των εκπεμπόμενων σωματιδίων περιορίζεται στο εσωτερικό ενός κώνου με ημιγωνία ανοίγματος καθορισμένη από τον χρήστη. Η επιλογή για την ημιγωνία της τιμής 180^0 αντιστοιχεί σε εκπομπή σωματιδίων ισότροπα σε γεωμετρία 4π.

Για την εκτέλεση του κώδικα είναι απαραίτητη η δημιουργία μίας σειράς αρχείων εισόδου, ενώ κατά την εκτέλεση δημιουργούνται μία σειρά αρχείων αποτελεσμάτων στα οποία παρέχονται λεπτομερείς πληροφορίες που αφορούν στη διάδοση των σωματιδίων μέσα από τα διάφορα υλικά σώματα, που συγκροτούν τη γεωμετρία του προβλήματος (κατανομή της ενέργειας και της γωνίας εξόδου των εκπεμπόμενων σωματιδίων, κατανομή της δόσης, κατανομή της εναποτιθέμενης ενέργειας κλπ).

3.2.1.1. Τα αρχεία εισόδου δεδομένων του κώδικα PENMAIN

Η πραγματοποίηση της προσομοίωσης συγκεκριμένης εφαρμογής, μέσω του κώδικα χρήστη PENMAIN, απαιτεί, αρχικά, την περιγραφή του προς εξέταση προβλήματος. Η περιγραφή αυτή, καθώς και όλα τα απαραίτητα στοιχεία, για την υλοποίηση της προσομοίωσης, παρέχονται από το χρήστη, μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων αρχείων εισόδου. Χρησιμοποιούνται τρεις τύποι τέτοιων αρχείων:

- Το αρχείο τύπου **.in**: Πρόκειται για το κύριο αρχείο εισόδου των δεδομένων του προβλήματος και για το μοναδικό που πρέπει να δίνει ο χρήστης κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Περιγράφει τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης. Μέσω αυτού ορίζονται:

  - ✓ Η πηγή ακτινοβολίας: είδος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, ενέργεια σωματιδίων/φωτονίων, γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πηγής, πλήθος ιστοριών που προσομοιώνονται κλπ.

  - ✓ Η γεωμετρία του προβλήματος: πληροφορεί τον κώδικα για το όνομα του αρχείου περιγραφής της γεωμετρίας του προβλήματος (.geo), καθώς και του αρχείου υλικών (.mat).

  - ✓ Οι παράμετροι της προσομοίωσης: με τον όρο παράμετροι της προσομοίωσης αναφερόμαστε τόσο στον ορισμό των εικονικών ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται όσο και σε σταθερές, που ορίζουν είτε το τέλος της προσομοίωσης συγκεκριμένης ιστορίας είτε το τέλος της προσομοίωσης του προβλήματος. Αναφορικά με τους εικονικούς ανιχνευτές, σε επόμενη παράγραφο δίνονται περισσότερες πληροφορίες για τα είδη και τη λειτουργία τους

  Παράδειγμα τέτοιου αρχείου εμφανίζεται στο Σχήμα 3.1, στο τέλος του Κεφαλαίου, στο οποίο, επίσης, παρουσιάζονται τα διάφορα τμήματά του.

  Επισημαίνεται ότι το πρόγραμμα penmain τρέχει με την εντολή:

  - *penmain < αρχείο_εισόδου.in*

  όπου *αρχείο_εισόδου.in* είναι το όνομα του βασικού αρχείου δεδομένων.

- Το αρχείο **.geo**: Πρόκειται για το αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας του προβλήματος, με το οποίο περιγράφονται με λεπτομέρειες όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος. Η ύπαρξη του αρχείου αυτού, προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

  - ✓ Επιτρέπει στον χρήστη να έχει πολύ καλύτερη εποπτεία της γεωμετρίας, την οποία περιγράφει στο συγκεκριμένο αρχείο εισόδου, καθώς μπορεί με χρήση εμπορικών πακέτων όπως το gview να τη δει, να κάνει τομές κλπ.

- ✓ Επιτρέπει την προσομοίωση διαφορετικών παρόμοιων γεωμετριών (π.χ. ανιχνευτές διαφορετικών διαστάσεων) με το ίδιο βασικό πρόγραμμα και ίδιο αρχείο εισόδου τύπου .in, με μόνη αλλαγή του ονόματος του αρχείου δεδομένων γεωμετρίας μέσα στο αρχείο .in.

- Το αρχείο **.mat**: Πρόκειται για το αρχείο ορισμού όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή του προβλήματος και περιέχει όλες τις απαραίτητες φυσικές σταθερές και παραμέτρους, για την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας με αυτά. Το αρχείο .mat δημιουργείται με την εκτέλεση της εντολής:

  > *material.exe*

  είτε επιλέγοντας το κατάλληλο υλικό από τον διαθέσιμο πίνακα υλικών [Παράρτημα 2] είτε δημιουργώντας ένα υλικό, με την επιθυμητή σύσταση.

Λεπτομέρειες για τα αρχεία δεδομένων και των τρόπου εκτέλεσης του προγράμματος penmain μπορούν να ανευρεθούν στη ΔΕ Αθανασίου Ν. και στο PENELOPE [Version 2005] Manual.

3.2.1.2. Εικονικοί ανιχνευτές

Η παράγραφος αυτή αναφέρεται στους εικονικούς ανιχνευτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία προσομοίωση. Στην πραγματικότητα, ένας εικονικός ανιχνευτής αντιστοιχεί σε ένα σώμα, το οποίο ορίζεται σε συγκεκριμένη θέση του χώρου, με συγκεκριμένες διαστάσεις και αποτελούμενο από συγκεκριμένο υλικό. Ουσιαστικά, ένας εικονικός ανιχνευτής ορίζεται από μία σειρά εντολών μέσα στον κώδικα PENMAIN, με τις οποίες καταγράφονται ορισμένες παράμετροι της εισόδου και αλληλεπίδρασης των σωματιδίων ή φωτονίων στο σώμα που ο χρήστης έχει καθορίσει ως ανιχνευτή. Ανάλογα με το είδος του συγκεκριμένου ανιχνευτή, καταγράφονται στα αρχεία εξόδου πληροφορίες, όπως η ενέργεια που αποτίθεται στον συγκεκριμένο ανιχνευτή λόγω μίας αλληλεπίδρασης, η ενέργεια που έχει ένα σωματίδιο ή ένα φωτόνιο που διέρχεται από τον ανιχνευτή χωρίς να αλληλεπιδράσει κλπ. Το πρόγραμμα PENELOPE περιλαμβάνει τρία είδη εικονικών ανιχνευτών:

- Ανιχνευτές Αλληλεπίδρασης (Impact Detectors)
- Ανιχνευτές Αποτιθέμενης Ενέργειας (Energy Deposition Detectors)
- Ανιχνευτές Δόσης (Dose enclosure).

Η ενεργοποίηση ή όχι κάθε είδους ανιχνευτή γίνεται μέσω του αρχείου δεδομένων εισόδου του προγράμματος, κατά τη βούληση του χρήστη. Οι ανιχνευτές αυτοί, ανάλογα με τον τύπο τους, δεν είναι υποχρεωτικό να αποτελούν μέρος της κατασκευής, δηλαδή να αποτελούν πραγματικά σώματα τα οποία έχουν περιγραφεί στο αρχείο γεωμετρίας. Στην παρούσα ΔΕ, χρησιμοποιήθηκαν κατά περίπτωση οι ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας και οι ανιχνευτές δόσης, στους οποίους θα αναφερθούμε αναλυτικότερα ακολούθως.

3.2.1.2.α. Ανιχνευτής Αποτιθέμενης Ενέργειας

Ο **Ανιχνευτής Αποτιθέμενης Ενέργειας** (**Energy Deposition Detector** - **EnDDet**) καταγράφει την αποτιθέμενη σε αυτόν ενέργεια των σωματιδίων (ή φωτονίων) που εισέρχονται και αλληλεπιδρούν με αυτόν. Ως ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας θεωρείται ένα σώμα (body) ή μία ομάδα σωμάτων, τα οποία αποτελούν τμήμα της κατασκευής και περιλαμβάνονται στο αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας .geo και τα οποία ορίζονται από τον χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου .in. Ο χρήστης ορίζει το όνομα του αρχείου που δημιουργεί το πρόγραμμα για την αποθήκευση του φάσματος της αποτιθέμενης ενέργειας, το ενεργειακό εύρος ανίχνευσης του ανιχνευτή, καθώς και τα ενεργειακά κανάλια (energy bins) του φάσματος. Όταν ένα σωματίδιο εισέλθει στον ανιχνευτή, καταγράφεται η ενέργεια η οποία αποτίθεται σε αυτόν, ενώ σε περίπτωση απλής διέλευσης από τον ανιχνευτή, χωρίς απόθεση ενέργειας, το σωματίδιο δεν καταγράφεται. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της προσομοίωσης, δημιουργείται ένα αρχείο εξόδου, όπου καταγράφεται ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων ή φωτονίων το οποίο αποτέθηκε μέσα στον ανιχνευτή.

Στο Σχήμα 3.2, στο τέλος του Κεφαλαίου, παρατίθεται το τμήμα του αρχείου .in, στο οποίο ορίζεται ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας. Όπως φαίνεται και στο αρχείο εισόδου, δίδεται η δυνατότητα ορισμού έως και πέντε ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας. Στην πρώτη γραμμή, μετά την μεταβλητή ENDDET, ορίζεται η ενεργειακή περιοχή ανίχνευσης, καθώς και το πλήθος των καναλιών, στα οποία αυτή θα διαμεριστεί. Έτσι, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο ανιχνευτής θα ανιχνεύει φωτόνια τα οποία έχουν αποθέσει ενέργεια από 150eV έως και 200 keV και το προκύπτον φάσμα θα χωριστεί σε 500 ενεργειακά διαστήματα. Στην επόμενη γραμμή, ορίζεται το όνομα του αρχείου εξόδου στο οποίο θα αποθηκευτεί το φάσμα του ανιχνευτή. Τέλος, με την

μεταβλητή EDBODY, ορίζεται ο αριθμός του σώματος της κατασκευής που θα θεωρηθεί ως ανιχνευτής. Προφανώς, το σώμα αυτό θα πρέπει να έχει προηγουμένως ορισθεί στο αρχείο γεωμετρίας τύπου .geo, ενώ ο αριθμός αυτός θα πρέπει να ταυτίζεται με τον αντίστοιχο αριθμό του σώματος, στο αρχείο γεωμετρίας .geo.

3.2.1.2.β. Ανιχνευτής Δόσης

Ο **Ανιχνευτής Δόσης** (**Dose Enclosure - DE**) καταγράφει την κατανομή της δόσης σε ένα τμήμα της κατασκευής μας. Ως ανιχνευτής θεωρείται ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλέγμα, το οποίο καθορίζεται από τον χρήστη, μέσω του αρχείου εισόδου τύπου .in. Σε αντίθεση με τους ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας (και αλληλεπίδρασης), μπορεί και να αποτελεί ξεχωριστό τμήμα της κατασκευής, να μην ανήκει δηλαδή σε αυτή και άρα δεν είναι απαραίτητο να ταυτίζεται με κάποιο σώμα (body) αυτής. Ουσιαστικά, ένας ανιχνευτής δόσης αποτελείται από μία σειρά από κελιά, τα οποία ορίζει ο χρήστης, ορίζοντας ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλέγμα. Όταν ένα σωματίδιο εισέλθει στον χώρο που ορίστηκε ως ανιχνευτής δόσης και αλληλεπιδράσει σε ένα κελί του πλέγματος, καταγράφεται η δόση εξαιτίας της αλληλεπίδρασης αυτής στον αντίστοιχο καταμετρητή δόσης. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης έχει υπολογιστεί η δόση για κάθε κελί, και τελικά η κατανομή της δόσης στο εσωτερικό του ανιχνευτή.

Στο τμήμα του αρχείου εισόδου τύπου .in το οποίο αποτελεί το τμήμα ορισμού των ανιχνευτών, ο χρήστης ορίζει τις επιφάνειες του ορθογωνίου, το οποίο θα θεωρηθεί ως ανιχνευτής δόσης (περιβάλλουσα επιφάνεια του πλέγματος), καθώς και τις διαστάσεις του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί.

Στο Σχήμα 3.3, στο τέλος του Κεφαλαίου, παρατίθεται το τμήμα του αρχείου .in, στο οποίο ορίζεται ο ανιχνευτής δόσης. Στις 3 πρώτες γραμμές, του συγκεκριμένου παραδείγματος, ορίζεται ο ανιχνευτής μεταξύ των επιπέδων X=-0.005, X=0.005, Y=-0.005, Y=0.005, Z=200 και Z=200.001 σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων XYZ. Οι διαστάσεις δίνονται σε cm. Τέλος, στην τελευταία γραμμή ορίζεται η πυκνότητα του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί, δηλαδή σε πόσα επίπεδα κατά X, Y και Z θα διαιρεθεί ο ανιχνευτής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ορίζεται ανιχνευτής με πλέγμα 10x10x10, δηλαδή ο συνολικός όγκος του ανιχνευτή θα χωριστεί σε 1000 όγκους μικρότερης διάστασης.

Στην παρούσα ΔΕ, δεν θα χρησιμοποιηθεί διαμέριση του ανιχνευτή δόσης, δηλαδή ο ανιχνευτής θα θεωρηθεί ως ένα κελί. Επομένως, η τελευταία σειρά στο αρχείο εισόδου θα παραλείπεται.

3.2.1.2.γ. Ανιχνευτής Αληλεπίδρασης

Ο **Ανιχνευτής Αλληλεπίδρασης** (**Impact Detector)** καταγράφει την ενέργεια που έχουν τα σωματίδια την στιγμή που εισέρχονται σε αυτόν. Ως ανιχνευτής αλληλεπίδρασης θεωρείται ένα σώμα (body) ή μία ομάδα σωμάτων, τα οποία αποτελούν τμήμα της κατασκευής και περιλαμβάνονται στο αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας .geo και τα οποία ορίζονται από τον χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου .in. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της προσομοίωσης, δημιουργείται ένα αρχείο εξόδου, όπου καταγράφεται το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων ή φωτονίων που εισήλθαν μέσα στον ανιχνευτή.

3.2.1.3. Τα αρχεία αποτελεσμάτων του κώδικα PENMAIN

Ο κώδικας χρήστη PENMAIN, ο οποίος αποτελεί το κυρίως πρόγραμμα, είναι γενικής χρήσης, αφού προσομοιώνει την διάδοση των σωματιδίων-φωτονίων μέσα από σύνθετες κατασκευές. Με την εκτέλεση του κώδικα αυτού, δημιουργούνται μία σειρά από αρχεία εξόδου, μέσα στα οποία καταγράφονται διάφορες πληροφορίες αναφορικά με την προσομοίωση (π.χ. χρόνος προσομοίωσης, αριθμός ιστοριών που προσομοιώθηκαν, πλήθος σωματιδίων τα οποία πραγματοποίησαν συγκεκριμένο είδος αλληλεπίδρασης κλπ) και κατανομές των σωματιδίων (π.χ. φάσμα αποτιθέμενης ενέργειας σε συγκεκριμένο σώμα-υλικό, φάσμα ενέργειας σωματιδίων τα οποία αλληλεπίδρασαν με συγκεκριμένο σώμα-υλικό, φάσμα εκπομπής πηγής κλπ).

Τα αρχεία εξόδου ποικίλλουν, ανάλογα με τις παραμέτρους που έχει καθορίσει ο χρήστης, κάθε φορά. Στην συνέχεια περιγράφονται μόνο τα αρχεία εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα Δ.Ε, για την λήψη πληροφοριών και ενεργειακών φασμάτων και την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών.

3.2.1.3.1. Το αρχείο penmain.dat

Το αρχείο **penmain.dat** περιέχει σημαντικές πληροφορίες που αφορούν την προσομοίωση. Το αρχείο αυτό χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα, με τίτλο «PROGRAM-PENMAIN. Input data file» είναι εκείνο που παραμένει σταθερό και το οποίο περιλαμβάνει τις βασικές παραμέτρους της

προσομοίωσης, όπως αυτές καθορίστηκαν στο αρχείο εισόδου .in. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο τμήμα του αρχείου αναφέρονται:

- ✓ Η ημερομηνία και η ώρα που έγινε η προσομοίωση
- ✓ Ο τίτλος της διεργασίας
- ✓ Η περιγραφή της πηγής
- ✓ Οι παράμετροι των υλικών της κατασκευής και η ονομασία του αρχείου υλικών .mat
- ✓ Η ονομασία του αρχείου γεωμετρίας .geo
- ✓ Το μέγιστο μήκος του βήματος για το κάθε σώμα
- ✓ Τα χαρακτηριστικά των διαφόρων ανιχνευτών
- ✓ Οι ονομασίες των αρχείων dump και η χρονική διάρκεια που γίνεται dump[2]
- ✓ Ο αριθμός των ιστοριών και ο χρόνος που θα διαρκέσει η προσομοίωση

Το δεύτερο τμήμα, με τίτλο «PROGRAM-PENMAIN. Results», είναι εκείνο που περιλαμβάνει τις τρέχουσες τιμές των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και επαναλαμβάνεται μέσα στο αρχείο, κάθε φορά που νέες τιμές καταχωρούνται μέσα στο αρχείο dump. Το δεύτερο τμήμα του αρχείου περιέχει ουσιαστικά τις πληροφορίες που ενδιαφέρουν για τους εκάστοτε υπολογισμούς, οι οποίες, πιο συγκεκριμένα, είναι:

- ✓ Η συνολική χρονική διάρκεια και η ταχύτητα της προσομοίωσης
- ✓ Ο συνολικός αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων που προσομοιώθηκαν
- ✓ Ο αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων που εξήλθαν της κατασκευής, που οπισθοσκεδάσθηκαν και που απορροφήθηκαν
- ✓ Το κλάσμα των σωματιδίων, πρωτογενών και δευτερογενών, που εκπέμφθηκαν, οπισθοσκεδάσθηκαν ή απορροφήθηκαν, προς τον συνολικό αριθμό των ιστοριών της προσομοίωσης
- ✓ Οι πιθανότητες να εκπεμφθούν, να οπισθοσκεδασθούν ή να απορροφηθούν τα δευτερογενή σωματίδια/φωτόνια, που προέκυψαν από την προσομοίωση
- ✓ Η μέση τιμή της εναποτιθέμενης ενέργειας σε κάθε σώμα της κατασκευής

[2] Πρόκειται για αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται περιοδικά όλα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αυτό επιτρέπει τη διακοπή της προσομοίωσης και την επανεκκίνησή της, από το σημείο ακριβώς που διεκόπη.

- ✓ Η μέση τιμή της ενέργειας που καταγράφηκε από τον κάθε ανιχνευτή αλληλεπίδρασης
- ✓ Η μέση τιμή της αποτιθέμενης ενέργειας που καταγράφηκε από τον κάθε ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας
- ✓ Οι τιμές των τυχαίων αριθμών, όπως προέκυψαν από τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών

Στο Σχήμα 3.4, στο τέλος του Κεφαλαίου, παρουσιάζεται το δεύτερο τμήμα του αρχείου εξόδου penmain.dat.

3.2.1.3.2. Το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας

Στο αρχείο **pm_spc_enddet_#.dat,** όπου # ο αριθμός του ανιχνευτή (1-5), περιγράφεται η κατανομή της εναποτιθέμενης ενέργειας των σωματιδίων μέσα στον ανιχνευτή εναποτιθέμενης ενέργειας, στον οποίον αναφέρεται το αρχείο. Μπορούν να υπάρχουν μέχρι πέντε όμοια αρχεία, που να αναφέρονται σε πέντε διαφορετικούς ανιχνευτές αλληλεπίδρασης.

Στο Σχήμα 3.5 στο τέλος του Κεφαλαίου, παρουσιάζεται τμήμα του αρχείου εξόδου ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Στο τμήμα αυτό του αρχείου εξόδου εμφανίζονται τρεις στήλες. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στην ενέργεια που εναποθέτουν τα σωματίδια/φωτόνια στον ανιχνευτή, η δεύτερη στην πυκνότητα πιθανότητας ένα σωματίδιο να αποθέσει την υπόψη ενέργεια μέσα στον ανιχνευτή και, τέλος, η τρίτη στήλη στο μέγιστο πιθανό σφάλμα της πυκνότητας πιθανότητας, σε επίπεδο 3σ.

3.2.1.3.3. Τα αρχεία εξόδου του ανιχνευτή δόσης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία λαμβάνονται με τον ανιχνευτή δόσης, αποθηκεύονται σε δύο τύπους αρχείων. Ο πρώτος εξ αυτών, το όνομα του οποίου, όπως ορίζεται στο PENMAIN, είναι **pm_3d_dose.dat**, αποθηκεύει τρισδιάστατη κατανομή της δόσης, παρέχοντας την αποτιθέμενη δόση σε κάθε στοιχειώδη όγκο (κελί) του ανιχνευτή, ενώ τα αρχεία εξόδου του δεύτερου τύπου, με όνομα **pm_2d_dose.dat**, παρέχουν την δόση που αποτίθεται στους στοιχειώδεις όγκους ανά επίπεδο Z. Για τον λόγο αυτό, από κάθε προσομοίωση λαμβάνεται ένα αρχείο εξόδου του πρώτου τύπου, ενώ το πλήθος των αρχείων εξόδου του δεύτερου τύπου είναι ίσο με το πλήθος των Z επιπέδων στον οποίο έχει χωρισθεί ο ανιχνευτής.

Ωστόσο, καθώς στην παρούσα ΔΕ δεν θα ληφθούν επιμέρους στοιχειώδεις όγκοι του ανιχνευτή, προκύπτουν δύο αρχεία εξόδου, ένα του πρώτου και ένα του δεύτερου τύπου, των οποίων τα αποτελέσματα, όπως είναι αναμενόμενο, ταυτίζονται. Στο τέλος του Κεφαλαίου, παρατίθενται τα δύο αρχεία εξόδου του ανιχνευτή δόσης [Σχήμα 3.6].

3.3. Δοσιμετρικοί υπολογισμοί με χρήση του κώδικα PENMAIN

Όπως ήδη έχει γίνει φανερό, η χρήση του ανιχνευτή δόσης αποτελεί μεγάλη διευκόλυνση για την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών, που αφορούν σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Προκειμένου, λοιπόν, να γίνουν οι απαραίτητοι δοσιμετρικοί υπολογισμοί, στα πλαίσια της ΔΕ, αποφασίσθηκε να γίνει πρώτα διερεύνηση των δυνατοτήτων που παρέχονται από τον κώδικα PENELOPE και έλεγχος της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του ανιχνευτή δόσης.

Ο κώδικας PENELOPE παρέχει δύο δυνατότητες για την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών:

- Έμμεσα, με χρήση του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας
- Άμεσα, με χρήση του ανιχνευτή δόσης.

Προφανώς, για περιπτώσεις σχετικά απλών γεωμετριών, υπάρχει και η δυνατότητα υπολογισμών μέσω αναλυτικών σχέσεων, με χρήση μόνο των δεδομένων του προβλήματος.

Συνεπώς, αποφασίσθηκε να ελεγχθεί η λειτουργία και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του ανιχνευτή δόσης, σε απλές περιπτώσεις υπολογισμού δόσης, όπου είναι εύκολο να γίνει και ο έμμεσος υπολογισμός με χρήση του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, αλλά και ο ακριβής υπολογισμός με χρήση αναλυτικών σχέσεων. Για το σκοπό αυτό επελέγησαν οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Υπολογισμός της δόσης εξαιτίας σημειακής πηγής φωτονίων
- Υπολογισμός της δόσης εξαιτίας δισκοειδούς πηγής φωτονίων

3.3.1. Υπολογισμός της δόσης εξαιτίας σημειακής πηγής φωτονίων

Το πρόβλημα που μελετάται στην παράγραφο αυτή είναι ο υπολογισμός της δόσης, εξαιτίας ισότροπης σημειακής πηγής φωτονίων ενέργειας 600 keV,

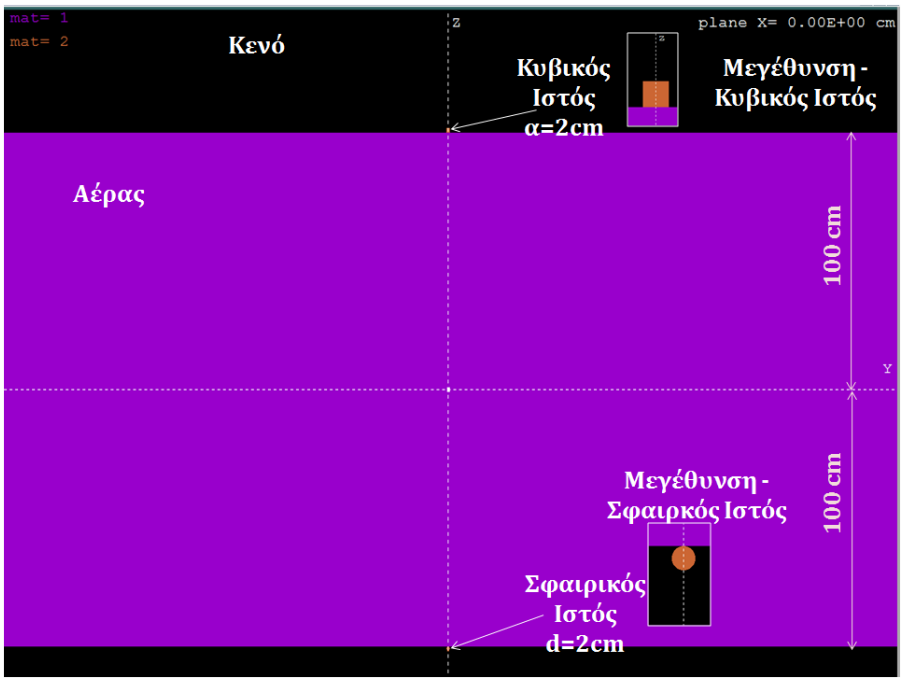
σε απόσταση 1 m από την πηγή. Ο υπολογισμός έγινε τόσο θεωρητικά, όσο και μέσω προσομοίωσης, με χρήση του κώδικά PENELOPE.

3.3.1.1. Υπολογισμός της δόσης μέσω του κώδικα PENELOPE

Ο υπολογισμός έγινε για δύο περιπτώσεις ανθρώπινου ιστού, (α) κυβικού σχήματος, ακμής 2cm, και (β) σφαιρικού σχήματος, διαμέτρου 2cm. Οι δύο ιστοί βρίσκονται σε απόσταση 100cm από την πηγή, αντιδιαμετρικά αυτής. Ο χώρος μεταξύ της πηγής και των ιστών πληρούται αέρα, υπό Κ.Σ. Η πηγή είναι τοποθετημένη στην αρχή του συστήματος των αξόνων, στο σημείο (0,0,0).

Στο τέλος του Κεφαλαίου, παρατίθεται το αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας application4.geo [Σχήμα 3.7].

Η γραφική απεικόνιση του αρχείου γεωμετρίας, η οποία παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.8, πραγματοποιείται με το πρόγραμμα gview2d, το οποίο παρέχεται μαζί με τον κώδικα PENELOPE. Στην απεικόνιση αυτή της γεωμετρίας του προβλήματος, με μωβ χρώμα παριστάνεται ο αέρας, που πληροί το χώρο μεταξύ της πηγής και του ιστού. Το πορτοκαλί χρώμα αντιστοιχεί στον ανθρώπινο ιστό, ενώ το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί στο κενό. Η πηγή της ακτινοβολίας εκπέμπει τα φωτόνια σφαιρικά και ισότροπα.



Σχήμα 3.8. Γραφική απεικόνιση αρχείο γεωμετρίας application4.geo.

Για τον υπολογισμό της δόσης χρησιμοποιούνται:

- Ανιχνευτής δόσης (Dose Enclosure), στην θέση όπου βρίσκεται ο ιστός κυβικού σχήματος, με τις ίδιες διαστάσεις που έχει ο ιστός.

- Ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας (Energy Deposition Detector), στην θέση όπου βρίσκεται ο ιστός κυβικού σχήματος, με τις ίδιες διαστάσεις που έχει ο ιστός.
- Ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας, στην θέση όπου βρίσκεται ο ιστός σφαιρικού σχήματος, με τις ίδιες διαστάσεις που έχει ο ιστός.

Η δόση στον ιστό υπολογίσθηκε:

- Με χρήση των αποτελεσμάτων των ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας
- Απευθείας, μέσω του ανιχνευτή δόσης

Για την περιγραφή του προβλήματος έχουν χρησιμοποιηθεί δύο υλικά, ο αέρας, που αναφέρεται ως material 1 και ο ανθρώπινος ιστός, που αναφέρεται ως material 2. Τα αρχεία δεδομένων των υλικών, στα οποία υπάρχουν τα στοιχεία των υλικών είναι το air.mat και το muscleequivalent.mat και έχουν προκύψει σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην § 3.2.1.1.

Το αρχείο υλικών που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα για την προσομοίωση είναι το totmat.mat, το οποίο περιέχει τα στοιχεία και των δύο υλικών. Το αρχείο αυτό προέκυψε από ενοποίηση των παραπάνω δύο αρχείων με χρήση της εντολής:

>copy air.mat+ muscleequivalent.mat totmat.mat

Το αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης, με όνομα application4.in, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9, στο τέλος του Κεφαλαίου.

Η προσομοίωση έγινε με εκτέλεση της εντολής:

>penmain.exe<application4.in

Η διάρκεια προσομοίωσης ήταν 1.414709E+05sec* και προσομοιώθηκαν συνολικά 6.724256E+08 ιστορίες (φωτόνια). Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρήχθησαν μία σειρά από αρχεία αποτελεσμάτων. Τα αρχεία τα οποία παρέχουν πληροφορίες για τον υπολογισμό της δόσης, σύμφωνα με όσα έχουν γραφεί στις § 3.2.1.3.β και § 3.2.1.3.γ, είναι τα:

- pm_spc_enddet_1.dat (αρχείο αποτιθέμενης ενέργειας στον ανιχνευτή κυβικού σχήματος ακμής 2cm)

* Οι χρόνοι αναφέρονται σε Η/Υ τύπου Genuine Intel(R), 1.60GHz, 1.00GB RAM.

- pm_spc_enddet_2.dat (αρχείο αποτιθέμενης ενέργειας στον ανιχνευτή σφαιρικού σχήματος ακτίνας 1cm)

- pm_2d_dose.dat ή pm_3d_dose.dat, τα οποία, στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

3.3.1.1.α. Άμεσος προσδιορισμός μέσω του Ανιχνευτή Δόσης (Dose Enclosure)

Από το αρχείο του ανιχνευτή δόσης λαμβάνεται η τιμή της δόσης ανά φωτόνιο σε αυτόν τον ανιχνευτή, από το αρχείο εξόδου pm_3d_dose.dat [Σχήμα 3.10 στο τέλος του Κεφαλαίου] η οποία προκύπτει ίση με:

D_{DE} = 1.45668E-01 ± 8.2E-03 (eV/(g·φωτόνιο)) (±5.6% σε 1σ)

3.3.1.1.β. Έμμεσος Υπολογισμός μέσω του Ανιχνευτή Αποτιθέμενης Ενέργειας (Energy Deposition Detector)

Ο έμμεσος υπολογισμός της δόσης, μέσω του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, γίνεται από τα αποτελέσματα που δίνονται στον βασικό αρχείο αποτελεσμάτων penmain.dat για τους δύο ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας. Οι τιμές της αποτιθέμενης ενέργειας στους δύο ανιχνευτές μπορεί εύκολα να επιβεβαιωθούν από τα αναλυτικά δεδομένα που παρατίθενται στα αρχεία pm_spc_enddet_1.dat και pm_spc_enddet_2.dat [Παράρτημα 3].

Όσον αφορά στα αποτελέσματα που δίνονται στο πρόγραμμα penmain.dat, όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.11, στο τέλος του Κεφαλαίου, η ανηγμένη ανά φωτόνιο συνολική ενέργεια που αποτίθεται σε κάθε έναν από τους δύο ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας είναι:

- **E_1 = 1.294 ± 0.073 eV/φωτόνιο** στον ανιχνευτή 1 (κυβικός, ακμής 2cm)

- **E_2 = 0.725 ± 0.054 eV/φωτόνιο** στον ανιχνευτή 2 (σφαιρικός, ακτίνας 1cm)

Η δόση (ανηγμένη ανά φωτόνιο) υπολογίζεται ως αποτιθέμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας του απορροφητή (που ταυτίζεται με τον ανιχνευτή):

$$D = \frac{E}{m} \quad (3.1)$$

όπου

- m: η μάζα του απορροφητή-ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.

Ισχύει m=ρ×V, με ρ=1.11g/cm^3, για ισοδύναμο ανθρώπινου μυός.

Οι μάζες των δύο ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας είναι:

- Για τον κυβικό ανιχνευτή (1), με ακμή α=2cm και όγκο V=α^3=8cm^3, υπολογίζεται m=1.11×8 ⇒ **m=8.88g**
- Για το σφαιρικό ανιχνευτή (2), με ακτίνα r=1cm και όγκο V=4πr^3/3=4.18879cm^3, υπολογίζεται m=1.11×4.18879 ⇒ **m=4.6496g**

Πραγματοποιώντας τους απαιτούμενους υπολογισμούς προκύπτουν τελικά:

D_1 = 1.45639E-01 ± 5.6% σε (eV/(g·φωτόνιο))

D_2 = 1.55869E-01 ± 7.4% σε (eV/(g·φωτόνιο))

3.3.1.2. Θεωρητικός υπολογισμός

Καθώς για τον υπολογισμό της δόσης κατά την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν στοιχειώδεις όγκοι ιστού τοποθετημένοι σε απόσταση 1m από την πηγή (π.χ. σφαίρα ακτίνας 1cm), ο θεωρητικός υπολογισμός της δόσης έγινε στο κέντρο του στοιχειώδους όγκου (1m+1cm). Επιπλέον, προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων (θεωρητικών και προσομοίωσης), η δόση που υπολογίζεται είναι ανηγμένη ανά φωτόνιο που εκπέμπεται από την πηγή. Η απορροφώμενη δόση ανά εκπεμπόμενο από την πηγή φωτόνιο υπολογίζεται από την σχέση (2.3):

$$D = \frac{1}{4\pi R^2} \times E_\gamma \times e^{-\mu_{air} d_{air}} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{\rho}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \quad \text{(eV/(g·φωτόνιο))}$$

όπου:

- E_γ = 600 keV *ή* E_γ = 600000 eV (καθώς στη σχέση απαιτείται η εισαγωγή της ενέργειας σε eV)
- R = 100 cm (αέρας) + 1 cm (ιστός) *ή* R = 101 cm
- d_{air} = 100 cm

- $\mu_{air}^{600keV} = (\mu/\rho)_{air}^{600keV} \times \rho_{air} = 0.08055\ cm^2/g \times 1.20479\times10^{-3}\ g/cm^3 \Rightarrow \mu_{air}^{600keV} = 9.7\times10^{-5}\ cm^{-1}$

- $(\mu_a/\rho)_{\iota\sigma\tau o\acute{\upsilon}}^{600keV} = 0.03254\ cm^2/g$

Επομένως, αντικαθιστώντας τα δεδομένα μας στην προηγούμενη σχέση, προκύπτει τελικά:

$$D_\theta = 1.50835E\text{-}01\ (eV/(g\cdot\text{φωτόνιο}))$$

Η παραπάνω εκτίμηση της δόσης δεν συνοδεύεται από αβεβαιότητα, καθώς οι αβεβαιότητες των μεγεθών που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της, θεωρούνται αμελητέες, σε σχέση με αυτές των αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

3.3.1.3. Σύγκριση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι τιμές που προέκυψαν.

Τρόπος υπολογισμού της Δόσης	Δόση ± (% σφάλμα σε 1σ) (eV/(g·φωτόνιο))	Απόκλιση (%) από θεωρητική τιμή
Θεωρητικός Υπολογισμός	D_θ = 0.151	-
Ανιχνευτής Δόσης	D_{DE} = 0.146 ± 5.6%	-3.3%
Ανιχνευτής Αποτιθέμενης Ενέργειας - Κύβος	D_1 = 0.146 ± 5.6%	-3.3%
Ανιχνευτής Αποτιθέμενης Ενέργειας - Σφαίρα	D_2 = 0.156 ± 7.4%	+3.3%

Πίνακας 3.1. Απορροφώμενη ανά φωτόνιο δόση από τις τρεις μεθόδους.

Από τον Πίνακα 3.1, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ της θεωρητικής τιμής της δόσης και της τιμής της δόσης που υπολογίζεται από την προσομοίωση. Αυτό ισχύει, ανεξάρτητα από ποια μεθοδολογία υπολογισμού της δόσης λόγω προσομοίωσης χρησιμοποιείται.

- Η δόση που υπολογίζεται μέσω ανιχνευτή δόσης είναι ταυτόσημη με αυτή που υπολογίζεται μέσω του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, κάτι που είναι αναμενόμενο.

- Οι δόσεις που υπολογίζονται μέσω των δύο ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά (απόκλιση 6.6% με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες 5.6% και 7.4%).

- Η αβεβαιότητα της δόσης που εκτιμάται από τον σφαιρικό ανιχνευτή είναι υψηλότερη από την αβεβαιότητα της δόσης που εκτιμάται από τον κυβικό ανιχνευτή. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο σφαιρικός ανιχνευτής έχει μικρότερο όγκο και το πλήθος των φωτονίων που αλληλεπιδρούν με αυτόν είναι μικρότερο, με συνέπεια την χειρότερη στατιστική.

3.4. Μελέτη της εξάρτησης της εκτιμούμενης δόσης από την ακτίνα της δισκοειδούς πηγής

Δεδομένου ότι τελικός στόχος της ΔΕ ήταν η εκτίμηση της απορροφώμενης δόσης σε ένα σημείο εξαιτίας πηγής όγκου μεγάλων διαστάσεων, το επόμενο βήμα που έγινε προς την κατεύθυνση αυτή ήταν ο υπολογισμός της δόσης εξαιτίας επιφανειακής πηγής μεγάλων διαστάσεων. Για το σκοπό αυτό έγιναν μία σειρά από προσομοιώσεις με επιφανειακή πηγή, κυκλικού σχήματος, για διάφορες τιμές της ακτίνας. Σε κάθε περίπτωση, η δόση υπολογίζεται σε ένα στοιχειώδη όγκο, που βρίσκεται σε ύψος ένα μέτρο, επί του άξονα συμμετρίας της πηγής. Στόχος των προσομοιώσεων αυτών ήταν να διερευνηθεί η επίδραση που έχουν τα φωτόνια τα οποία εκπέμπονται από μακρινά σημεία - κοντά στην περιφέρεια της δισκοειδούς πηγής - στη συνολική δόση εξαιτίας της πηγής.

3.4.1. Τροποποίηση του κώδικα χρήστη PENMAIN για δισκοειδή πηγή φωτονίων

Καθώς στον κώδικα χρήστη PENMAIN η πηγή που εκπέμπει τα πρωτογενή σωματίδια ορίζεται ως σημειακή σε συγκεκριμένη θέση, απαιτήθηκε τροποποίηση του κώδικα, ώστε να δημιουργηθεί επιφανειακή πηγή, στην οποία τα φωτόνια εκπέμπονται από τυχαία κάθε φορά θέση. Η τροποποίηση αυτή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην ΔΕ του Αθανασίου (2006).

Στο Σχήμα 3.12, στο τέλος του Κεφαλαίου, παρουσιάζεται το τμήμα του κώδικα το οποίο πρέπει να τροποποιηθεί. Όπως φαίνεται, στον αρχικό κώδικα, η αρχική θέση του πρωτογενούς σωματιδίου ταυτίζεται με την θέση της σημειακής πηγής, δηλαδή X=SX0, Y=SY0 και Z=SZ0. Στην περίπτωση της δισκοειδούς πηγής αυτό παύει να ισχύει και πρέπει να εφαρμοστεί

δειγματοληπτική μέθοδος. Αφού η δισκοειδής πηγή έχει συγκεκριμένη ακτίνα και επιφάνεια, η αρχική θέση του σωματιδίου μπορεί να είναι οπουδήποτε εντός της επιφάνειας της πηγής και δεν μπορεί να είναι προκαθορισμένη. Επομένως, θα πρέπει αυτή να καθορίζεται με τυχαίο τρόπο, πάντα εντός των ορίων της επιφάνειας της πηγής.

Στο Σχήμα 3.13, στο τέλος του Κεφαλαίου, φαίνεται το αντίστοιχο τροποποιημένο τμήμα του κώδικα PENMAIN, το οποίο καλούμε DPENMAIN, στο οποίο η αρχική θέση του φωτονίου (για την περίπτωσή της παρούσας ΔΕ) ή σωματιδίου (γενικά) προκύπτει με χρήση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών εντός των ορίων δισκοειδούς πηγής φωτονίων ακτίνας 1m. Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την τροποποίηση του κώδικα είναι η ακόλουθη:

- Αρχικά, καθορίζεται η συντεταγμένη X της τυχαίας θέσης του φωτονίου, μέσω της γεννήτριας τυχαίων αριθμών RAND, η οποία επιστρέφει τιμές από 0 έως 1.
- Πολλαπλασιάζοντας την τυχαία τιμή της γεννήτριας με την ποσότητα 100, που αποτελεί την ακτίνα της πηγής (cm), προκύπτει η τετμημένη X, που τελικά λαμβάνει τιμή από 0 έως 100.
- Με ανάλογο τρόπο, καθορίζεται η τεταγμένη Y της θέσης του φωτονίου.
- Στην συνέχεια, υπολογίζονται οι ποσότητες RR2 (για την συγκεκριμένη περίπτωση 1) που είναι το τετράγωνο της ακτίνας της πηγής και RRT, ίση με το άθροισμα των τετραγώνων των συντεταγμένων X και Y.
- Η RRT πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από την RR2, ώστε η θέση του φωτονίου να βρίσκεται εντός του δίσκου. Σε περίπτωση που η RRT είναι μεγαλύτερη από την RR2, με χρήση νέας τυχαίας δειγματοληψίας ορίζονται νέα X και Y και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία, μέχρι να ισχύει η πιο πάνω ανισότητα.
- Η θέση της πηγής ορίζεται σταθερή από το επίπεδο Z=0.
- Τέλος, ορίζονται οι μεταβλητές BX και BY, οι οποίες λαμβάνουν τιμές από 0 έως 1. Σε περίπτωση που η BX (ή BY) λάβει τιμή μεγαλύτερη από 0.5, τότε η τιμή της συντεταγμένης X (ή Y) γίνεται αρνητική, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η τιμή της συντεταγμένης X (ή Y) παραμένει θετική. Με αυτόν

τον τρόπο, λαμβάνονται υπόψη και τα τέσσερα τεταρτημόρια του κυκλικού δίσκου.

Με αυτό το τμήμα του κώδικα χρήστη [Σχήμα 3.13] επιλέγεται κατά τυχαίο τρόπο η θέση, μέσα στην δισκοειδή πηγή, από την οποία εκπέμπεται το υπόψη φωτόνιο.

3.4.1.1. Έλεγχος της τυχαιότητας του σημείου εκπομπής φωτονίων της επίπεδης πηγής

Με στόχο τον έλεγχο της τυχαιότητας του σημείου εκπομπής φωτονίων της επίπεδης πηγής που γίνεται με την παραπάνω διαδικασία, στις πρώτες δοκιμές χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα χρήστη και σειρά εντολών μέσω της οποίας γινόταν καταγραφή των θέσεων δειγματοληψίας σε ειδικό αρχείο. Στο Σχήμα 3.14, στο τέλος του Κεφαλαίου, παρατίθεται η σειρά αυτή εντολών. Στο τμήμα αυτό του κώδικα, επιλέγονται 10000 θέσεις πάνω στη δισκοειδή πηγή και αποθηκεύονται οι (X,Y) συντεταγμένες της κάθε θέσης στο αρχείο random.dat. Με κατάλληλο πρόγραμμα, λαμβάνονται τα σημεία που προκύπτουν, με μορφή διαγράμματος, για να διαπιστωθεί αν υπάρχει όντως ομοιόμορφη κατανομή των θέσεων. Εφόσον πρόκειται για επιφανειακό δίσκο, ακολουθεί το διάγραμμα των θέσεων στο επίπεδο X-Y, Z=0. Όπως διαπιστώνεται από την απεικόνιση του Σχήματος 3.15, υπάρχει ικανοποιητική ομοιομορφία των θέσεων των σωματιδίων.

3.4.2. Υπολογισμός δόσης εξαιτίας δισκοειδούς πηγής, με χρήση του κώδικα PENELOPE, για διάφορες ακτίνες της πηγής

Για να ελεγχθεί η εξάρτηση της δόσης, όπως αυτή προκύπτει από τον κώδικα προσομοίωσης PENELOPE, από την ακτίνα της δισκοειδούς πηγής, πραγματοποιήθηκε σειρά προσομοιώσεων με διαφορετικές τιμές της ακτίνας της δισκοειδούς πηγής. Το αρχείο εισόδου των δεδομένων .in και το αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας .geo παραμένουν αμετάβλητα, ενώ για κάθε νέα ακτίνα τροποποιείται ο κώδικας χρήστη PENMAIN, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο τροποποιημένος κώδικας, ονομάζεται DPENMAIN, και το εκτελέσιμο αρχείο dpenmain.exe.

Το πρόβλημα που μελετάται στην παράγραφο αυτή είναι ο υπολογισμός της δόσης εξαιτίας ισότροπης δισκοειδούς πηγής φωτονίων ενέργειας 660 keV, η οποία εκπέμπει φωτόνια ισότροπα σφαιρικά, στην διάταξη που περιγράφηκε στην § 3.3.1, όπου υπολογίζεται η δόση για δύο περιπτώσεις ανθρώπινου ιστού,

(α) κυβικού σχήματος, ακμής 2cm, και (β) σφαιρικού σχήματος, διαμέτρου 2cm. Οι δύο ιστοί βρίσκονται σε απόσταση 100cm από την πηγή, αντιδιαμετρικά αυτής. Ο χώρος μεταξύ πηγής και των ιστών πληρούται αέρα, υπό Κ.Σ. Η δισκοειδής πηγή είναι τοποθετημένη στο επίπεδο Z=0 και το κέντρο του δίσκου ταυτίζεται με την αρχή του συστήματος των αξόνων (0,0,0). Η πηγή ορίζεται στον τροποποιημένο κώδικα DPENMAIN.

Το αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης, με όνομα disc.in αποτελεί τροποποίηση του αρχείου application4.in, το οποίο χρησιμοποιήσαμε στην περίπτωση της σημειακής πηγής, για ενέργεια 660 keV και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16, στο τέλος του Κεφαλαίου. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι στο αρχείο εισόδου disc.in είναι δυνατόν να ορισθεί η ημιγωνία της δέσμης και, συνεπώς, η γωνία μέσα στην οποία εκπέμπεται ένα φωτόνιο από μία θέση. Ημιγωνία δέσμης 90^0 αντιστοιχεί σε γεωμετρία 2π, ενώ ημιγωνία δέσμης 180^0 αντιστοιχεί σε γεωμετρία 4π. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την ταχύτερη εκτέλεση του κώδικα για ορισμένες γεωμετρίες. Πάντως, επιλογή ημιγωνίας δέσμης διαφορετικής των 180^0 πρέπει να γίνεται προσεκτικά και συνεπάγεται επιπλέον υπολογισμούς κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Ωστόσο, η διάταξη του προβλήματός μας απαιτεί ημιγωνία δέσμης 180^0, αφού οι ανιχνευτές είναι τοποθετημένοι αντιδιαμετρικά της πηγής.

Στη θέση όπου βρίσκεται ο ιστός κυβικού σχήματος ορίζεται ανιχνευτής δόσης (Dose Enclosure), με τις ίδιες διαστάσεις που έχει ο ιστός και ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας (Energy Deposition Detector), επίσης με τις ίδιες διαστάσεις του ιστού, ενώ στην θέση όπου βρίσκεται ο ιστός σφαιρικού σχήματος ορίζεται μόνον ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας, με τις διαστάσεις του ιστού. Το αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.17 στο τέλος του Κεφαλαίου και είναι ακριβώς ίδιο με το αρχείο application4.geo, ενώ η γραφική απεικόνιση του αρχείου γεωμετρίας παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.8 (§ 3.3.1.2).

Για την περιγραφή του προβλήματος έχουν χρησιμοποιηθεί δύο υλικά, ο αέρας, που αναφέρεται ως material 1 και ο ανθρώπινος ιστός, που αναφέρεται ως material 2. Τα αρχεία δεδομένων των υλικών, στα οποία υπάρχουν τα στοιχεία των υλικών είναι το air.mat και το tissue.mat και έχουν προκύψει σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην § 3.2.1.1. Το αρχείο υλικών που

χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα για την προσομοίωση είναι το air_tissue.mat, το οποίο περιέχει τα στοιχεία και των δύο υλικών. Το αρχείο αυτό προέκυψε από ενοποίηση των παραπάνω δύο αρχείων με χρήση της εντολής:

>copy air.mat+ tissue.mat air_tissue.mat

Η προσομοίωση έγινε με εκτέλεση της εντολής:

>dpenmain.exe<disc.in

Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρήχθησαν μία σειρά από αρχεία αποτελεσμάτων. Στον ακόλουθο Πίνακα 3.2, παρουσιάζονται οι πληροφορίες και τα αποτελέσματα από τα αρχεία εξόδου των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, όπου D_{DE} καλείται η δόση που προκύπτει από τον ανιχνευτή δόσης, συνοδευόμενη από τις αντίστοιχες αβεβαιότητες, D_1 η δόση που προκύπτει από τον κυβικό ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας και D_2 η δόση του σφαιρικού ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.

Ακτίνα Δίσκου (m)	**Διάρκεια Προσομοίωσης (sec)***	**Αριθμός Ιστοριών**	**D_{DE} (eV/(g·φωτόνιο))**	**Αβεβαιότητα (1σ) (%)**	**D_1 (eV/(g·φωτόνιο))**	**D_2 (eV/(g·φωτόνιο))**
1	2.62E+04	5.50E+08	1.15E-01	2.62	1.15E-01	1.13E-01
2	6.49E+04	1.37E+09	6.40E-02	2.19	6.40E-02	6.16E-02
3	6.47E+04	1.09E+09	4.13E-02	3.07	4.13E-02	4.10E-02
4	1.04E+05	2.19E+09	2.78E-02	2.64	2.78E-02	2.79E-02
5	9.70E+04	1.64E+09	2.16E-02	3.40	2.16E-02	2.29E-02
6	8.06E+04	1.70E+09	1.66E-02	4.02	1.66E-02	1.68E-02
7	8.67E+04	1.46E+09	1.25E-02	4.81	1.25E-02	1.24E-02
8	9.00E+04	1.89E+09	9.92E-03	4.72	9.92E-03	9.38E-03
9	1.73E+05	2.93E+09	8.40E-03	3.97	8.40E-03	8.88E-03
10	1.55E+05	3.26E+09	6.79E-03	4.39	6.79E-03	6.92E-03

Πίνακας 3.2. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τον προσδιορισμό της εξάρτησης της δόσης ανά φωτόνιο από την ακτίνα της δισκοειδούς πηγής.

Επισημαίνεται ότι, όπου αναφέρεται η τιμή της δόσης, όπως αυτή προκύπτει από τον κώδικα προσομοίωσης, πρόκειται για την τιμή που προκύπτει από τον ανιχνευτή δόσης του κώδικα. Ο υπολογισμός της δόσης ανά εκπεμπόμενο φωτόνιο μέσω των ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας

* Οι χρόνοι αναφέρονται σε Η/Υ τύπου Genuine Intel(R), 1.60GHz, 1.00GB RAM.

πραγματοποιήθηκε, σύμφωνα με όσα αναφέραμε στην § 3.3.1.2.β, με εφαρμογή της σχέσης (3.1):

$$D = \frac{E}{m}$$

όπου:

- m: η μάζα του απορροφητή-ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, για την οποία ισχύει $m=\rho\times V$, με $\rho=1.00 g/cm^3$, για μαλακό ιστό (ICRP).

Οι μάζες των δύο ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας είναι:

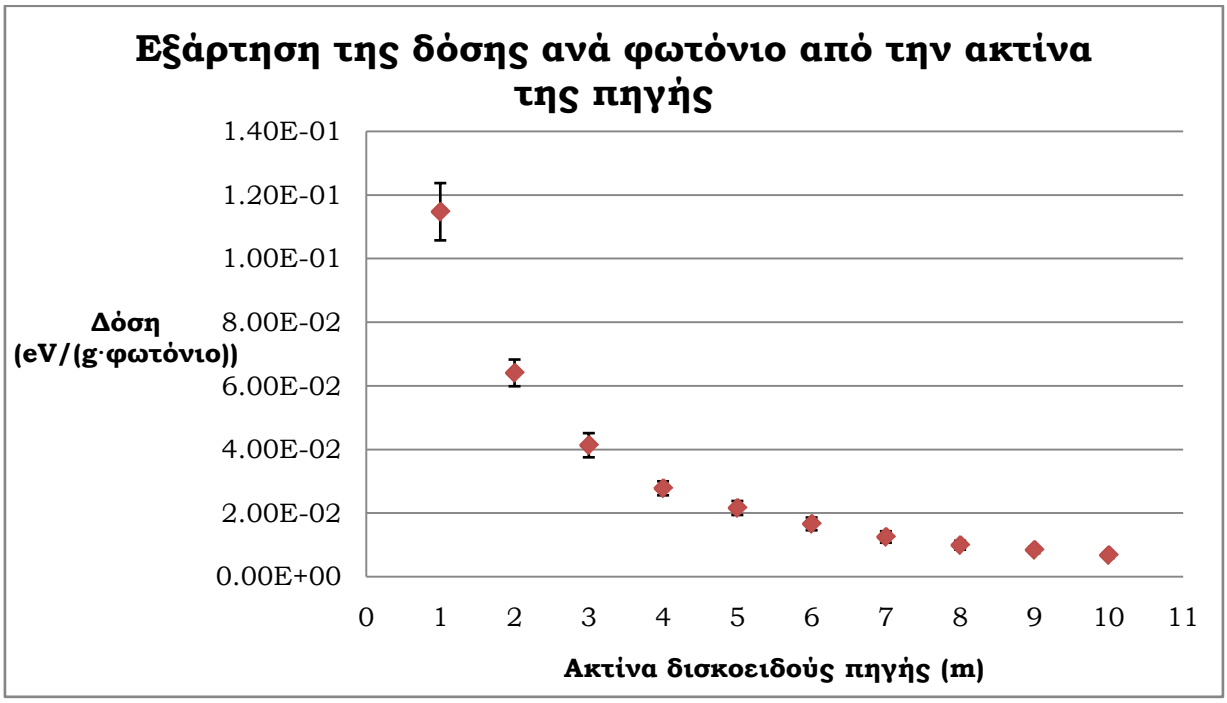
- Για τον κυβικό ανιχνευτή (1), με ακμή $a=2cm$ και όγκο $V=a^3=8cm^3$, υπολογίζεται $m=1.0\times 8 \Rightarrow$ **m=8.00g**
- Για το σφαιρικό ανιχνευτή (2), με ακτίνα $r=1cm$ και όγκο $V=4\pi r^3/3=4.18879cm^3$, υπολογίζεται $m=1.0\times 4.18879 \Rightarrow$ **m=4.18879g**

Από τον Πίνακα 3.2, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η δόση που υπολογίζεται μέσω ανιχνευτή δόσης είναι ταυτόσημη με αυτή που υπολογίζεται μέσω του αντίστοιχου ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, κάτι που είναι αναμενόμενο.
- Οι δόσεις που υπολογίζονται μέσω των δύο ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. (Η μέγιστη απόκλιση εμφανίζεται στην προσομοίωση δισκοειδούς πηγής ακτίνας 5 m και υπολογίζεται ίση με 6.05%, ενώ η αντίστοιχη αβεβαιότητα είναι 3.40%, σε επίπεδο 1σ.).
- Η αβεβαιότητα της δόσης που εκτιμάται από τον σφαιρικό ανιχνευτή είναι υψηλότερη από την αβεβαιότητα της δόσης που εκτιμάται από τον κυβικό ανιχνευτή. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο σφαιρικός ανιχνευτής έχει μικρότερο όγκο και το πλήθος των φωτονίων που αλληλεπιδρούν με αυτόν είναι μικρότερο, με συνέπεια την χειρότερη στατιστική.

Στο Σχήμα 3.18 που ακολουθεί, απεικονίζεται η εξάρτηση της δόσης ανά εκπεμπόμενο φωτόνιο, όπως προέκυψε από το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή δόσης του κώδικα προσομοίωσης, από την ακτίνα της δισκοειδούς πηγής.



Σχήμα 3.18. Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της δόσης ανά εκπεμπόμενο φωτόνιο από την ακτίνα της δισκοειδούς πηγής.

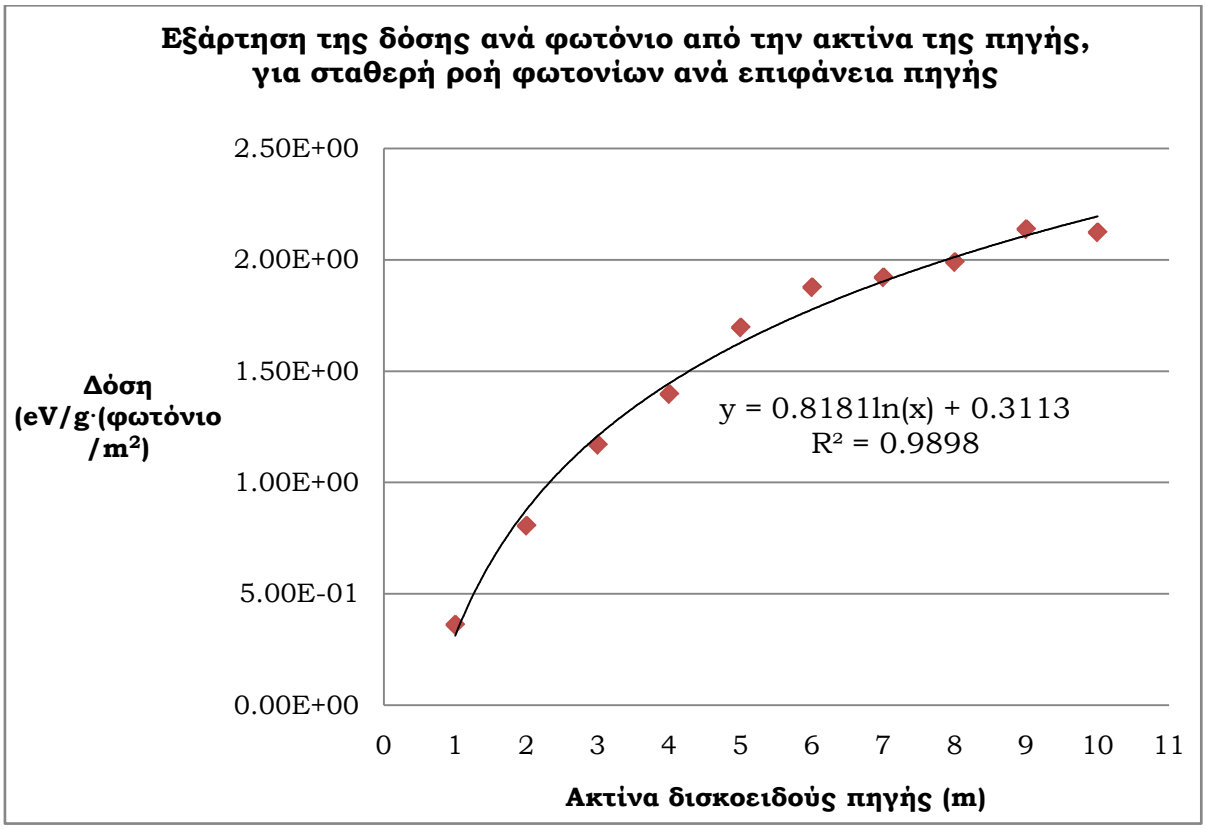
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

- Η ανηγμένη ανά εκπεμπόμενο φωτόνιο δόση εμφανίζεται να αποτελεί γνησίως φθίνουσα συνάρτηση της ακτίνας της δισκοειδούς πηγής φωτονίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δόση ανά φωτόνιο, όπως προκύπτει από την προσομοίωση, εξαρτάται από την επιφάνεια της πηγής. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια της πηγής, τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα ένα εκπεμπόμενο από αυτήν φωτόνιο να συνεισφέρει σε δόση στο συγκεκριμένο σημείο και κατά συνέπεια τόσο μικρότερη η δόση ανά φωτόνιο. Έτσι, για να μπορεί να γίνει σύγκριση των δόσεων (συνολικών & όχι ανά φωτόνιο) για δίσκους με διαφορετικές ακτίνες, πρέπει να γίνει αναγωγή σε σταθερή ροή φωτονίων ανά επιφάνεια πηγής (φωτόνια/μονάδα επιφάνειας πηγής). Για τον λόγο αυτό, πολλαπλασιάζεται η τιμή της δόσης ανά φωτόνιο με την επιφάνεια της πηγής. Τελικά, μετά από τον υπολογισμό αυτό προκύπτουν οι τιμές της δόσης, όπως αυτές παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.3. Η γραφική απεικόνιση της εξάρτησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.19, όπου

στις τιμές της δόσης ανά φωτόνιο, όπως υπολογίσθηκαν, προσαρμόσθηκε μία λογαριθμική συνάρτηση, σύμφωνα με όσα προβλέπει η βιβλιογραφία [Παράρτημα4].

Ακτίνα Δίσκου (m)	Δόση κώδικα (eV/(g·φωτόνιο))	Εμβαδόν Δισκοειδούς Πηγής (m²)	Ανηγμένη Δόση (eV/(g·(φωτόνιο/m²))
1	1.15E-01	3.14	**3.60E-01**
2	6.40E-02	12.57	**8.05E-01**
3	4.13E-02	28.27	**1.17E+00**
4	2.78E-02	50.27	**1.40E+00**
5	2.16E-02	78.54	**1.70E+00**
6	1.66E-02	113.10	**1.88E+00**
7	1.25E-02	153.94	**1.92E+00**
8	9.92E-03	201.06	**1.99E+00**
9	8.40E-03	254.47	**2.14E+00**
10	6.79E-03	314.16	**2.12E+00**

Πίνακας 3.3. Δόση λόγω της δισκοειδούς πηγής σε eV/(g·(φωτόνιο/m²)).



Σχήμα 3.19. Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης του ρυθμού δόσης σε eV/(g·(φωτόνιο/m²)), συναρτήσει της επιφάνειας της δισκοειδούς πηγής.

3.4.3. Θεωρητικός υπολογισμός δόσης εξαιτίας δισκοειδούς πηγής

Προκειμένου να επαληθευθούν οι τιμές δόσης που προκύπτουν από τα αρχεία εξόδου του ανιχνευτή δόσης, εφαρμόζεται, για τα δεδομένα του προβλήματος που εξετάσθηκε στην προηγούμενη παράγραφο και για τον κυβικό ανιχνευτή δόσης, η θεωρητική σχέση υπολογισμού της δόσης ανά φωτόνιο, εξαιτίας δισκοειδούς πηγής φωτονίων (2.4):

$$D = \frac{E_\gamma}{2A} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times \int_0^R \frac{e^{-\mu_{air}\sqrt{d_2^2+r^2}}}{(d_1+d_2)^2+r^2} \times r \times dr \quad \text{(eV/(g·φωτόνιο))}$$

Στην παραπάνω σχέση υπολογισμού της δόσης (2.4), είναι:

- E_γ = 660000 eV
- R: η ακτίνα της δισκοειδούς πηγής (cm)
- A = πR^2 : η επιφάνεια της πηγής, για την κάθε ακτίνα (cm^2)
- $\mu_{air}^{600keV} = 9.7\times10^{-5}\ cm^{-1}$
- $(\mu_\alpha/\rho)_{tissue}^{660} = 3.2306\times10^{-2}\ cm^2/g$
- d_1 = 1 cm
- d_2 = 100 cm

Υπολογίζεται αναλυτικά το γινόμενο των σταθερών όρων της σχέσης και, στην συνέχεια, με χρήση κατάλληλου υπολογιστικού προγράμματος (Mathcad 14), υπολογίζουμε το ολοκλήρωμα. Έτσι, προκύπτει, τελικά η τιμή της ανά φωτόνιο δόσης, για κάθε δισκοειδή πηγή, διαφορετικής ακτίνας.

Οι θεωρητικές αυτές τιμές δόσης, οι τιμές δόσης όπως προκύπτουν από τον κώδικα προσομοίωσης, συνοδευόμενες από τις αντίστοιχες αβεβαιότητες σε επίπεδο 1σ, καθώς και οι αποκλίσεις των τιμών δόσης της προσομοίωσης από τα θεωρητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα [Πίνακας 3.4].

Ακτίνα Δίσκου (m)	Δόση κώδικα (eV/(g·φωτόνιο))	Αβεβαιότητα (1σ) (%)	Θεωρητική Δόση (eV/(g·φωτόνιο))	Απόκλιση (%)
1	1.15E-01	2.62	1.15E-01	-0.009%
2	6.40E-02	2.19	6.66E-02	3.828%
3	4.13E-02	3.07	4.23E-02	2.336%
4	2.78E-02	2.64	2.92E-02	5.039%
5	2.16E-02	3.40	2.15E-02	-0.522%
6	1.66E-02	4.02	1.65E-02	-0.614%
7	1.25E-02	4.81	1.31E-02	4.732%
8	9.92E-03	4.72	1.07E-02	7.100%
9	8.40E-03	3.97	8.88E-03	5.449%
10	6.79E-03	4.39	7.52E-03	10.106%

Πίνακας 3.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογισμού δόσης.

Από τον Πίνακα 3.4. προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ της θεωρητικών τιμών δόσης, που προκύπτουν από την εφαρμογή της θεωρητικής σχέσης (2.4) για κάθε ακτίνα δισκοειδούς πηγής και των τιμής της δόσης που υπολογίζονται από την προσομοίωση.

- Τόσο ο ανιχνευτής δόσης όσο και ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της δόσης με ικανοποιητική ακρίβεια σε πιο πολύπλοκα προβλήματα [Πίνακες 3.1, 3.2 και 3.4].

- Ο ρυθμός δόσης ως συνάρτηση της ακτίνας της δισκοειδούς πηγής τείνει ασυμπτωτικά σε σταθερή τιμήόσο μεγαλώνει η ακτίνα της πηγής, κάτι που είναι αναμενόμενο. Από το γράφημα του Σχήματος 3.19 εκτιμάται ότι για μία επιφανειακή πηγή απείρων διαστάσεων περί το 90% της δόσης σε ύψος 1m πάνω από έδαφος οφείλεται στα φωτόνια που προέρχονται από το δισκοειδές τμήμα της πηγής ακτίνας περί τα 10m.

```
TITLE   Response of a NaI scintillation detector.

        >>>>>>>> Source definition.
SKPAR   2         [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG  1.25e6            [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 -10                            [Coordinates of the source]
SDIREC  0 0                        [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT  10                                       [Beam aperture, in deg]

        >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT    3                      [Number of different materials, .le.10]
SIMPAR  1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

        The following material data file must be copied from directory
        ..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME  welld.mat                  [Material definition file, 20 chars]

        >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  detector.geo               [Geometry definition file, 20 chars]

        >>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 1.3e6 100                [E-interval and no. of energy bins]
NBTH    45                      [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH    18                    [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

        >>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET  1e3 1.3e6 100            [Energy window and number of channels]
EDBODY  1                         [Active body; one line for each body]

        >>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat                [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat                   [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60                                     [Dumping period, in sec]

TIME    2.0e5                        [Allotted simulation time, in sec]
```

Τίτλος αρχείου εισόδου

Περιγραφή της πηγής

Παράμετροι τέλους προσομοίωσης

Ορισμός του αρχείου .mat

Ορισμός του αρχείου .geo

Ορισμός ανιχνευτών του προβλήματος

Παράμετροι τέλους προσομοίωσης προβλήματος

Σχήμα 3.1. Δομή αρχείου εισόδου .in, για τον κώδικα χρήστη PENMAIN.

```
>>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).

ENDDET 1.5e2 200e3 500   [E-window and num of channels]

EDSPC  pm_spc_enddet_1.dat

EDBODY 2          [Active body; one line for each body]
```

Σχήμα 3.2. Ορισμός ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας στο αρχείο .in.

```
>>>>>>>> Dose distribution.

GRIDX  -0.005 0.005

GRIDY  -0.005 0.005

GRIDZ  200 200.001

GRIDBN 10 10 10
```

Σχήμα 3.3. Ορισμός ανιχνευτή δόσης στο αρχείο .in.

```
                    ************************************
                    **   Program PENMAIN. Results.    **
                    ************************************

Simulation time ..........................  1.474607E+05 sec
Simulation speed .........................  3.674119E+02 showers/sec


Simulated primary showers ...............  5.417880E+07

Transmitted primary particles ...........  1.301741E+07
Backscattered primary particles .........  2.297163E+07
Absorbed primary particles ..............  1.818976E+07

Fractional transmission ............  2.405678E-01 +- 1.8E-04
Fractional backscattering ..........  4.254944E-01 +- 2.2E-04
Fractional absorption ..............  3.357358E-01 +- 1.9E-04

Secondary-particle generation probabilities:
                 ---------------------------------------------
                 |  electrons   |   photons    |  positrons   |
-------------------------------------------------------------
|  transmitted  | 3.630571E-04 | 3.001543E-04 | 0.000000E+00 |
|               |  +- 7.8E-06  |  +- 7.1E-06  |  +- 0.0E+00  |
-------------------------------------------------------------
| backscattered | 6.262652E-03 | 1.497818E-03 | 0.000000E+00 |
|               |  +- 3.3E-05  |  +- 1.6E-05  |  +- 0.0E+00  |
-------------------------------------------------------------
|   absorbed    | 7.177565E+00 | 2.712391E-01 | 0.000000E+00 |
|               |  +- 1.6E-03  |  +- 2.2E-04  |  +- 0.0E+00  |
-------------------------------------------------------------

Average deposited energies (bodies):
   Body    1 ......  4.682011E+05 +- 8.0E+01 eV    (effic. = 2.11E+03)
   Body    2 ......  4.527319E+02 +- 3.8E+00 eV    (effic. = 8.49E-01)
   Body    3 ......  6.792233E-01 +- 2.0E-01 eV    (effic. = 6.85E-04)

Average deposited energies (energy detectors):
   Detector # 1 ...  6.792233E-01 +- 2.0E-01 eV    (effic. = 6.85E-04)

   Maximum dose ...  1.020812E-03 +- 3.0E-04 eV/g  (effic. = 6.85E-04)

Last random seeds = 1493882332 , 1792621677

-------------------------------------------------------------------
```

Σχήμα 3.4. Δομή δεύτερου τμήματος αρχείου εξόδου penmain.dat.

```
#  Results from PENMAIN. Output from energy deposition detector #  1
#  1st column: deposited energy (eV).
#  2nd column: probability density (1/(eV*particle)).
#  3rd column: statistical uncertainty (3 sigma).

  3.600000E+03  1.388010E-11  5.564417E-12
  9.600001E+03  1.635868E-11  6.040844E-12
  1.560000E+04  1.164937E-11  5.097704E-12
  2.160000E+04  1.412795E-11  5.613880E-12
```

Σχήμα 3.5. Δομή αρχείου εξόδου ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.

```
#  Results from PENMAIN. 3D dose distribution.
#  Dose-map enclosure:  XL = -1.000000E+00 cm,  XU =  1.000000E+00 cm
#                       YL = -1.000000E+00 cm,  YU =  1.000000E+00 cm
#                       ZL =  1.000000E+02 cm,  ZU =  1.020000E+02 cm
#  Numbers of bins:     NBX =   1, NBY =   1, NBZ =   1

#  columns 1 to 3: bin indices IX, IY and IZ
#  4th column: dose (eV/g).
#  5th column: statistical uncertainty (3 sigma).

   1   1   1  1.45668E-01  8.2E-03
```

```
#  Results from PENMAIN. 3D dose distribution.
#  Plane #   1  Z=  1.01000E+02 cm
#  columns 1 to 3: I1, I2, I3
#  columns 4-6: x, y, z (cm).
#  7th column: dose (eV/g).
#  8th column: statistical uncertainty (3 sigma).

1   1   1   1.00000E-07 1.00000E-07 1.01000E+02 1.45668E-01 8.2E-03
```

Σχήμα 3.6. Δομή αρχείων εξόδου ανιχνευτή δόσης.

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)   Plane Z=0.00
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)   Plane Z=100
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 1.000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3)   Plane Z=102
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 1.020000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4)   Plane Y=1.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(-1.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5)   Plane Y=-1.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(+1.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6)   Plane X=-1.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(+1.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)   Plane X=1.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(-1.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8)   Plane Z=-100
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=(-1.000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9)   Sphere R=1.00
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
Z-SHIFT=(-1.010000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)   air
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

```
BODY    (   2)   tissue
MATERIAL(   2)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   3)   air
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   4)   tissue
MATERIAL(   2)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Σχήμα 3.7. Αρχείο γεωμετρίας application4.geo.

```
TITLE  Specific source + dose enclosure + energy-deposition detectors

       >>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2                [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 0.6e6            [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0            [Coordinates of the source]
SDIREC 0.0 0.0          [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180              [Beam aperture, in deg]

       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   2                      Number of different materials, .le.10]
SIMPAR 1 0.6e4 0.6e3 0.6e4 0.1 0.1 0.6e4 0.6e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 0.6e4 0.6e3 0.6e4 0.1 0.1 0.6e4 0.6e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
PFNAME totmat.mat                   [Material definition file, 20 chars]

       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN application4.geo             [Geometry definition file, 20 chars]
>>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    0.6e3 0.6e6 100        [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   90                           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   1                            [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

       >>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 0.6e3 0.6e6 100        [Energy window and number of channels]
EDSPC  pm_spc_enddet_1.dat
EDBODY 2                            [Active body; one line for each body]

ENDDET 0.6e3 0.6e6 100        [Energy window and number of channels]
EDSPC  pm_spc_enddet_2.dat
EDBODY 4                            [Active body; one line for each body]

       >>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX  -1.0 1.0
GRIDY  -1.0 1.0
GRIDZ   100 102
GRIDBN 1 1 1

       >>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat                    [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat                    [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60                           [Dumping period, in sec]

TIME   2.0e5                        [Allotted simulation time, in sec]
```

Σχήμα 3.9. Αρχείο εισόδου δεδομένων application4.in.

```
#  Results from PENMAIN. 3D dose distribution.
 #  Dose-map enclosure:  XL = -1.000000E+00 cm,  XU =  1.000000E+00 cm
 #                       YL = -1.000000E+00 cm,  YU =  1.000000E+00 cm
 #                       ZL =  1.000000E+02 cm,  ZU =  1.020000E+02 cm
 #  Numbers of bins:     NBX =   1, NBY =   1, NBZ =   1
 #  columns 1 to 3: bin indices IX, IY and IZ
 #  4th column: dose (eV/g).
 #  5th column: statistical uncertainty (3 sigma).

    1   1   1  1.45668E-01  8.2E-03
```

Σχήμα 3.10. Αρχείο εξόδου ανιχνευτή δόσης.

```
Average deposited energies (energy detectors):
  Detector # 1 ...  1.293530E+00 +- 7.3E-02 eV    (effic.=2.02E-02)
  Detector # 2 ...  7.247399E-01 +- 5.4E-02 eV    (effic.=1.13E-02)

  Maximum dose ...  1.456677E-01 +- 8.2E-03 eV/g  (effic.=2.02E-02)
```

Σχήμα 3.11. Τμήμα αρχείου penmain.dat όπου καταγράφονται οι τιμές της αποτιθέμενης ενέργειας για τους δύο ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας.

```
C
C  ***********  Set the initial state of the primary particle.
C
      IF(ISORP.EQ.0) THEN
C  ****  Point source.
         SHN=SHN+1.0D0
         N=N+1
         IF(N.GT.2000000000) N=N-2000000000
         KPAR=KPARP
         WGHT=WGHT0
C  ----  Initial position ...
         X=SX0
         Y=SY0
         Z=SZ0
```

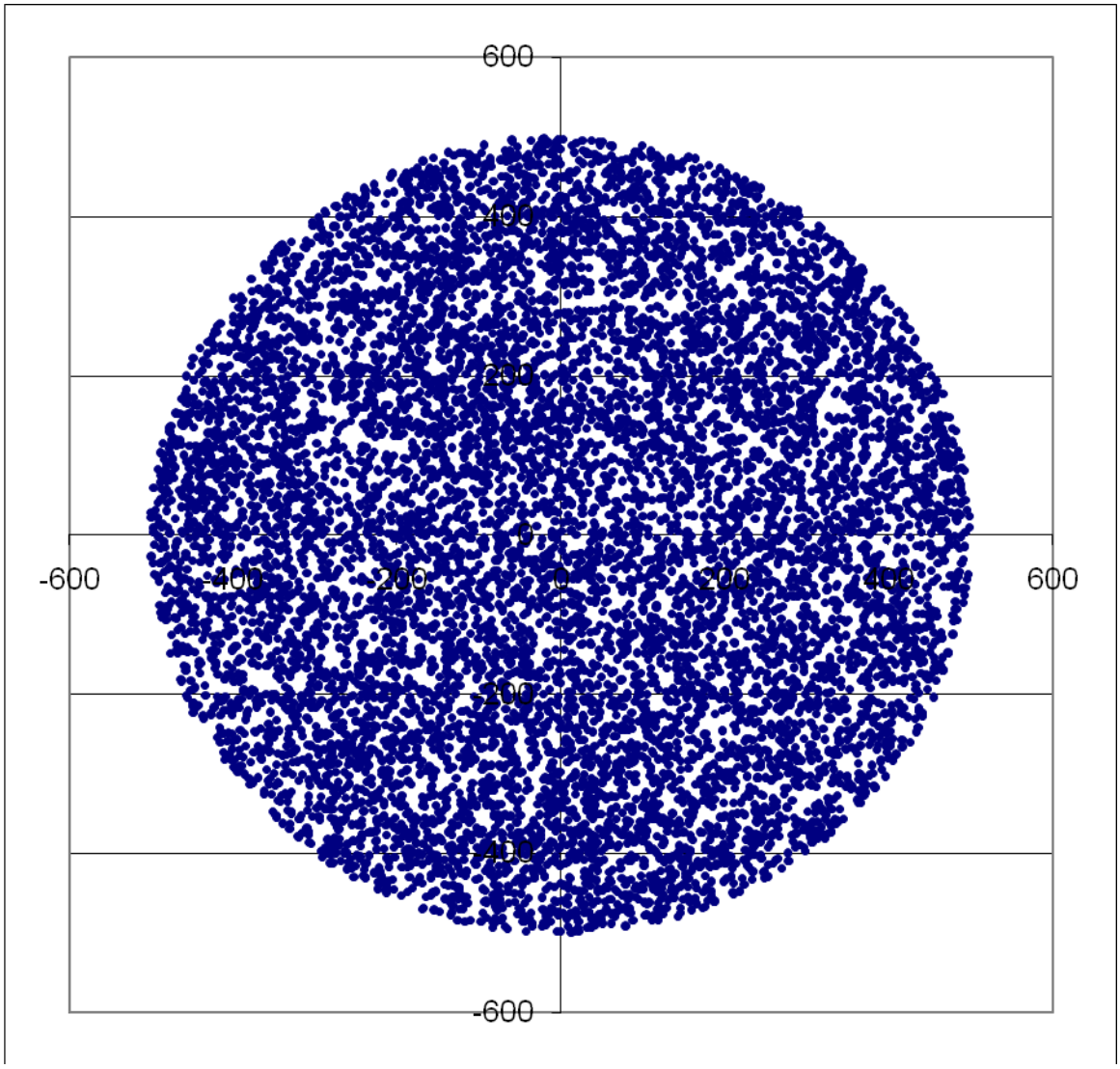
Σχήμα 3.12. Τμήμα κώδικα PENMAIN όπου ορίζεται η σημειακή πηγή.

```
C  ***********  Set the initial state of the primary particle.
C
      IF(ISORP.EQ.0) THEN
C  ****  Point source.
        SHN=SHN+1.0D0
        N=N+1
        IF(N.GT.2000000000) N=N-2000000000
        KPAR=KPARP
        WGHT=WGHT0
C  ----  Initial position ...
        RR2=100D0*100D0
 4444   X=RAND(1.0D0)*100D0
        Y=RAND(2.0D0)*100D0
        RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
        IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
        Z=SZ0
        BX=RAND(3.0D0)
        BY=RAND(4.0D0)
        IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
        IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y
```

Σχήμα 3.13. Τροποποιημένο τμήμα κώδικα PENMAIN όπου ορίζεται η δισκοειδής πηγή.

```
      PROGRAM SOURCE
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

      RR=500D0
      RR2=RR**2.0D0
      OPEN(1, FILE='random.dat')
      DO I=1,10000
4444  X=RAND(1.0D0)*RR
      Y=RAND(2.0D0)*RR
      SUM=X**2.0D0+Y**2.0D0
      IF(SUM.GT.RR2)GOTO 4444
      Z=0.0
      BX=RAND(3.0D0)
      BY=RAND(4.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y

      WRITE(1,*)X,Y,Z
      ENDDO

      CLOSE (1)

      STOP
      END
```

Σχήμα 3.14. Βοηθητικός κώδικας ελέγχου της τυχαιότητας της πηγής.



Σχήμα 3.15. Έλεγχος ομοιομορφίας κατανομής των θέσεων των σωματιδίων.

```
TITLE  Disc source + dose enclosure + energy-deposition detectors

       >>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2        [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 0.66e6           [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0                                [Coordinates of the source]
SDIREC 0.0 0.0                   [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180                                     [Beam aperture, in deg]

       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   2                       [Number of different materials, .le.10]
SIMPAR 1 0.6e4 0.6e3 0.6e4 0.1 0.1 0.6e4 0.6e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 0.6e4 0.6e3 0.6e4 0.1 0.1 0.6e4 0.6e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
PFNAME air_tissue.mat            [Material definition file, 20 chars]

       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN application4.geo          [Geometry definition file, 20 chars]

       >>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    0.6e3 0.6e6 100            [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   90                      [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   1                     [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

       >>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 0.6e3 0.67e6 100        [Energy window and number of channels]
EDSPC  pm_spc_enddet_1.dat
EDBODY 2                        [Active body; one line for each body]

ENDDET 0.6e3 0.67e6 100        [Energy window and number of channels]
EDSPC  pm_spc_enddet_2.dat
EDBODY 4                        [Active body; one line for each body]

       >>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX  -1.0 1.0
GRIDY  -1.0 1.0
GRIDZ   100 102
GRIDBN 1 1 1

       >>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat               [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat                  [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60                                   [Dumping period, in sec]

TIME   2.0e5                       [Allotted simulation time, in sec]
```

Σχήμα 3.16. Αρχείο εισόδου δεδομένων disc.in.

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)   Plane Z=0.00
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)   Plane Z=100
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 1.000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3)   Plane Z=102
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 1.020000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4)   Plane Y=1.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(-1.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5)   Plane Y=-1.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(+1.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6)   Plane X=-1.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(+1.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)   Plane X=1.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(-1.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8)   Plane Z=-100
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=(-1.000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9)   Sphere R=1.00
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
Z-SHIFT=(-1.010000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)   air
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

```
BODY    (   2)   tissue
MATERIAL(   2)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   3)   air
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   4)   tissue
MATERIAL(   2)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Σχήμα 3.17. Αρχείο γεωμετρίας disc.geo.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΟΣΗΣ, ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΗΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥ ^{137}Cs ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ PENELOPE

4.1. Γενικά

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η προσπάθεια που έγινε, στα πλαίσια της ΔΕ, για την επίλυση ενός ρεαλιστικού προβλήματος υπολογισμού δόσης, εξαιτίας της ραδιενέργειας ^{137}Cs του εδάφους. Επισημαίνεται ότι ο στόχος της ΔΕ δεν είναι ο καθεαυτού υπολογισμός της δόσης, αλλά η κατάστρωση μιας μεθοδολογίας υπολογισμού της δόσης σε ένα σημείο που βρίσκεται σε ύψος 1m από την επιφάνεια του εδάφους, εξαιτίας της ύπαρξης οποιουδήποτε ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος, το οποίο είναι κατά βάθος κατανεμημένο, με χρήση του ανιχνευτή δόσης του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE, ικανής να αποτελέσει οδηγό σε μελλοντικές εφαρμογές. Η μεθοδολογία που θα αναπτυχθεί παρακάτω βασίζεται στην εκτίμηση της συνεισφοράς στη δόση των φωτονίων που εκπέμπονται από τα διάφορα στρώματα του εδάφους ξεχωριστά. Κάθε στρώμα του εδάφους θα θεωρηθεί διαδοχικά ως πηγή φωτονίων, ενώ τα υπερκείμενα στρώματα θα θεωρούνται κάθε φορά απορροφητές των φωτονίων. Καθώς η μεθοδολογία που θα αναπτυχθεί εξαρτάται σημαντικά στα χαρακτηριστικά που έχει το χώμα, όσον αφορά στην πυκνότητα και τη σύστασή του. Αυτό είναι φυσικό διότι, τόσο η εξασθένηση των φωτονίων τα οποία εκπέμπονται μέσα στο έδαφος, όσο και η κινητική των διαφόρων ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος εξαρτάται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του χώματος. Για το λόγο αυτό στις πρώτες παραγράφους του Κεφαλαίου που ακολουθούν παρατίθενται τα σχετικά στοιχεία τα οποία προέκυψαν μετά από ενδελεχή βιβλιογραφική ανασκόπηση.

4.2. Τυπικό έδαφος

Όπως αναφέρθηκε ήδη σε προηγούμενο κεφάλαιο, το έδαφος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον ρυθμό δόσης που προκύπτει από την ύπαρξη ενός ραδιενεργού ισοτόπου το έδαφος, καθώς η σύστασή του και η κατά βάθος κατανομή της πυκνότητάς του καθορίζουν τόσο την μετακίνηση και κατανομή

του ισοτόπου αυτού, όσο και τις αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας του, μέσα στο χώμα. Επομένως, πρέπει να εξεταστεί και να οριστεί η τυπική σύσταση και η τυπική κατά βάθος κατανομή της πυκνότητας του χώματος, για το πρόβλημα που απασχολεί την συγκεκριμένη ΔΕ, όπως αυτές προέκυψαν από σχετική βιβλιογραφική έρευνα, η οποία παρουσιάζεται ακολούθως.

4.2.1. Σύσταση χώματος

Στην βιβλιογραφία, εντοπίστηκαν διάφορες προσεγγίσεις και μελέτες για την σύσταση του χώματος και τον ορισμό μίας τυπικής σύστασης. Οι προσεγγίσεις αυτές παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις, καθώς αφορούν σε διαφορετικές περιοχές, σε διαφορετικό τύπο εδάφους και εξυπηρετούν διαφορετικό σκοπό.

Αρχικά, στους Πίνακες 4.1 και 4.2, παρατίθενται ορισμένες αναλύσεις δειγμάτων χώματος, όπως αυτά δίνονται στο Πρόγραμμα Λίπανσης Ανάλυσης LI.FE.-T S.A. [http://www.life-t.gr], τα οποία αφορούν σε καλλιεργούμενα εδάφη και έχουν ως σκοπό την επιλογή κατάλληλων λιπασμάτων. Επιπλέον, στους πίνακες αυτούς, παρουσιάζεται και η αναγωγή σε % περιεκτικότητα των στοιχείων, καθώς επίσης και η μηχανική σύσταση του χώματος, δηλαδή η κοκκομετρική ανάλυση. Παρατηρούμε ότι οι αναλύσεις αυτές, εξαιτίας της φύσης τους, παρουσιάζουν την περιεκτικότητα του εδάφους σε συγκεκριμένες χημικές ενώσεις και στοιχεία και δεν αποτελούν αντιπροσωπευτικές ισοτοπικές συστάσεις του χώματος.

ΟΛΙΚΑ Ανθρακικά	$CaCO_3$	0.82	%			0.820	%
ΕΝΕΡΓΑ Ανθρακικά	$CaCO_3$	0.20	%			0.200	%
ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΟΥΣΙΑ		1.79	%			1.790	%
ΑΖΩΤΟ	N	0.17	%			0.170	%
ΦΩΣΦΟΡΟ	P	2.68	Ppm	22.68	Ppm	0.492	%
	K_2O	42.33	mg/100g	(423.30)	Ppm		
ΚΑΛΙΟ	K			352.75	Ppm	7.653	%
ΑΣΒΕΣΤΙΟ	Ca	376.75	mg/100g	3767.50	Ppm	81.741	%
ΜΑΓΝΗΣΙΟ	Mg	19.46	mg/100g	194.60	Ppm	4.222	%
ΝΑΤΡΙΟ	Na	11.35	mg/100g	113.50	Ppm	2.463	%
ΣΙΔΗΡΟΣ	Fe	11.13	Ppm	11.13	Ppm	0.241	%
ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΣ	Zn	2.30	Ppm	2.30	Ppm	0.050	%
ΧΑΛΚΟΣ	Cu	4.53	Ppm	4.53	Ppm	0.098	%
ΜΑΓΓΑΝΙΟ	Mn	1.91	Ppm	1.91	Ppm	0.041	%
ΒΟΡΙΟ	B	0.84	Ppm	0.84	Ppm	0.018	%
ΣΥΝΟΛΟ (χωρίς το K_2O)				4471.74	Ppm	99.999	%
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ		ΑΜΜΟΣ 62% , ΙΛΥΣ 26% , ΑΡΓΙΛΛΟΣ 12%					

Πίνακας 4.1. Δείγμα χώματος από βαμβακοκαλλιέργεια [LI.FE.-T S.A.] *

ΑΝΘΡΑΚΙΚΟ ΑΣΒΕΣΤΙΟ	$CaCO_3$	18.48	%			18.480	%
ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΟΥΣΙΑ		4.02	%			4.020	%
ΝΙΤΡΙΚΟ ΑΖΩΤΟ	NNO_3	18.00	Ppm	18.00	Ppm	0.112	%
ΦΩΣΦΟΡΟ	P	5.15	Ppm	5.15	Ppm	0.032	%
ΚΑΛΙΟ	K	0.41	meq/100g	160.31	Ppm	0.999	%
ΑΣΒΕΣΤΙΟ	Ca	55.10	meq/100g	11020.0	Ppm	68.704	%
ΜΑΓΝΗΣΙΟ	Mg	8.50	meq/100g	1028.50	Ppm	6.412	%
ΝΑΤΡΙΟ	Na	0.53	meq/100g	121.90	Ppm	0.760	%
ΣΙΔΗΡΟΣ	Fe	16.12	Ppm	16.12	Ppm	0.101	%
ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΣ	Zn	18.04	Ppm	18.04	Ppm	0.113	%
ΧΑΛΚΟΣ	Cu	28.50	Ppm	28.50	Ppm	0.178	%
ΜΑΓΓΑΝΙΟ	Mn	14.38	Ppm	14.38	Ppm	0.090	%
ΣΥΝΟΛΟ				12430.9	Ppm	100.001	%
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ		ΑΜΜΟΣ 18% , ΙΛΥΣ 40% , ΑΡΓΙΛΛΟΣ 42%					

Πίνακας 4.2. Δείγμα χώματος από την Κέρκυρα για καλλιέργεια τρούφας σε ελαιόδεντρα [LI.FE.-T S.A] *

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συνοπτικά συστάσεις χώματος, που αφορούν σε διαφορετικά εδάφη, όπως αυτές προέκυψαν από μία οικολογική έρευνα στην Κω, των Γεωργιάδη κ.α. (2001) [Πίνακας 4.3]. Σημειώνουμε ότι οι τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα αυτόν προκύπτουν κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας, ώστε να είναι εκφρασμένες σε όρους κατά βάρος συγκέντρωσης %. Παρατηρούμε ότι και αυτές οι αναλύσεις, δεν μπορούν, σε καμία περίπτωση, να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές ισοτοπικές συστάσεις, καθώς αναφέρονται σε ειδικές περιπτώσεις και σε συγκεκριμένα εδάφη και όχι σε μία γενικότερη περίπτωση τυπικού εδάφους.

* Τα ppm Καλίου (K) προκύπτουν διαιρώντας τα ppm K_2O με 1.2. Επιπλέον, πολλαπλασιάζοντας τα meq/100g K στο χώμα επί 391 προκύπτουν τα ppm K στο χώμα. Αντίστοιχα, για το Νάτριο (Na) πολλαπλασιάζουμε με 230, για το Ασβέστιο (Ca) με 200 και για το Μαγνήσιο (Mg) με 121. Επίσης, ισχύει ότι 1meq = 1×10^{-3} eq, όπου το 1 equivalent ορίζεται ως η ποσότητα μίας ουσίας (moles) που θα αντιδράσει με 6.022×10^{23} (Αριθμός Avogadro) ηλεκτρόνια. Επομένως, 1 meq ενός στοιχείου ανά 100g χώματος αντιστοιχούν σε 1cmol (1×10^{-2} mol) του στοιχείου ανά kg χώματος, δηλαδή 1meq/100 g = 1cmol/1 kg. [«General Soil Test Interpretation Guide της Soiltest Farm Consultants, inc.»]

		(Α)	(Β)	(Γ)	(Δ)	(Ε)	(ΣΤ)	(Ζ)	
ΑΝΘΡΑΚΙΚΟ ΑΣΒΕΣΤΙΟ	$CaCO_3$	58.090	-					5.400	%
ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΟΥΣΙΑ		5.240	2.110	1.200	1.700	-	-	1.500	%
ΝΙΤΡΙΚΟ ΑΖΩΤΟ	NNO_3	-	-						%
ΦΩΣΦΟΡΟ	P	-	-	0.861	1.801	4.167	7.531	1.381	%
ΑΣΒΕΣΤΙΟ	Ca	34.042	78.456	-	-	66.674	59.304	-	%
ΚΑΛΙΟ	K	1.474	7.218	52.618	60.312	-	12.496	61.387	%
ΜΑΓΝΗΣΙΟ	Mg	1.154	12.216	27.581	26.745	7.347	19.014	27.917	%
ΝΑΤΡΙΟ	Na	-	-						%
ΣΙΔΗΡΟΣ	Fe	-	-	4.029	2.893	5.637	0.548	0.615	%
ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΣ	Zn	-	-	0.215	0.136	1.919	0.435	0.060	%
ΜΑΓΓΑΝΙΟ	Mn	-	-	13.301	5.867	4.946	0.489	1.471	%
ΧΑΛΚΟΣ	Cu	-	-	0.098	0.437	9.299	0.160	0.180	%
ΒΟΡΙΟ	B	-	-	0.098	0.109	0.011	0.025	0.090	%
ΣΥΝΟΛΟ		100.000	100.000	100.001	100.000	100.000	100.002	100.001	%

Πίνακας 4.3. Ανάλυση εδαφών, σύμφωνα με την μελέτη των Γεωργιάδη κ.α. (2001). **(Α)** Μη καλλιεργούμενο έδαφος αποτελούμενο από τριτογενείς αποθέσεις, **(Β)** Μη καλλιεργούμενο έδαφος αποτελούμενο από σχιστόλιθους, **(Γ)-(Ε)** Γεωργικά εδάφη καλλιέργειας αμπέλου, **(ΣΤ)** Γεωργικό έδαφος καλλιέργειας τομάτας, **(Ζ)** Γεωργικό έδαφος καλλιέργειας καρπουζιού.

Τέλος, στους Πίνακες 4.4, 4.5. παρουσιάζονται δύο τυπικές συστάσεις ανόργανου χώματος με τις πυκνότητές τους, όπως τις θεωρούν οι Endo et al. (2000) και οι Τραμπίδου κ.α. (2006), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι οργανικό θεωρείται ένα χώμα όταν η οργανική ύλη ξεπερνά το 20%. Επιπλέον, ενώ το οργανικό χώμα προέρχεται κατά κύριο λόγο από οργανική ύλη η οποία έχει αποσυντεθεί, το ανόργανο (ή μεταλλικό) χώμα προέρχεται από πετρώματα. Τέλος, αναφέρεται ότι το ανόργανο χώμα εμφανίζει πυκνότητες μεγαλύτερες αυτών του οργανικού χώματος.

ΤΥΠΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ		
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (g/cm^3)		**1.7**
Στοιχείο		Ισοτοπική σύσταση (% κ.β.)
ΥΔΡΟΓΟΝΟ	H	**3.00**
ΑΝΘΡΑΚΑΣ	C	**0.80**
ΟΞΥΓΟΝΟ	O	**58.70**
ΝΑΤΡΙΟ	Na	**1.20**
ΑΡΓΙΛΙΟ	Al	**5.40**
ΠΥΡΙΤΙΟ	Si	**25.60**
ΑΣΒΕΣΤΙΟ	Ca	**0.60**
ΤΙΤΑΝΙΟ	Ti	**0.10**
ΜΑΓΓΑΝΙΟ	Mn	**0.04**
ΣΙΔΗΡΟΣ	Fe	**1.40**
ΣΥΝΟΛΟ		96.84

Πίνακας 4.4. Χημική σύσταση και πυκνότητα χώματος, σύμφωνα με τους Endo et al. (2000).

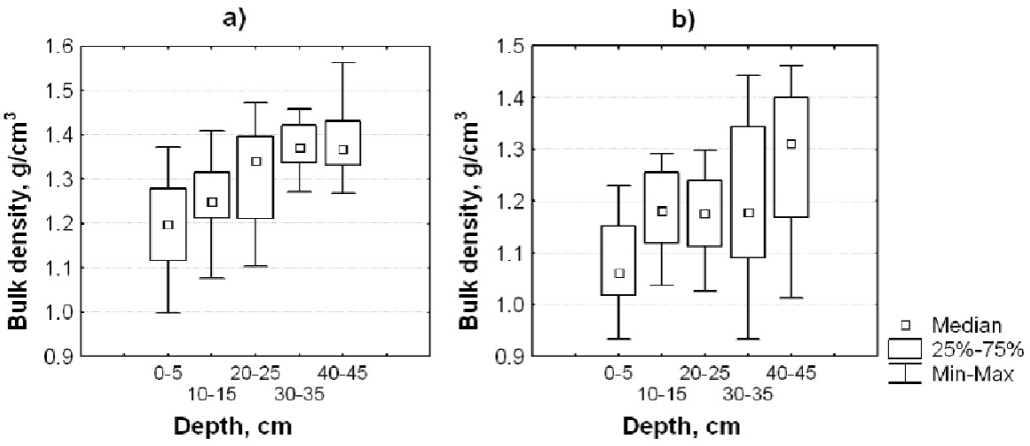
ΤΥΠΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ		
ΥΓΡΑΣΙΑ		**10%**
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (g/cm³)		**1.0**
Στοιχείο		Ισοτοπική σύσταση (% κ.β.)
ΠΥΡΙΤΙΟ	Si	**26.60**
ΑΡΓΙΛΙΟ	Al	**7.84**
ΣΙΔΗΡΟΣ	Fe	**4.83**
ΑΣΒΕΣΤΙΟ	Ca	**3.47**
ΚΑΛΙΟ	K	**3.47**
ΟΞΥΓΟΝΟ	O	**53.60**
ΥΔΡΟΓΟΝΟ	H	**1.11**
ΣΥΝΟΛΟ		100.92

Πίνακας 4.5. Χημική σύσταση και πυκνότητα χώματος (10% υγρασία), σύμφωνα με τους Τραμπίδου κ.α. (2006).

4.2.2. Πυκνότητα χώματος

Ως μαζική πυκνότητα χώματος, σύμφωνα με την ηλεκτρονική εγκυκλοπαίδεια Wikipedia, ορίζεται η πυκνότητα του χώματος, συμπεριλαμβανομένων των σωματιδίων και των διάκενων των πόρων, δηλαδή η μάζα ανά μονάδα όγκου του χώματος. Για τυπικό ανόργανο χώμα, η μαζική πυκνότητα κυμαίνεται από 1.1g/cm³ έως 1.6g/cm³. Στη βιβλιογραφία, εντοπίστηκαν γεωλογικές μελέτες, οι οποίες παρουσιάζουν την κατανομή της πυκνότητας μέσα στο χώμα, για διάφορους τύπους χώματος.

Οι Goncharov et al. (2005) εξετάζουν την κατανομή της μαζικής πυκνότητας σε αργιλώδες δασικό χώμα, με λάσπη, άμμο και πηλό (Grey forest clay loam soil) στη Ρωσία. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι τύποι “grey soil” και “grey soil with 2nd humus horizon”, αντίστοιχα. Από τις μετρήσεις που πραγματοποίησαν για βάθη 0-5, 10-15, 20-25, 30-35 και 40-45 cm, προέκυψαν 64 διαφορετικά προφίλ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ο Πίνακας 4.6, ο οποίος παρουσιάζει την μέση τιμή των μετρήσεων, για κάθε στρώμα χώματος της συγκεκριμένης μελέτης. Παρατηρούμε ότι η τιμή της πυκνότητας του χώματος, για κάθε στρώμα χώματος, παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση.



Σχήμα 4.1. Μαζική πυκνότητα χώματος (g/cm^3) για δύο διαφορετικούς τύπους χώματος, όπως προέκυψαν από την μελέτη των Goncharov et al. (2005).

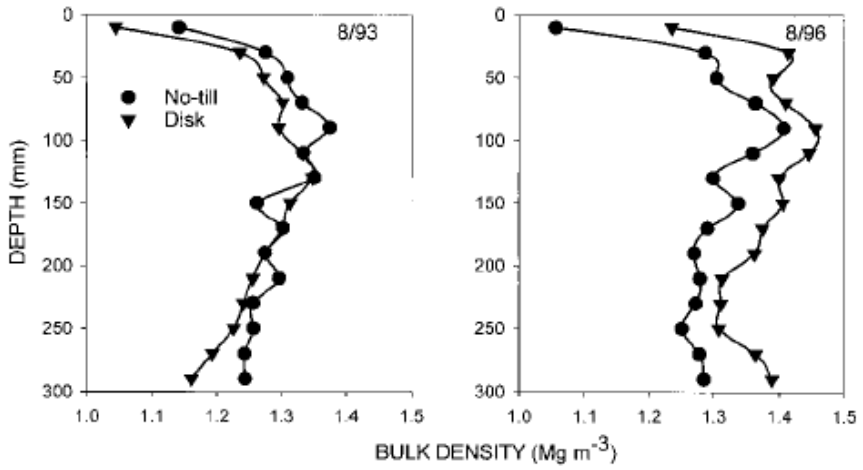
ΒΑΘΟΣ (cm)		ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (g/cm^3)	
		(A)	(B)
1	0-5	1.20	1.06
2	10-15	1.25	1.18
3	20-25	1.33	1.17
4	30-35	1.37	1.17
5	40-45	1.36	1.31

Πίνακας 4.6. Μέσες τιμές πυκνότητας (g/cm^3) σε κάθε στρώμα για τους δύο τύπους χώματος του Σχήματος 4.1 [Goncharov et al. (2005)].

Στα πλαίσια της μελέτης των Logsdon and Cambardella (2000), εξετάστηκαν δύο πεδία, στην κεντρική Αϊόβα, με παρόμοιους τύπους χώματος, στα οποία, όμως είχαν εφαρμοστεί διαφορετικές τεχνικές καλλιέργειας. Το πρώτο πεδίο χαρακτηρίζεται ως “no-till” πεδίο, το οποίο αντιστοιχεί έδαφος καλλιέργειας σπαρτών, στο οποίο όμως δεν έχει προκληθεί διαταραχή του χώματος μέσω του οργώματος. Το δεύτερο πεδίο καλείται “disk” πεδίο, στο οποίο χρησιμοποιείται ένας δίσκος για να καταστρέψει τα ζιζάνια και να εξομαλύνει το έδαφος. Συνολικά, σε διάστημα τεσσάρων ετών, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 144 διαφορετικά σημεία. Οι μετρήσεις έγιναν, ανά 2 cm, μέχρι βάθος χώματος 30 cm. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7 και στο Σχήμα 4.2, για τα δύο πεδία, σε διαφορετικές ημερομηνίες μέτρησης.

Depth	8/93	4/94	10/94	4/95	6/95	4/96	8/96
mm	Mg m^{-3}						
0–20	1.14	0.97	1.10	1.03	1.20	0.91	1.06
20–40	1.27	1.27	1.26	1.28	1.33	1.23	1.29
40–60	1.31	1.32	1.31	1.35	1.37	1.39	1.30
60–80	1.33	1.33	1.35	1.30	1.37	1.31	1.36
80–100	1.38	1.34	1.36	1.36	1.44	1.35	1.41
100–120	1.33	1.36	1.44	1.42	1.39	1.31	1.36
120–140	1.35	1.31	1.36	1.34	1.45	1.34	1.30
140–160	1.26	1.35	1.35	1.33	1.36	1.37	1.34
160–180	1.30	1.29	1.26	1.32	1.43	1.33	1.29
180–200	1.28	1.34	1.33	1.37	1.39	1.31	1.27
200–220	1.30	1.30	1.31	1.32	1.36	1.28	1.28
220–240	1.26	1.32	1.29	1.33	1.38	1.27	1.27
240–260	1.26	1.26	1.27	1.32	1.41	1.29	1.25
260–280	1.24	1.26	1.33	1.36	1.40	1.29	1.28
280–300	1.24	1.30	1.39	1.37	1.50	1.29	1.28
0–20	1.04	1.07	0.96	1.02	1.00	1.30	0.90	1.23
20–40	1.24	1.30	1.27	1.24	1.20	1.35	1.26	1.41
40–60	1.27	1.40	1.42	1.37	1.28	1.28	1.30	1.39
60–80	1.30	1.40	1.40	1.49	1.36	1.39	1.33	1.41
80–100	1.30	1.43	1.57	1.49	1.43	1.50	1.40	1.46
100–120	1.33	1.46	1.53	1.48	1.47	1.53	1.38	1.45
120–140	1.35	1.44	1.53	1.44	1.48	1.51	1.42	1.40
140–160	1.31	1.43	1.47	1.37	1.41	1.47	1.44	1.41
160–180	1.30	1.42	1.38	1.33	1.42	1.46	1.39	1.38
180–200	1.28	1.43	1.37	1.36	1.43	1.42	1.34	1.36
200–220	1.26	1.40	1.36	1.36	1.38	1.40	1.30	1.31
220–240	1.24	1.42	1.33	1.32	1.35	1.35	1.34	1.31
240–260	1.23	1.40	1.37	1.33	1.34	1.37	1.37	1.31
260–280	1.19	1.40	1.34	1.33	1.31	1.36	1.29	1.36
280–300	1.16	1.38	1.38	1.35	1.38	1.44	1.36	1.39

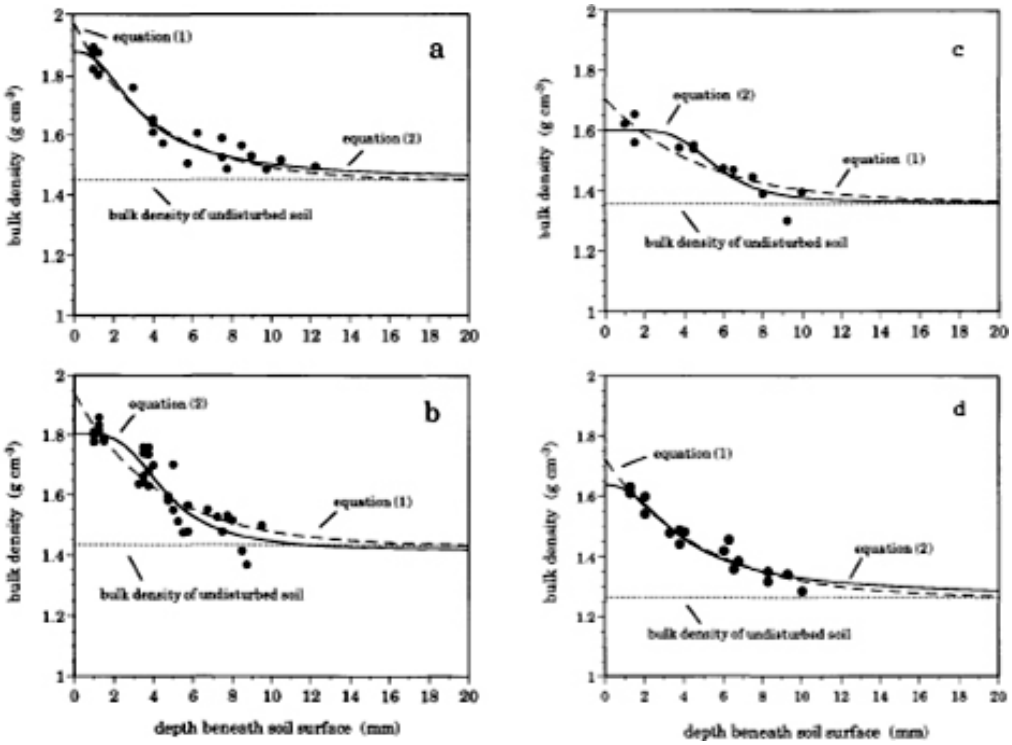
Πίνακας 4.7. Κατά βάθος κατανομή πυκνότητας χώματος (g/cm^3) για τους δύο τύπους εδάφους, σύμφωνα με τους Logsdon and Cambardella (2000).



Σχήμα 4.2. Κατά βάθος κατανομή της πυκνότητας, για τους δύο τύπους εδάφους του Πίνακα 4.7, κατά την πρώτη και τελευταία ημερομηνία των μετρήσεων [Logsdon and Cambardella (2000)].

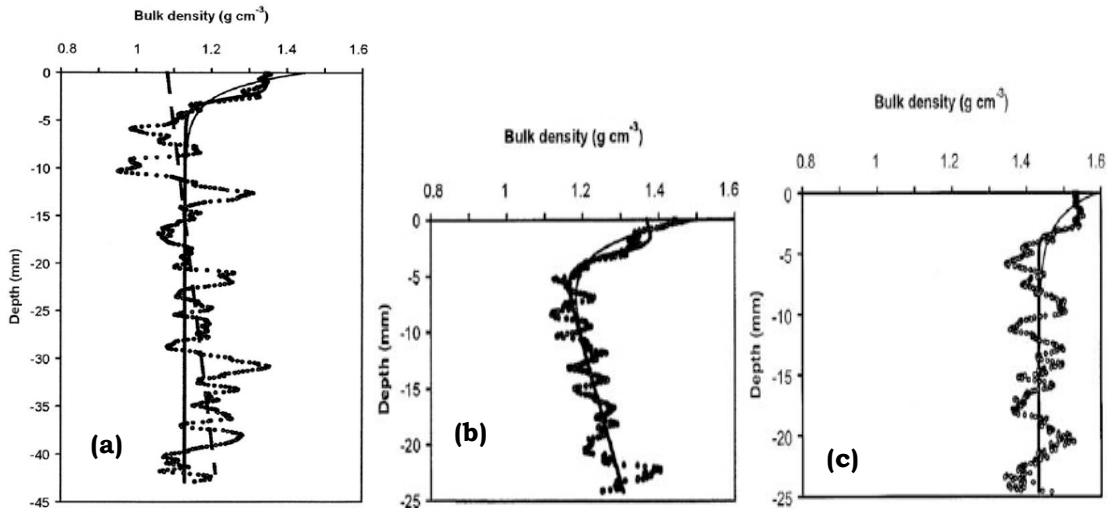
Στην μελέτη του C.H. Roth (1997), εξετάστηκε η κατανομή της πυκνότητας στα πρώτα 2 cm, για μεγάλο εύρος διαφορετικών τύπων χώματος.

Συγκεκριμένα, εξετάσθηκαν οι εξής τύποι χώματος: “loamy sand”, “sandy loam”, “sandy silt” και “loamy silt”, οι οποίοι διακρίνονται αναλόγως του ποσοστού άμμου (sand), λάσπης (silt) και πηλού (clay) που περιέχουν. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν γραφικά και σε αυτά προσαρμόστηκαν μία εκθετική και μία σιγμοειδής συνάρτηση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3. Κατανομή της πυκνότητας (g/cm³) στα πρώτα 2 cm χώματος, για τέσσερεις τύπους χώματος και προσαρμογή καμπυλών αναδρομής στα πειραματικά σημεία, σύμφωνα με τον Roth (1997).

Τέλος, στην μελέτη των Bresson et al. (2004), εκτιμήθηκαν τα θεωρητικά μοντέλα που προτάθηκαν από προηγούμενες μελέτες για την κατανομή της πυκνότητας στα πρώτα εκατοστά του χώματος, με χρήση ραδιογραφίας ακτίνων-Χ. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις, για τρεις διαφορετικούς σχηματισμούς του επιφανειακού χώματος, “slaking crust”, “infilling crust” και “coalescing crust”, αντίστοιχα, καθώς και η προσαρμογή εκθετικών και σιγμοειδών καμπυλών, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4. Κατανομή της πυκνότητας (g/cm^3) στα πρώτα cm χώματος και προσαρμογή καμπυλών αναδρομής, σύμφωνα με τους Bresson et al. (2004).

4.2.3. Χαρακτηριστικά χώματος της διάταξης της παρούσας ΔΕ

Επιλέγουμε να θεωρήσουμε ως σύσταση του χώματος του προβλήματός μας την σύσταση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.5, θεωρώντας ότι πιθανώς να προσεγγίζει περισσότερο την ελληνική πραγματικότητα. Το έδαφος που περιγράφεται αποτελεί ανόργανο χώμα, 10% υγρασίας, το οποίο θεωρείται ότι συνίσταται βασικά από SiO_2, Al_2O_3, CaO, K_2O και H_2O. Να σημειώσουμε εδώ ότι επιλέγοντας ανόργανο έδαφος, οι τιμές που θα προκύψουν για τον ρυθμό δόσης, σύμφωνα με τους Timms et al. (2005), θα είναι μεγαλύτερες από αυτές που θα προέκυπταν αν επιλέγαμε οργανικό χώμα, ως αποτέλεσμα του διαφορετικού ρυθμού μετακίνησης του ^{137}Cs μέσα στους δύο τύπους εδάφους.

Επεξεργαζόμαστε την σύσταση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.5, ούτως ώστε να συμπεριληφθεί στις % κατά βάρος περιεκτικότητες το υδρογόνο (H) και το οξυγόνο (O) που προέρχονται από την υγρασία του χώματος. Εφόσον, λοιπόν, έχουμε 10% κ.β. H_2O, αυτό ισοδυναμεί με 10 g H_2O σε 100 g χώματος. Και δεδομένων των ατομικών βαρών των στοιχείων και του μοριακού βάρους του νερού, AB_H=1, AB_O=16 και MB_{H2O}=18, ισχύουν οι ακόλουθες ισοδυναμίες:

Σε 1 mol H_2O περιέχονται 2 g-at H και 1 g-at O, άρα

σε 18 g H_2O περιέχονται 2 g H και 16 g O, οπότε

σε 10 g H_2O περιέχονται x g H και ψ g O.

Τελικά, προκύπτουν 1.11 g H και 8.89 g O, δηλαδή 1.11% κ.β. H και 8.89% κ.β. O.

Εφόσον, λοιπόν, το 10% κ.β. αποτελείται από νερό, ανάγουμε τις συγκεντρώσεις του Πίνακα 4.5 στο 90% και διορθώνουμε ώστε να αθροίζουν ακριβώς 100%, υπολογίζοντας για κάθε α% συγκέντρωση την νέα συγκέντρωση ως: $\frac{90\,\alpha}{100.92}$.

Τέλος, προσθέτοντας τις συγκεντρώσεις H και O, όπως τις υπολογίσαμε, εξαιτίας του νερού του εδάφους, στις ήδη υπάρχουσες, προκύπτει η ακόλουθη σύσταση του εδάφους:

Στοιχείο		**Ατομικός Αριθμός Z**	**Ατομικό Βάρος**	**Ισοτοπική σύσταση (% κ.β.)**
ΥΔΡΟΓΟΝΟ	H	1	1.008	**2.099**
ΟΞΥΓΟΝΟ	O	8	16.00	**56.690**
ΑΡΓΙΛΙΟ	Al	13	26.98	**6.992**
ΠΥΡΙΤΙΟ	Si	14	28.09	**23.722**
ΚΑΛΙΟ	K	19	39.10	**3.095**
ΑΣΒΕΣΤΙΟ	Ca	20	40.08	**3.095**
ΣΙΔΗΡΟΣ	Fe	26	55.84	**4.307**
ΣΥΝΟΛΟ				100.000

Πίνακας 4.8. Σύσταση του χώματος (10% υγρασία), όπως θα θεωρηθεί στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ

Ο Πίνακας 4.8 παρουσιάζει την ισοτοπική σύσταση του χώματος, σε όρους % κατά βάρος συγκεντρώσεως, καθώς και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων που αποτελούν το συγκεκριμένο χώμα.

Το προφίλ της πυκνότητας, το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στα πλαίσια της ΔΕ αποφασίσθηκε να καλύπτει βάθος χώματος 40 cm. Παρατηρούμε πως οι κατανομές πυκνότητας της βιβλιογραφίας αναφέρονται σε διαφορετικά βάθη, και διαφέρουν μεταξύ τους και ως προς το βάθος που μας ενδιαφέρει, και με διαφορετικό βήμα. Επομένως προβαίνουμε στον συνδυασμό αυτών, ώστε να προκύψει μία αντιπροσωπευτική κατά βάθος κατανομή πυκνότητας του χώματος για την περιοχή και το βήμα που μας ενδιαφέρει, όπως θα φανεί στην συνέχεια.

Αρχικά, χωρίζουμε το διάστημα που μας ενδιαφέρει σε δύο επιμέρους διαστήματα, 0-30 cm και 30-40 cm. Για το πρώτο διάστημα των 0-30 cm, χρησιμοποιούμε τις τιμές που προέκυψαν από την μελέτη των Logsdon and Cambardella (2000), καθώς αποτελεί την πληρέστερη, συγκριτικά, πηγή. Από τις μετρήσεις του Πίνακα 4.8 θα υπολογίσουμε την μέση τιμή της πυκνότητας για κάθε στρώμα χώματος, για τους δύο τύπους εδάφους.

Για το διάστημα 30-40 cm, λαμβάνουμε την τιμή την πυκνότητας από τον Πίνακα 4.7 και το δείγμα χώματος (Α), σύμφωνα με τους Goncharov et al. (2005). Επιλέγουμε το δείγμα (Α) έναντι του (Β), καθώς εμφανίζει τιμές πυκνότητας πολύ πιο κοντά σε αυτές του Πίνακα 4.8.

Έτσι, προκύπτουν δύο νέα προφίλ, για τους δύο διαφορετικούς τύπος χώματος του Πίνακα 4.8, τα οποία παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα [Πίνακας 4.9]. Σημειώνεται ότι η ποσότητα 1 Mg/m^3 ισοδυναμεί με 1 g/cm^3.

Βάθος (cm)	Πυκνότητα (g/cm^3)	
	ΕΔΑΦΟΣ Α	ΕΔΑΦΟΣ Β
0-2	1.06	1.07
2-4	1.28	1.28
4-6	1.34	1.34
6-8	1.34	1.39
8-10	1.38	1.45
10-12	1.37	1.45
12-14	1.35	1.45
14-16	1.34	1.41
16-18	1.32	1.39
18-20	1.33	1.37
20-22	1.31	1.35
22-24	1.30	1.33
24-26	1.29	1.34
26-28	1.31	1.32
28-30	1.34	1.36
30-40	1.36	1.37

Πίνακας 4.9. Προφίλ πυκνότητας (g/cm^3) για τους δύο τύπους χώματος του Πίνακα 4.8, όπως προκύπτει από τις μέσες τιμές του Πίνακα 4.8, για βάθος 0-30 cm, και την τιμή της πυκνότητας του δείγματος (Α) του Πίνακα 4.7, για βάθος 30-40 cm.

Ειδικότερα, το διάστημα 0-2 cm, θα το διαιρέσουμε επίσης σε δύο διαστήματα, 0-1 cm και 1-2 cm, στα οποία και θα πρέπει να προσδιορίσουμε την τιμή της πυκνότητας του χώματος.

Σύμφωνα με τους C.H. Roth (1997) και Bresson et al. (2004), οι οποίοι εξετάζουν λεπτομερώς το προφίλ της πυκνότητας στα πρώτα εκατοστά του χώματος, λαμβάνουμε, από τα Σχήματα 4.3 και 4.4, την τιμή της πυκνότητας $\rho_{(0-1)}$ και $\rho_{(1-2)}$ για το πρώτο και το δεύτερο εκατοστό χώματος, αντίστοιχα, καθώς και τις διαφορές των δύο τιμών [Πίνακας 4.10].

		Βάθος (cm)		
		0-1	1-2	
		Πυκνότητα (g/cm³)		Μεταβολή πυκνότητας
Σχήμα 4.3	(a)	1.60	1.48	0.12
	(b)	1.60	1.42	0.18
	(c)	1.50	1.37	0.13
	(d)	1.45	1.30	0.15
Σχήμα 4.4	(a)	1.15	1.15	0.0
	(b)	1.25	1.25	0.0
	(c)	1.45	1.45	0.0

Πίνακας 4.10. Πυκνότητα (g/cm³) για τα πρώτα 2 cm χώματος, όπως προκύπτει από τα Σχήματα 4.3 και 4.4.

Υπολογίζοντας, από αυτόν τον πίνακα, την μέση τιμή της μεταβολής της πυκνότητας για βάθος από 0-1 cm σε 1-2 cm, προκύπτει ότι ισχύει:

$$\rho_{(0-1)} = \rho_{(1-2)} + 0.08$$

Θεωρούμε, επιπλέον, ότι, γενικά, η τιμή της πυκνότητας που αφορά σε χώμα 0-2 cm, $\rho_{(0-2)}$, αποτελεί την μέση τιμή των πυκνοτήτων του πρώτου και του δεύτερου εκατοστού χώματος, $\rho_{(0-1)}$ και $\rho_{(1-2)}$, δηλαδή ότι ισχύει:

$$\rho_{(0-1)}+\rho_{(1-2)} = 2\rho_{(0-2)}$$

Συνδυάζοντας τις δύο αυτές σχέσεις και έχοντας ως δεδομένο τις τιμές του Πίνακα 4.9 για βάθος 0-2 cm, δηλαδή την $\rho_{(0-2)}$, υπολογίζουμε τις τιμές των πυκνοτήτων $\rho_{(0-1)}$ και $\rho_{(1-2)}$.

Να σημειώσουμε εδώ ότι από τις μελέτες των C.H. Roth (1997) και Bresson et al. (2004), δεν λάβαμε αυτούσιες τιμές πυκνότητας, για τα βάθη που μας ενδιέφεραν, αλλά προσδιορίσαμε την μεταβολή της πυκνότητας στα πρώτα 2 cm χώματος και, βάσει αυτής, υπολογίσαμε νέες τιμές πυκνότητας, για το βάθος αυτό, προσαρμοσμένες σε αυτές του Πίνακα 4.9.

Με βάση, λοιπόν, τις πυκνότητες για το πρώτο και το δεύτερο εκατοστό χώματος, ο Πίνακας 4.9 μετασχηματίζεται στον ακόλουθο Πίνακα 4.11, όπου

παρουσιάζονται τα δύο νέα προφίλ, όπως τα υπολογίσαμε, ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του προβλήματός μας.

Βάθος (cm)	Πυκνότητα (g/cm³)	
	ΕΔΑΦΟΣ Α	ΕΔΑΦΟΣ Β
0-1	1.10	1.11
1-2	1.02	1.03
2-4	1.28	1.28
4-6	1.34	1.34
6-8	1.34	1.39
8-10	1.38	1.45
10-12	1.37	1.45
12-14	1.35	1.45
14-16	1.34	1.41
16-18	1.32	1.39
18-20	1.33	1.37
20-22	1.31	1.35
22-24	1.30	1.33
24-26	1.29	1.34
26-28	1.31	1.32
28-30	1.34	1.36
30-40	1.36	1.37

Πίνακας 4.11. Προφίλ πυκνότητας (g/cm³), όπως προκύπτει από την επεξεργασία του Πίνακα 4.9 για τα πρώτα 2cm.

Στα πλαίσια της ΔΕ, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, κάθε στρώμα χώματος, εφόσον έχει διαφορετική πυκνότητα, θα θεωρηθεί ως διαφορετικό υλικό σώμα (body). Ωστόσο, στο αρχείο εισόδου των δεδομένων, όπου ορίζονται τα υλικά του προβλήματος, υπάρχει περιορισμός ως προς τον συνολικό αριθμό διαφορετικών υλικών, τα οποία δεν μπορούν να ξεπερνούν τα δέκα*. Επιπλέον, στον υπολογισμό των υλικών της διάταξης πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τον περιβάλλοντα αέρα και τον ανιχνευτή. Επομένως, πρέπει να επεξεργαστούμε περαιτέρω τα προφίλ που ορίσαμε προηγουμένως, ούτως ώστε να μην ξεπερνούν τα οκτώ στρώματα και κατά συνέπεια τα οκτώ υλικά.

Έτσι, πραγματοποιώντας ομαδοποιήσεις, με βάση την τιμή της πυκνότητας σε κάθε στρώμα και επιδιώκοντας όσο μικρότερο βήμα στα πρώτα εκατοστά, καταλήγουμε τελικά στα ακόλουθα δύο προφίλ πυκνότητας, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12:

* Ο μέγιστος αριθμός των υλικών της διάταξης ορίζεται μέσω εντολής στον κώδικα χρήστη. Επομένως, είναι δυνατή η τροποποίηση του κώδικα, ώστε να αλλάξει ο συνολικός αριθμός των διαφορετικών υλικών, πράγμα το οποίο, όμως, δεν επιχειρήθηκε στην παρούσα ΔΕ.

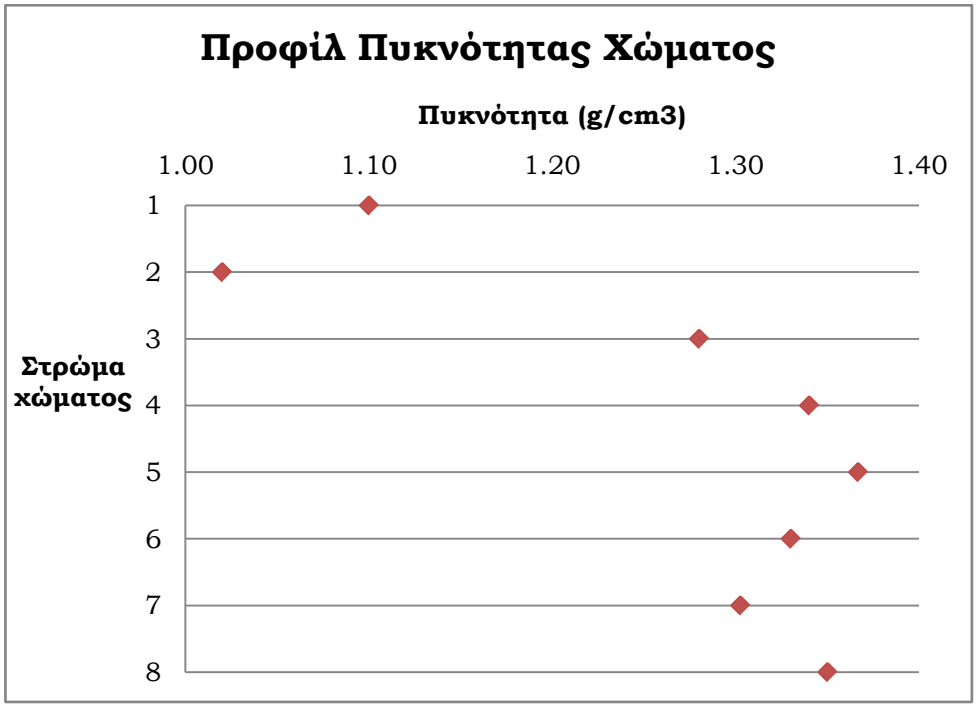
Βάθος (cm)	Πυκνότητα (g/cm³)	
	ΠΡΟΦΙΛ [1]	ΠΡΟΦΙΛ [2]
0-1	**1,10**	**1,11**
1-2	**1,02**	**1,03**
2-4	**1,28**	**1,28**
4-8	**1,34**	**1,37**
8-14	**1,37**	**1,45**
14-20	**1,33**	**1,39**
20-28	**1,30**	**1,34**
28-40	**1,35**	**1,37**

Πίνακας 4.12. Κατά βάθος κατανομή πυκνότητας χώματος, όπως προσδιορίσθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ

Από τα δύο αυτά προφίλ, τα οποία θεωρούμε ότι, κατά κανόνα, δεν παρουσιάζουν έντονες διαφορές μεταξύ τους, για τα αντίστοιχα βάθη, επιλέγουμε αυθαίρετα να θεωρήσουμε ως προφίλ της πυκνότητας του χώματος του προβλήματός μας το Προφίλ [1] [Πίνακας 4.13], ενώ στο Σχήμα 4.5, παρουσιάζεται και γραφικά η κατά βάθος κατανομή της πυκνότητας του χώματος, με βάση τον Πίνακα 4.13.

Βάθος (cm)	Πυκνότητα (g/cm³)
0-1	**1.10**
1-2	**1.02**
2-4	**1.28**
4-8	**1.34**
8-14	**1.37**
14-20	**1.33**
20-28	**1.30**
28-40	**1.35**

Πίνακας 4.13. Κατά βάθος κατανομή πυκνότητας χώματος, όπως θα θεωρηθεί στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ



Σχήμα 4.5. Προφίλ πυκνότητας χώματος, όπως θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς της παρούσας ΔΕ, σύμφωνα με το Προφίλ [1] του Πίνακα 4.12.

4.3. Υπολογισμός δόσης εξαιτίας του ραδιενεργού 137Cs του εδάφους, με χρήση του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE

Το πρόβλημα το οποίο μελετάται στην παρούσα ΔΕ είναι ο η εκτίμηση της δόσης εξαιτίας του ραδιενεργού ισοτόπου ^{137}Cs το οποίο είναι κατανεμημένο κατά βάθος στο έδαφος. Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί προς την κατεύθυνση αυτή συνίσταται στα παρακάτω βήματα:

- Δημιουργείται μία σειρά από κυλινδρικές πηγές φωτονίων ενέργειας 660keV (που εκπέμπει το ^{137}Cs), ακτίνας R=10m και μεταβλητού ύψους. Κάθε πηγή βρίσκεται σε τέτοιο βάθος ώστε να περιέχεται πλήρως μέσα σε ένα και μόνο στρώμα χώματος. Σε κάθε περίπτωση, η γεωμετρία περιλαμβάνει και τα οκτώ στρώματα χώματος που έχουν προηγουμένως επιλεγεί.

- Προσομοίωση η οποία γίνεται με τον κώδικα PENELOPE, για κάθε μία κυλινδρική πηγή ξεχωριστά, οδηγεί σε εκτίμηση της δόσης ανά φωτόνιο που εκπέμπεται από την πηγή, σε ύψος 1m από την επιφάνεια του εδάφους, κατά τον άξονα της κυλινδρικής πηγής. Οι ανά φωτόνιο δόσεις για κάθε στρώμα εδάφους αποτελούν στην πραγματικότητα συντελεστές μετατροπής ρυθμού εκπομπής φωτονίων σε δόση.

- Για δεδομένη κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs και με χρήση των συντελεστών που προηγουμένως εκτιμήθηκαν είναι εν συνεχεία δυνατή η εκτίμηση της συνολικής δόσης σε ύψος 1m από το έδαφος.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η διαδικασία εκτίμησης του συντελεστή δόσης ανά φωτόνιο, για κάθε στρώμα χώματος, που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ.

4.3.1. Τροποποίηση κώδικα χρήστη PENMAIN για κυλινδρική πηγή φωτονίων

Καθώς στον κώδικα χρήστη PENMAIN η πηγή που εκπέμπει τα πρωτογενή σωματίδια ορίζεται σημειακή, απαιτείται αρχικά η τροποποίηση του κώδικα, έτσι ώστε η αρχική θέση του πρωτογενούς σωματιδίου να βρίσκεται στον όγκο κυλινδρικής πηγής και σε διαφορετική θέση κάθε φορά. Στο Σχήμα 4.6, στο τέλος του Κεφαλαίου, παρουσιάζεται το τμήμα του κώδικα το οποίο πρέπει να τροποποιηθεί. Όπως φαίνεται, στον αρχικό κώδικα, η αρχική θέση του πρωτογενούς σωματιδίου ταυτίζεται με την θέση της σημειακής πηγής, δηλαδή X=SX0, Y=SY0 και Z=SZ0. Στην περίπτωση της κυλινδρικής πηγής αυτό παύει να ισχύει και πρέπει να εφαρμοστεί δειγματοληπτική μέθοδος. Αφού η πηγή έχει συγκεκριμένο όγκο, η αρχική θέση του σωματιδίου μπορεί να είναι οπουδήποτε εντός του όγκου αυτού της πηγής και δεν μπορεί να είναι προκαθορισμένη. Επομένως, θα πρέπει αυτή να καθορίζεται με τυχαίο τρόπο, πάντα εντός των ορίων του όγκου της πηγής. Το αντίστοιχο τροποποιημένο τμήμα του κώδικα PENMAIN, το οποίο καλούμε CPENMAIN, παρουσιάζεται στο τέλος του Κεφαλαίου. Σε αυτό, η αρχική θέση του σωματιδίου προκύπτει με την χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών και όπου θεωρήσαμε κυλινδρική πηγή φωτονίων ακτίνας 10 m (1000 cm) και ύψους 2.5 mm (0.25 cm) [Σχήμα 4.7]. Ωστόσο, το ύψος της κυλινδρικής πηγής μεταβάλλεται, ανάλογα με την προσομοίωση που πραγματοποιούμε, όπως θα εξηγήσουμε σε επόμενη παράγραφο. Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την τροποποίηση του κώδικα είναι η ακόλουθη:

- Αρχικά, καθορίζεται η τετμημένη X της τυχαίας θέσης του φωτονίου, μέσω της γεννήτριας τυχαίων αριθμών RAND, η οποία επιστρέφει τιμές από 0 έως 1.
- Πολλαπλασιάζοντας την τυχαία τιμή της γεννήτριας με την ποσότητα 1000, που αποτελεί την ακτίνα της πηγής (cm), προκύπτει η τετμημένη X, που τελικά λαμβάνει τιμή από 0 έως 1000.

- Με ανάλογο τρόπο, καθορίζεται η τεταγμένη Y της θέσης του φωτονίου.
- Η συντεταγμένη Z προκύπτει ως γινόμενο ενός τυχαίου αριθμού από 0 έως 1 (γεννήτρια τυχαίων αριθμών) επί το επιθυμητό ύψος της κυλινδρικής πηγής σε cm, προσθέτοντας σε αυτό το γινόμενο το ύψος στο οποίο βρίσκεται η κάτω βάση του κυλίνδρου.
- Στην συνέχεια, υπολογίζονται οι ποσότητες RR2, που είναι το τετράγωνο της ακτίνας της πηγής και RRT, που είναι το άθροισμα των τετραγώνων των συντεταγμένων X και Y.
- Η RRT πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από την RR2, ώστε η θέση του φωτονίου να βρίσκεται εντός του δίσκου. Σε περίπτωση που η RRT είναι μεγαλύτερη από την RR2, ορίζονται νέα X και Y και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία, μέχρι να ισχύει η πιο πάνω ανισότητα.
- Αντίθετα με όσα είδαμε στην §3.4.1., στην περίπτωση αυτή δεν ορίζουμε μεταβλητές BX και BY, με τις οποίες λαμβάνονταν υπόψη και τα τέσσερα τεταρτημόρια του κυκλικού δίσκου, ώστε να επιτύχουμε την μεγαλύτερη δυνατή οικονομία υπολογιστικού χρόνου.

Έτσι, καθορίζεται η αρχική θέση του φωτονίου, με συντεταγμένες X, Y, Z, η οποία είναι διαφορετική κάθε φορά που εκπέμπεται ένα φωτόνιο από την πηγή.

Καθώς η θέση της κυλινδρικής πηγής (στρώμα χώματος) είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση (οκτώ στρώματα χώματος) είναι προφανές ότι η κυλινδρική πηγή φωτονίων, όπως περιγράφεται στο πρόγραμμα penmain θα έχει κάθε φορά διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

4.3.1.1. Έλεγχος της θέσης εκπομπής φωτονίου μέσα σε κυλινδρική πηγή

Για να διαπιστωθεί εάν πράγματι γίνεται ομοιόμορφη κατανομή των αρχικών θέσεων των σωματιδίων μέσα στην πηγή, γίνεται χρήση βοηθητικού κώδικα, σύμφωνα με την ΔΕ του Αθανασίου (2006), που παρατίθεται στο τέλος του Κεφαλαίου [Σχήμα 4.8]. Ο κώδικας αυτός καθορίζει με τυχαίο τρόπο 10000 θέσεις και αποθηκεύει τις X, Y, Z συντεταγμένες της κάθε θέσης στο αρχείο random.dat. Με κατάλληλο πρόγραμμα, λαμβάνονται τα σημεία που προκύπτουν, με μορφή διαγράμματος, για να διαπιστωθεί αν υπάρχει όντως ομοιόμορφη κατανομή των θέσεων. Στα Σχήματα 4.9 και 4.10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των θέσεων στα επίπεδα X-Y και X-Z. Όπως διαπιστώνεται και από τα διαγράμματα αυτά, υπάρχει ικανοποιητική ομοιομορφία των θέσεων των σωματιδίων.

Σημειώνεται ότι και εδώ προσομοιώσαμε μόνο το ένα τεταρτημόριο του κυλίνδρου, χάριν οικονομίας.

4.3.2. Δημιουργία αρχείων δεδομένων

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας των αρχείων υλικών για κάθε στρώμα χώματος. Υπενθυμίζεται ότι η πυκνότητα του χώματος ήταν διαφορετική σε κάθε στρώμα.

4.3.2.1. Αρχεία υλικών .mat

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, το αρχείο υλικών .mat δημιουργείται με εκτέλεση της εντολής:

> *material.exe*

είτε επιλέγοντας το κατάλληλο υλικό από τον διαθέσιμο πίνακα υλικών [Παράρτημα 2] είτε δημιουργώντας εκ νέου το υλικό, με την σύσταση που επιθυμούμε. Για να μπορέσουμε να εισάγουμε στον κώδικα προσομοίωσης το χώμα, όπως το ορίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, με την συγκεκριμένη σύσταση και κατανομή πυκνότητας, πρέπει να δημιουργήσουμε νέα υλικά. Κάθε νέο υλικό και αρχείο υλικού αντιστοιχεί σε ένα στρώμα χώματος, συγκεκριμένης πυκνότητας.

Για να δημιουργήσουμε ένα νέο υλικό, εκτελώ το εκτελέσιμο αρχείο material.exe, μέσα στον φάκελο pendbase και ακολουθώ την διαδικασία που μου ορίζει, όπως παρουσιάζεται στην συνέχεια.

1. Πληκτρολογούμε “1” για την επιλογή “Enter composition data from the keyboard”. Έτσι, επιλέγουμε να δημιουργήσουμε νέο υλικό, με την σύσταση που θα καθορίσουμε, αντί να επιλέξουμε κάποιο από την ήδη υπάρχουσα λίστα υλικών του κώδικα.
2. Εισάγουμε το όνομα που θέλουμε να δώσουμε στο υλικό μας. Για παράδειγμα, πληκτρολογούμε “soil_135” για το στρώμα χώματος με πυκνότητα 1.35 g/cm^3.
3. Εισάγουμε τον αριθμό των στοιχείων που αποτελούν το νέο υλικό. Στην περίπτωσή μας, το χώμα, όπως το ορίσαμε, αποτελείται από 7 στοιχεία, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.12.
4. Ακολούθως, το πρόγραμμα μας παρέχει την δυνατότητα να ορίσουμε την σύσταση του νέου υλικού, είτε εισάγοντας τον χημικό (στοιχειομετρικό) τύπο του υλικού μας, είτε εισάγοντας την κατά βάρος ισοτοπική σύσταση

του. Πληκτρολογούμε “2” για την επιλογή “Enter fraction by weight for each element”.

5. Ακολούθως, μας ζητείται να εισάγουμε για κάθε στοιχείο χωριστά τον ατομικό αριθμό του και την κατά βάρος συγκέντρωσή του στο υλικό, όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12. Σημειώνεται ότι τα δύο αυτά δεδομένα, για κάθε στοιχείο, τα εισάγουμε ξεχωριστά. Για παράδειγμα, για το υδρογόνο (Η), πληκτρολογούμε ξεχωριστά τα στοιχεία “1”, για το ατομικό του βάρος και “2.099”, για την ισοτοπική σύσταση. Έτσι, για τα επτά στοιχεία που αποτελούν το χώμα μας, έχουμε τα εξής δεδομένα, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.12:

Στοιχείο		Ατομικός Αριθμός Z	Ισοτοπική σύσταση (% κ.β.)
ΥΔΡΟΓΟΝΟ	H	1	**2.099**
ΟΞΥΓΟΝΟ	O	8	**56.690**
ΑΡΓΙΛΙΟ	Al	13	**6.992**
ΠΥΡΙΤΙΟ	Si	14	**23.722**
ΚΑΛΙΟ	K	19	**3.095**
ΑΣΒΕΣΤΙΟ	Ca	20	**3.095**
ΣΙΔΗΡΟΣ	Fe	26	**4.307**
ΣΥΝΟΛΟ			100.000

6. Σε κάθε ερώτηση αναφορικά με το αν επιθυμούμε να αλλάξουμε τα μεγέθη που υπολόγισε το πρόγραμμα, πληκτρολογούμε “2” για την επιλογή “no”.
7. Εισάγουμε την πυκνότητα του υλικού μας (g/cm^3), όπως αυτή προκύπτει, για κάθε στρώμα χώματος, από τον Πίνακα 4.13.
8. Τέλος, πληκτρολογούμε το όνομα του αρχείου του νέου υλικού, το οποίο προτιμούμε να είναι το ίδιο με το όνομα που δώσαμε στο υλικό μας, για παράδειγμα “soil_135.mat”.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

- Αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής των δεδομένων για τα στοιχεία που αποτελούν το υλικό μας, βάσει αυτών, το πρόγραμμα εμφανίζει συγκεντρωτικά την σύσταση του νέου υλικού. Η επεξήγηση των αποτελεσμάτων αυτών παρουσιάζεται στο Παράρτημα 6.

Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία και για τα οκτώ στρώματα του χώματος, όπως τα ορίσαμε στον Πίνακα 4.13. Για την περιγραφή του προβλήματος, πέραν των οκτώ νέων υλικών, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον δύο υλικά, ο αέρας και ο ανθρώπινος ιστός. Τα αρχεία δεδομένων των υλικών, στα οποία υπάρχουν τα στοιχεία των υλικών είναι το air.mat και το tissue.mat. Τα αρχεία αυτά, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3, προέκυψαν με εκτέλεση του material.exe και επιλογή από τον διαθέσιμο πίνακα υλικών [Παράρτημα 2] των υλικών "104 Air, dry (near sea level)" και "262 Tissue, soft (ICRP)", αντίστοιχα.

Το αρχείο υλικών που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα για την προσομοίωση είναι το soil_tissue_1.mat, στο οποίο περιέχονται τα αρχεία για το χώμα, τον αέρα και τον ιστό, αριθμώντας τα υλικά από κάτω προς τα πάνω, όπως θα περιγράψουμε στην επόμενη παράγραφο, στην περιγραφή της γεωμετρίας μας. Το αρχείο αυτό προέκυψε από ενοποίηση των παραπάνω δέκα αρχείων με χρήση της εντολής:

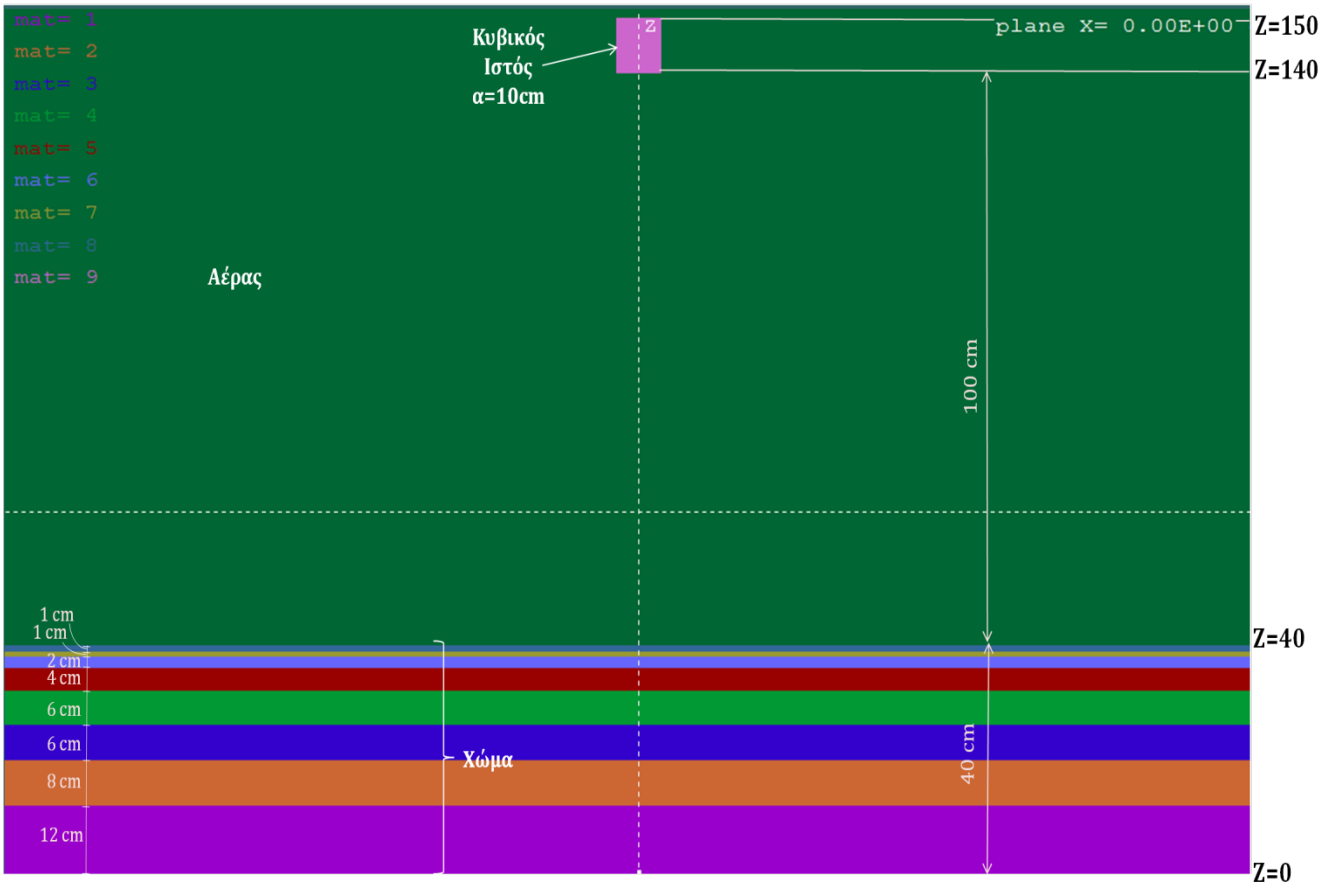
```
>copy soil_135+ soil_130+ soil_133+ soil_137+ soil_134+ soil_128+ soil_102+
soil_110+tissue.mat+air.mat soil_tissue_1.mat
```

4.3.2.2. Αρχείο γεωμετρίας .geo

Η διάταξη του προβλήματός μας αποτελείται από οκτώ διαδοχικά στρώματα χώματος, διαφορετικού ύψους το κάθε στρώμα, όπως καθορίστηκαν βάσει του προφίλ πυκνότητας στον Πίνακα 4.13, μέχρι το βάθος των 40 cm. Σε κατακόρυφη απόσταση 1 m (100cm) από την επιφάνεια του χώματος τοποθετούμε ένα κύβο από ιστό, ακμής 10 cm, ο οποίος θα αποτελέσει τον ανιχνευτή δόσης (dose enclosure). Επιπλέον, όλος ο κενός χώρος καλύπτεται από αέρα. Στο τέλος του Κεφαλαίου, παρουσιάζεται το αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας, το οποίο ονομάζουμε soil_tissue_1.geo [Σχήμα 4.11].

Παρατηρούμε ότι, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο και έγινε κατανοητό και από την εντολή ενοποίησης των αρχείων υλικών, τα υλικά και τα σώματα της γεωμετρίας επιλέγουμε να τα αριθμήσουμε από κάτω προς τα πάνω. Δηλαδή, ως body 1 και material 1 ορίζουμε το κατώτερο στρώμα χώματος, διαδοχικά λαμβάνουμε ως body 2 - material 2 έως και body 8 - material 8 τα υπόλοιπα στρώματα χώματος, body 9 - material 9 θεωρούμε τον ιστό και body 10 - material 10 τον αέρα.

Ακολούθως, παρατίθεται η απεικόνιση του αρχείο γεωμετρίας, μέσω του προγράμματος gview2d, όπου σημειώνονται τα δέκα διαφορετικά υλικά της διάταξης, και σώματα αντίστοιχα, καθώς και τα μεγέθη της γεωμετρίας μας. Στο επίπεδο. Όλη η διάταξη του προβλήματος βρίσκεται στον θετικό ημιάξονα z, καθώς το επίπεδο z=0 βρίσκεται στην βάση των οκτώ στρωμάτων χώματος, όπως φαίνεται στην ακόλουθη απεικόνιση.



Σχήμα 4.12. Γραφική απεικόνιση αρχείου γεωμετρίας soil_tissue_1.geo

Η γραφική απεικόνιση του αρχείου γεωμετρίας πραγματοποιείται με το πρόγραμμα gview2d. Στην απεικόνιση της γεωμετρίας του προβλήματος, παρουσιάζονται, στο κάτω μέρος, τα οκτώ διαδοχικά στρώματα του χώματος. Το ανοιχτό μωβ χρώμα αντιστοιχεί στον ανθρώπινο ιστό, ενώ με σκούρο πράσινο χρώμα παριστάνεται ο αέρας, που πληροί όλο τον κενό χώρο πάνω από το χώμα και γύρω από τον ιστό.

4.3.2.3. Αρχείο εισόδου .in

Το αρχείο εισόδου των δεδομένων, όπως το συντάξαμε, παρατίθεται στο τέλος του Κεφαλαίου [Σχήμα 4.13]. Στον ιστό κυβικού σχήματος της γεωμετρίας μας (body 9) θεωρείται ανιχνευτής δόσης (Dose Enclosure), στο

κέντρο του οποίου υπολογίζεται η δόση, καθώς δεν θεωρούνται επιμέρους διαμερίσεις του ανιχνευτή δόσης. Υπενθυμίζεται ότι δεν χρησιμοποιείται ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας. Επίσης, ορίζουμε ημιγωνία εκπομπής των φωτονίων (beam aperture) ίση με 180°, ούτως ώστε η πηγή να εκπέμπει σφαιρικά, σε 360°, και να λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι σκεδάσεις και οπισθοσκεδάσεις της ακτινοβολίας. Η πηγή φωτονίων, λοιπόν, εκπέμπει τα φωτόνια σφαιρικά και ισότροπα.

Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παράγονται μία σειρά από αρχεία αποτελεσμάτων. Το αρχείο που θα μας απασχολήσει, καθώς παρέχει τον υπολογισμό της δόσης, είναι το pm_2d_dose.dat ή pm_3d_dose.dat. Τονίζεται πως στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ τα δύο αυτά αρχεία δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, καθώς δεν εισάγουμε πλέγμα υπολογισμού της δόσης στον ανιχνευτή δόσης.

4.3.3. Προσομοιώσεις

Με σκοπό τον υπολογισμό της δόσης εξαιτίας της ύπαρξης ^{137}Cs μέσα στο έδαφος, πραγματοποιήσαμε ένα πλήθος προσομοιώσεων, θεωρώντας διαδοχικά κυλινδρικές πηγές φωτονίων μεταβλητού ύψους, μέσα στον όγκο του χώματος, ξεκινώντας από την επιφάνεια του εδάφους, μέχρι του βάθους των 40cm. Η θεώρηση των κυλινδρικών πηγών έγινε με τον εξής περιορισμό: το ύψος κάθε κυλίνδρου να είναι τέτοιο ώστε η πηγή να περιέχεται κάθε φορά σε ένα μόνο body. Επιπλέον, δεν επιλέξαμε να έχουμε ύψος κυλίνδρου μεγαλύτερο των 4 cm, αφενός μεν για οικονομία υπολογιστικού χρόνου και εξασφάλιση στατιστικής ακρίβειας, αφετέρου δε για να έχουμε μεγαλύτερη ευελιξία στην μετέπειτα προσαρμογή των αποτελεσμάτων σε διάφορες κατά βάθος κατανομές του ^{137}Cs, όπως θα εξηγήσουμε στο Κεφάλαιο 5. Για τον λόγο αυτό, ειδικότερα στα πρώτα 4 cm χώματος, έχουμε θεωρήσει ακόμη μικρότερα ύψη κυλίνδρου, που δεν ξεπερνούν το 1 cm.

Σύμφωνα, λοιπόν, με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, θεωρούμε διαδοχικά τις **δεκαέξι κυλινδρικές πηγές** που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

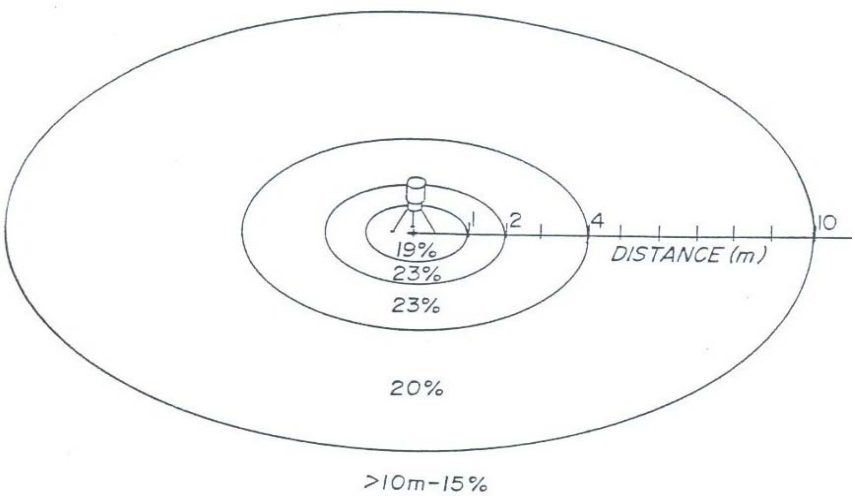
Βάθος (cm)	Κυλινδρική πηγή (cm)
0-1	0.0-0.25
	0.25-1.0
1-2	1.0-2.0
2-4	2.0-3.0
	3.0-4.0
4-8	4.0-6.0
	6.0-8.0
8-14	8.0-11.0
	11.0-14.0
14-20	14.0-17.0
	17.0-20.0
20-28	20.0-24.0
	24.0-28.0
28-40	28.0-32.0
	32.0-36.0
	36.0-40.0

Πίνακας 4.14. Κατά βάθος κατανομή πυκνότητας χώματος για κάθε μία κυλινδρική πηγή, όπως θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς της παρούσας ΔΕ

Σε κάθε νέα προσομοίωση, όλα τα δεδομένα του προβλήματος παραμένουν αμετάβλητα, πλην του ύψους της κυλινδρικής πηγής. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, έχουμε τροποποιήσει τον κώδικα, ώστε να ορίζει κυλινδρική πηγή και όχι σημειακή και τον καλούμε πλέον CPENMAIN [Σχήμα 4.7]. Έτσι, σε κάθε νέα προσομοίωση, πρέπει μόνο να πραγματοποιείται διόρθωση του τμήματος του κώδικα χρήστη PENMAIN όπου ορίζεται η πηγή φωτονίων και συγκεκριμένα της εντολής **Z=RAND(3.0D0)*0.25D0+39.75D0**. Η εντολή αυτή προσδιορίζει το ύψος του κυλίνδρου και την θέση της κάτω βάσης του, υπολογίζοντας από το επίπεδο z=0. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι για κάθε νέο κώδικα CPENMAIN είναι απαραίτητο να δημιουργήσουμε και το νέο εκτελέσιμο αρχείο cpenmain.exe, το οποίο θα αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο κύλινδρο.

Επίσης, η πηγή θεωρήθηκε ότι έχει ακτίνα R=10 m (1000 cm). Η επιλογή μεγαλύτερης ακτίνας θα έχει ως αποτέλεσμα την επιμήκυνση της διάρκειας προσομοίωσης προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Άλλωστε, σύμφωνα με τους Miller and Shebell (1993), η συνεισφορά στην ροή παρθενικών φωτονίων ενέργειας 662 keV, σε ύψος 1 m

επάνω από το έδαφος, για «τυπική» κατά βάθος κατανομή ^{137}Cs, για ακτίνα μεγαλύτερη των 10 m, είναι 15% [Σχήμα 4.14]. Αυτό είναι συμβατό και με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δισκοειδούς πηγής διαφόρων διαμέτρων που έγιναν στα πλαίσια της ΔΕ και παρουσιάσθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Επιπλέον, συνυπολογίζοντας την εξασθένηση της ακτινοβολίας στον αέρα και την αυτοαπορρόφηση της ακτινοβολίας στο έδαφος, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι πολύ μικρή η πιθανότητα ένα φωτόνιο, το οποίο εκπέμπεται από ακτίνα μεγαλύτερη των 10 m και από βάθος, ή δευτερογενής ακτινοβολία, παραγόμενη σε ακτίνα μεγαλύτερη των 10 m, να καταλήξει στον ανιχνευτή. Καταλήγουμε, λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι η συνεισφορά στην συνολική ροή φωτονίων (παρθενικά και μη) στο δεδομένο σημείο, για ακτίνα μεγαλύτερη των 10 m, είναι ακόμη μικρότερη του 15%. Εκτιμάται δε ότι και η δόση εξαιτίας των φωτονίων αυτών θα είναι της ίδιας τάξης.



Σχήμα 4.14. Συνεισφορά στην ροή παρθενικών φωτονίων ενέργειας 662 keV, σε ύψος 1 m από το έδαφος, για τυπική κατανομή πηγής ^{137}Cs.

Η προσομοίωση γίνεται με εκτέλεση της εντολής:

>cpenmain.exe<soil_tissue_1.in

4.3.3.1. Επαλήθευση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

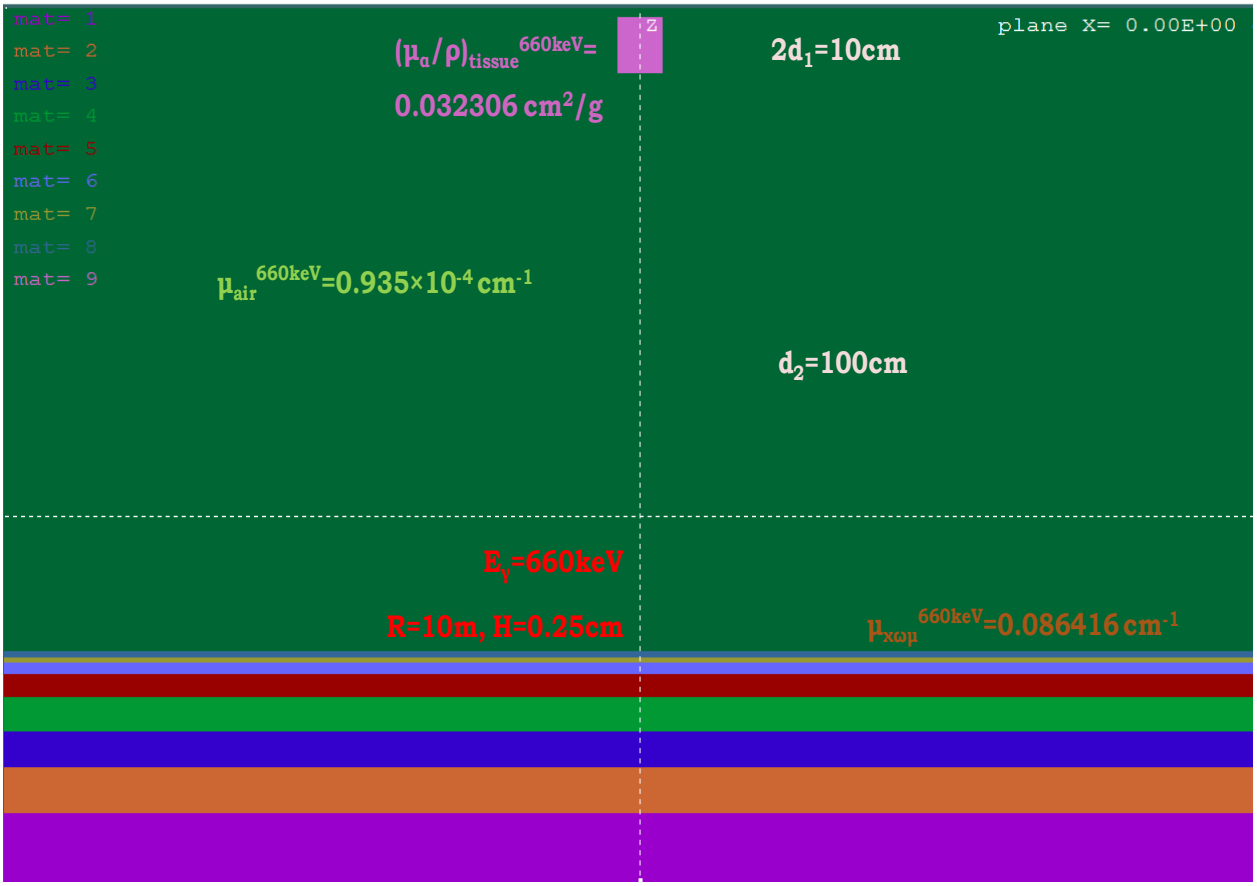
Προκειμένου να επαληθεύσουμε τις τιμές δόσης που προκύπτουν από τα αρχεία εξόδου του ανιχνευτή δόσης, εφαρμόζουμε, για τα δεδομένα του προβλήματος που εξετάσαμε, την θεωρητική σχέση υπολογισμού της δόσης εξαιτίας κυλινδρικής πηγής φωτονίων (2.5):

$$D = \frac{E_\gamma}{2V_\pi} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{p}\right)_{\alpha\pi o\rho.} \times \int_0^H \int_0^R \frac{e^{-\mu_{air}\sqrt{d_2^{\,2}+\left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2+h}\right)^2} - \mu_{\chi\omega\mu}\left(\sqrt{(d_2+h)^2+r^2} - \sqrt{d_2^{\,2}+\left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2+h}\right)^2}\right)}}{(d_1+d_2+h)^2+r^2} \times r \times dr \times dh$$

(eV/(g·φωτόνιο))

Το πρόβλημα που μελετήθηκε είναι ο υπολογισμός της δόσης, εξαιτίας ισότροπης κυλινδρικής πηγής φωτονίων ενέργειας 660 keV, σε κυβικό ιστό, ακμής 10 cm, ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση 1 m από την επιφάνεια της πηγής. Εφαρμόσαμε, λοιπόν, την σχέση (2.5), για την πρώτη κυλινδρική πηγή που προσομοιώνουμε, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.14, η οποία έχει ακτίνα R=1000 cm και ύψος H=0.25cm. Η πηγή αυτή περιέχεται στο πρώτο στρώμα χώματος της γεωμετρίας μας, το οποίο αντιστοιχεί στο υπ' αριθμόν 8 υλικό.

Τα απαιτούμενα μεγέθη για την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης, παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.15. Χαρακτηριστικά μεγέθη της διάταξης του προβλήματός μας.

Στην παραπάνω, λοιπόν, σχέση υπολογισμού της δόσης (2.5), θεωρούμε τους ακόλουθους δύο όρους, ως εξής:

Καταρχήν, απομονώνουμε όλους τους σταθερούς όρους, υπολογίζοντας το γινόμενο:

$$F = \frac{E_\gamma}{2V_\pi} \times \left(\frac{\mu_\alpha}{\rho} \right)_{tissue}$$

όπου, σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί προηγουμένως, είναι:

- E_γ = 660000 eV
- $V_\pi = \pi R^2 \times H \Rightarrow V_\pi = 10^6\pi \times 0.25 \Rightarrow V_\pi = 250000\pi$ cm^3
- $(\mu_\alpha/\rho)_{tissue} = 3.2306\times10^{-2}$ cm^2/g

και, επομένως, προκύπτει: F = 1.3574×10^{-2} eV/(g·cm·φωτόνιο))

Επιπλέον, υπολογίζουμε, με χρήση κατάλληλου υπολογιστικού προγράμματος (Mathcad 14), όπως παρουσιάζεται στην συνέχεια, το ολοκλήρωμα:

$$I = \int_0^H \int_0^R \frac{e^{-\mu_{air}\sqrt{d_2^{\,2} + \left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2 + h}\right)^2} - \mu_{\chi\omega\mu}\left(\sqrt{(d_2+h)^2 + r^2} - \sqrt{d_2^{\,2} + \left(\frac{d_2 \cdot r}{d_2 + h}\right)^2}\right)}}{(d_1 + d_2 + h)^2 + r^2} \times r \times dr \times dh$$

όπου, σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί προηγουμένως, είναι:

- R = 1000 cm
- H = 0.25 cm
- d_1 = 5 cm
- d_2 = 100 cm
- $\mu_{air} = 0.935\times10^{-4}$ cm^{-1}

- Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του πρώτου στρώματος χώματος $\mu_{χωμ}$, προκύπτει από την εκτέλεση του εκτελέσιμου αρχείου table.exe, για το αρχείο υλικού .mat που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο στρώμα χώματος, για φωτόνια ενέργειας 660 keV. Προκύπτει:

  $\mu_{χωμ} = 8.6416\times10^{-2}$ cm^{-1}

Συνεπώς, αντικαθιστώντας στο παραπάνω ολοκλήρωμα, προκύπτει:

I = 0.522 cm.

Επομένως, τελικά, η δόση εξαιτίας κυλινδρικής πηγής ακτίνας 10 m και ύψους 0.25 cm, προκύπτει, σύμφωνα με την θεωρητική σχέση (4.2), ίση με:

$$\mathbf{D_{th} = 7.085628\times10^{-3}\ (eV/(g\cdot φωτόνιο))}$$

Από το αρχείο εξόδου των αποτελεσμάτων του ανιχνευτή δόσης, pm_3d_dose.dat, λαμβάνουμε την τιμή της δόσης (± 1σ) όπως υπολογίστηκε από την προσομοίωση στο κέντρο του κυβικού ιστού:

$$\mathbf{D_{DE} = 7.58606\times10^{-3}\ \pm\ 2.1\%\ (eV/(g\cdot φωτόνιο))}$$

Η απόκλιση των δύο τιμών υπολογίζεται ίση με:

$$\frac{7.085628\times10^{-3} - 7.58606\times10^{-3}}{7.085628\times10^{-3}}\times100 = \mathbf{-7.06\%}$$

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα αποτελέσματα θεωρητικού υπολογισμού και προσομοίωσης δεν διαφέρουν ιδιαίτερα, αν και φαίνεται ότι η διαφορά είναι στατιστικά σημαντική. Επισημαίνεται, βέβαια, ότι για τα αποτελέσματα του θεωρητικού υπολογισμού δεν έχει εκτιμηθεί αβεβαιότητα.

4.3.3.2. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία και αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις. Οι τιμές αυτές λαμβάνονται από τα αρχεία αποτελεσμάτων penmain.dat και pm_2d_dose.dat ή pm_3d_dose.dat.

Ύψος Πηγής (cm)	Χρόνος Προσομοίωσης (sec)*	Αριθμός Ιστοριών (φωτόνια)	Δόση (eV/(g·φωτόνιο))	Αβεβαιότητα (1σ) (%)
0.0-0.25	4.28E+05	1.06E+08	**7.59E-03**	2.11
0.25-1.0	4.62E+05	1.14E+08	**6.83E-03**	2.15
1.0-2.0	4.52E+05	1.69E+08	**5.86E-03**	1.88
2.0-3.0	4.46E+05	1.67E+08	**5.06E-03**	1.98
3.0-4.0	3.52E+05	1.31E+08	**4.16E-03**	2.25
4.0-6.0	4.35E+05	1.04E+08	**3.44E-03**	3.00
6.0-8.0	6.13E+05	1.36E+08	**2.53E-03**	2.90
8.0-11.0	4.24E+05	1.57E+08	**1.87E-03**	3.04
11.0-14.0	7.76E+05	2.86E+08	**1.32E-03**	2.78
14.0-17.0	1.35E+06	3.11E+08	**9.55E-04**	3.00
17.0-20.0	9.58E+05	3.62E+08	**6.35E-04**	3.25
20.0-24.0	9.92E+05	3.87E+08	**4.68E-04**	3.56
24.0-28.0	1.47E+06	6.01E+08	**3.35E-04**	3.48
28.0-32.0	7.77E+05	3.43E+08	**2.07E-04**	5.62
32.0-36.0	1.01E+06	3.29E+08	**1.41E-04**	7.10
36.0-40.0	7.03E+05	3.00E+08	**9.46E-05**	8.46

Πίνακας 4.15. Πληροφορίες και αποτελέσματα προσομοιώσεων

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

Σημειώνεται ότι, ενώ έχουμε θεωρήσει μόνο το ένα τεταρτημόριο της κυλινδρικής πηγής, δεν απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων, καθώς οι τιμές της δόσης είναι ανηγμένες στον συνολικό αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή που έχουμε ορίσει. Έτσι, και λόγω συμμετρίας, αν αντί για ένα μόνο τεταρτημόριο είχα ολόκληρο τον κύλινδρο, ναι μεν η δόση θα ήταν τετραπλάσια, αλλά και ο αριθμός των συνολικά εκπεμπομένων φωτονίων θα ήταν τετραπλάσιος. Επομένως, το τελικό αποτέλεσμα της δόσης, όπως αυτό προκύπτει από τα αρχεία αποτελεσμάτων, θα ήταν το ίδιο.

4.3.4. Υπολογισμός ρυθμού δόσης βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Οι συντελεστές δόσης που προκύπτουν από την προσομοίωση PENELOPE, με χρήση του ανιχνευτή δόσης, υπολογίζονται σε (eV/(g·φωτόνιο)). Το επόμενο βήμα είναι να προσδιορισθούν συντελεστές υπολογισμού του ρυθμού δόσης ανά μονάδα συγκέντρωσης του ^{137}Cs στο έδαφος, δηλαδή:

$$nGy \cdot h^{-1}/Bq \cdot kg^{-1}$$

* Οι χρόνοι αναφέρονται σε Η/Υ τύπου Genuine Intel(R), 1.60GHz, 1.00GB RAM.

Για τον σκοπό αυτό, ακολουθούμε τους παρακάτω συλλογισμούς.

Σύμφωνα με τον Λεωνίδου (1984), ισχύει η ισοδυναμία:

$$1\ \text{MeV} = 1.6021892 \times 10^{-13}\ \text{J} \Rightarrow 10^{6}\ \text{eV} = 1.6021892 \times 10^{-13}\ \text{J} \Rightarrow$$

$$1\ \text{eV} = 1.6021892 \times 10^{-19}\ \text{J} \Rightarrow 1\ \frac{eV}{g \times \varphi\omega\tau} = 1.6021892 \times 10^{-19}\ \frac{J}{g \times \varphi\omega\tau}$$

$$\Rightarrow 1\ \frac{eV}{g \times \varphi\omega\tau} = 1.6021892 \times 10^{-16}\ \frac{J}{kg \times \varphi\omega\tau}$$

Όμως, επειδή 1 Gy = 1 J/kg, η τελευταία ισοδυναμία γίνεται:

$$1\ \frac{eV}{g \times \varphi\omega\tau} = 1.6021892 \times 10^{-16}\ \frac{Gy}{\varphi\omega\tau} \Rightarrow 1\ \frac{eV}{g \times \varphi\omega\tau} = 1.6021892 \times 10^{-7}\ \frac{nGy}{\varphi\omega\tau} \quad \text{(i)}$$

Επιπλέον, γνωρίζουμε ότι από μία διάσπαση ενός ραδιενεργού ισοτόπου εκπέμπονται τόσα φωτόνια, όσο το ποσοστό εκπομπής (yield) του συγκεκριμένου ισοτόπου. Συνεπώς, τα φωτόνια που εκπέμπονται από μία πηγή, δηλαδή οι ιστορίες που προσομοιώνονται, ισούνται με το γινόμενο των συνολικών διασπάσεων που πραγματοποιούνται επί το ποσοστό εκπομπής του ισοτόπου, δηλαδή:

Φωτόνια = Διασπάσεις × yield *ή* Ιστορίες = Διασπάσεις × yield

Όμως, επειδή 1 Bequerel = 1 Διάσπαση/sec, έχουμε:

$$1\ \text{Bq} = \frac{Ιστορίες/yield}{sec} \Rightarrow 1\ \text{Bq} \times \text{sec} = Ιστορίες/yield$$

όπου το ποσοστό εκπομπής φωτονίων του ^{137}Cs είναι ίσο με 84.99%.

Άρα, τελικά:

Φωτόνια = Bq × sec × 0.8499 (ii)

Οπότε, από τις σχέσεις (i) και (ii), προκύπτει ότι:

$$1\ \frac{eV}{g \times \varphi\omega\tau} = \frac{1.6021892 \times 10^{-7}}{0.8499}\ \frac{nGy}{Bq \times sec}$$

Πολλαπλασιάζοντας την τελευταία σχέση με τη μάζα του κυλινδρικού στρώματος χώματος, έχουμε την τελική σχέση μετατροπής της δόσης είναι:

$$1\left(\frac{eV}{g \times \phi\omega\tau}\right) = \frac{1.6021892 \times 10^{-7} \times 3600}{0.8499} \times m\left(\frac{nGy/h}{Bq/kg}\right) \quad (4.1)$$

Σε αυτήν την σχέση, η μάζα του κυλίνδρου υπολογίζεται ως ακολούθως:

$m = V\ (cm^3) \times \rho\ (g/cm^3) \Rightarrow m = V_{cyl}\ (cm^3) \times \rho\ (g/cm^3) \Rightarrow$

$\Rightarrow m = \pi R^2\ (cm^2) \times H\ (cm) \times \rho\ (g/cm^3) \Rightarrow m = 10^6 \times \pi \times H \times \rho\ (g) \Rightarrow$

$\Rightarrow m(kg) = 10^3 \times \pi \times H(cm) \times \rho\ (g/cm^3)$

Με βάση, λοιπόν, την σχέση μετατροπής (4.1) που προσδιορίσαμε, ο Πίνακας 4.15, μετατρέπεται ως ακολούθως:

Ύψος Πηγής (cm)	**Πυκνότητα (g/cm³)**	**Όγκος Πηγής (cm³)**	**Μάζα Πηγής (kg)**	**Δόση (eV/(g·φωτόνιο))**	**Δόση $\left(\frac{nGy/h}{Bq/kg}\right)$**
0.25	1.10	785398	864	7.59E-03	**4.45E-03**
0.75	1.10	2356194	2592	6.83E-03	**1.20E-02**
1.00	1.02	3141593	3204	5.86E-03	**1.27E-02**
1.00	1.28	3141593	4021	5.06E-03	**1.38E-02**
1.00	1.28	3141593	4021	4.16E-03	**1.13E-02**
2.00	1.34	6283185	8419	3.44E-03	**1.97E-02**
2.00	1.34	6283185	8419	2.53E-03	**1.44E-02**
3.00	1.37	9424778	12912	1.87E-03	**1.64E-02**
3.00	1.37	9424778	12912	1.32E-03	**1.16E-02**
3.00	1.33	9424778	12535	9.55E-04	**8.13E-03**
3.00	1.33	9424778	12535	6.35E-04	**5.41E-03**
4.00	1.30	12566371	16336	4.68E-04	**5.19E-03**
4.00	1.30	12566371	16336	3.35E-04	**3.72E-03**
4.00	1.35	12566371	16965	2.07E-04	**2.39E-03**
4.00	1.35	12566371	16965	1.41E-04	**1.62E-03**
4.00	1.35	12566371	16965	9.46E-05	**1.09E-03**

Πίνακας 4.16. Πίνακας προσδιορισμού των συντελεστών μετατροπής της συγκέντρωσης του ^{137}Cs στο έδαφος σε ρυθμό δόσης για διάφορα στρώματα εδάφους.

Η τελευταία στήλη του Πίνακα δίνει μία σειρά από συντελεστές ανηγμένης δόσης ($nGy \cdot h^{-1}/Bq \cdot kg^{-1}$) για κάθε ένα στρώμα χώματος. Για τον

υπολογισμό της δόσης εξαιτίας ενός συγκεκριμένου στρώματος χώματος, στο οποίο είναι γνωστή η ραδιενέργεια ^{137}Cs ($Bq \cdot kg^{-1}$) αρκεί να υπολογισθεί το γινόμενο του αντίστοιχου συντελεστή μετατροπής (ανηγμένη δόση) με τη ραδιενέργεια του χώματος στο υπόψη στρώμα χώματος. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ρυθμού δόσης εξαιτίας καθενός στρώματος χώματος και εν τέλει, με μία απλή άθροιση, για τον υπολογισμό του συνολικού ρυθμού δόσης εξαιτίας του συνολικού ^{137}Cs που υπάρχει στο χώμα. Εξυπακούεται ότι οι συντελεστές αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιαδήποτε κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs στο έδαφος, για την εκτίμηση της συνολικής δόσης εξαιτίας όλης της στήλης του εδάφους, μέχρι βάθους 40cm και για ακτίνα 10m. Στο 5ο Κεφάλαιο που ακολουθεί επιχειρείται η εκτίμηση της συνολικής δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs το οποίο έχει μεταναστεύσει κατακόρυφα μέσα στο έδαφος και ακολουθεί μία συγκεκριμένη κατά βάθος κατανομή.

ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

```
C
C  ***********  Set the initial state of the primary particle.
C
      IF(ISORP.EQ.0) THEN
C  ****  Point source.
         SHN=SHN+1.0D0
         N=N+1
         IF(N.GT.2000000000) N=N-2000000000
         KPAR=KPARP
         WGHT=WGHT0
C  ----  Initial position ...
         X=SX0
         Y=SY0
         Z=SZ0
```

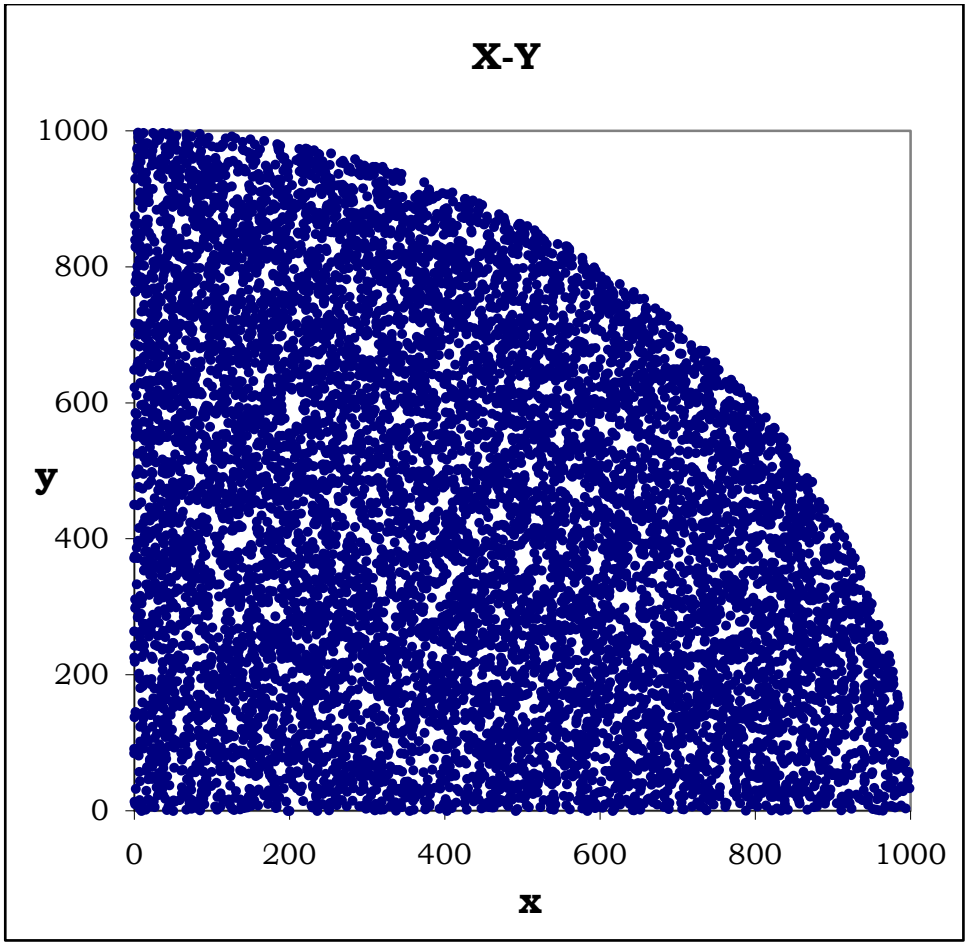
Σχήμα 4.6. Τμήμα κώδικα PENMAIN όπου ορίζεται η σημειακή πηγή.

```
C
C  ***********  Set the initial state of the primary particle.
C
      IF(ISORP.EQ.0) THEN
C  ****  Point source.
         SHN=SHN+1.0D0
         N=N+1
         IF(N.GT.2000000000) N=N-2000000000
         KPAR=KPARP
         WGHT=WGHT0
C  ----  Initial position ...
         RR2=1000D0*1000D0
 4444    X=RAND(1.0D0)*1000D0
         Y=RAND(2.0D0)*1000D0
         RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
         IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
         Z=RAND(3.0D0)*0.25D0+39.75D0
```

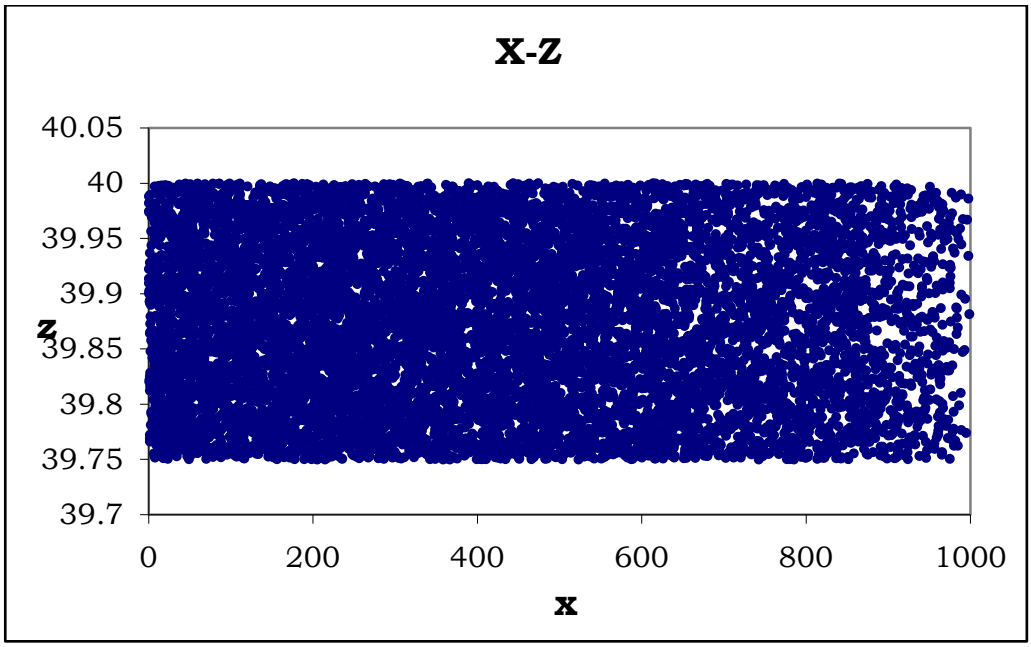
Σχήμα 4.7. Τροποποιημένο τμήμα κώδικα PENMAIN όπου ορίζεται η κυλινδρική πηγή.

```
      PROGRAM SOURCE
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

      RR=1000D0
      RR2=RR**2.0D0
      OPEN(1, FILE='random.dat')
      DO I=1,10000
4444  X=RAND(1.0D0)*RR
      Y=RAND(2.0D0)*RR
      SUM=X**2.0D0+Y**2.0D0
      IF(SUM.GT.RR2)GOTO 4444
      Z=RAND(3.0D0)*0.25D0+39.75D0

      WRITE(1,*)X,Y,Z
      ENDDO

      CLOSE (1)

      STOP
      END
```

Σχήμα 4.8. Βοηθητικός κώδικας ελέγχου της τυχαιότητας της κυλινδρικής πηγής.



Σχήμα 4.9. Έλεγχος ομοιομορφίας κατανομής των θέσεων των σωματιδίων στο επίπεδο X-Y.



Σχήμα 4.10. Έλεγχος ομοιομορφίας κατανομής των θέσεων των σωματιδίων στο επίπεδο X-Z.

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
CYLINDER SOURCE + SOIL LAYER 40cm + DOSE ENCLOSURE
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)   Plane Z=0.00
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)   Plane Z=12
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 1.200000000000000E+01,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3)   Plane Z=20
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 2.000000000000000E+01,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4)   Plane Z=26
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 2.600000000000000E+01,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5)   Plane Z=32
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 3.200000000000000E+01,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6)   Plane Z=36
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 3.600000000000000E+01,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)   Plane Z=38
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 3.800000000000000E+01,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8)   Plane Z=39
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 3.900000000000000E+01,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9)   Plane Z=40
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 4.000000000000000E+01,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  10)   Plane Z=140
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 1.400000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  11)   Plane Z=150
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 1.500000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  12)   Plane Y=5.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(-5.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  13)   Plane Y=-5.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(+5.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  14)   Plane X=-5.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(+5.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

```
SURFACE (  15)   Plane X=5.00
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,  0)
     A0=(-5.000000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)   soil 1.35 (28-40cm)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   2)   soil 1.30 (20-28cm)
MATERIAL(   2)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   3)   soil 1.33 (14-20cm)
MATERIAL(   3)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   4)   soil 1.37 (8-14cm)
MATERIAL(   4)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   5)   soil 1.34 (4-8cm)
MATERIAL(   5)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   6)   soil 1.28 (2-4cm)
MATERIAL(   6)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   7)   soil 1.02 (1-2cm)
MATERIAL(   7)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   8)   soil 1.10 (0-1cm)
MATERIAL(   8)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   9)   tissue
MATERIAL(   9)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  14), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (  10)   air
MATERIAL(  10)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(+1)
BODY    (   9), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Σχήμα 4.11. Αρχείο γεωμετρίας soil_tissue_1.geo

```
TITLE  cylinder source + soil layer 40cm + dose enclosure

       >>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2        [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 0.66e6           [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0                                [Coordinates of the source]
SDIREC 0.0 0.0                    [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180                                          [Beam aperture, in deg]

       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10                      [Number of different materials, .le.10]
SIMPAR 1 0.66e4 0.66e3 0.66e4 0.1 0.1 0.66e4 0.66e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 0.66e4 0.66e3 0.66e4 0.1 0.1 0.66e4 0.66e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 0.66e4 0.66e3 0.66e4 0.1 0.1 0.66e4 0.66e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 0.66e4 0.66e3 0.66e4 0.1 0.1 0.66e4 0.66e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 0.66e4 0.66e3 0.66e4 0.1 0.1 0.66e4 0.66e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 0.66e4 0.66e3 0.66e4 0.1 0.1 0.66e4 0.66e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 0.66e4 0.66e3 0.66e4 0.1 0.1 0.66e4 0.66e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 0.66e4 0.66e3 0.66e4 0.1 0.1 0.66e4 0.66e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 0.66e4 0.66e3 0.66e4 0.1 0.1 0.66e4 0.66e3     [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 0.66e4 0.66e3 0.66e4 0.1 0.1 0.66e4 0.66e3    [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
PFNAME soil_tissue_1.mat         [Material definition file, 20 chars]

       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN soil_tissue_1.geo         [Geometry definition file, 20 chars]

       >>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    0.66e3 0.66e6 100          [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   90                      [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   1                     [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

       >>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX  -5.0 5.0
GRIDY  -5.0 5.0
GRIDZ   140 150
GRIDBN 1 1 1

       >>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat               [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat                  [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  600                                     [Dumping period, in sec]

TIME   2.0e5                        [Allotted simulation time, in sec]
```

Σχήμα 4.13. Αρχείο εισόδου δεδομένων soil_tissue_1.in

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΟΣΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΟΥ ^{137}Cs ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ, ΓΙΑ ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑ ΒΑΘΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

5.1. Γενικά

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο υπολογίσθηκαν μία σειρά από συντελεστές, (nGy·h^{-1}/Bg·kg^{-1}) οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του ρυθμού απορροφώμενης δόσης σε ανθρώπινο ιστό, 1m από την επιφάνεια του εδάφους, εξαιτίας των φωτονίων ενέργειας 662keV τα οποία εκπέμπονται από το ^{137}Cs, το οποίο βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο στρώμα χώματος μέσα στο έδαφος. Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η προσπάθεια που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ για τον υπολογισμό της συνολικής δόσης η οποία οφείλεται στο ^{137}Cs το οποίο βρίσκεται στο έδαφος και ακολουθεί μία συγκεκριμένη κατά βάθος κατανομή. Ο υπολογισμός αυτός θα βασισθεί στους συντελεστές που έχουν εκτιμηθεί για τα διάφορα στρώματα χώματος.

Πριν προχωρήσουμε στον υπολογισμό της δόσης για μία συγκεκριμένη κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs είναι σκόπιμο να παρατεθούν ορισμένα στοιχεία από τη βιβλιογραφία, σχετικά με την κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs στο έδαφος.

5.2. Κατακόρυφο προφίλ ^{137}Cs στο έδαφος

Η αρχική ποσότητα ^{137}Cs που αποτέθηκε στην επιφάνεια του εδάφους, εξαιτίας του ατυχήματος του Chernobyl, μειώνεται υπό την επίδραση διαφόρων διαδικασιών, όπως η ραδιενεργός απομείωση, η απομάκρυνσή του με την βροχή, η κατακόρυφη μετακίνησή του και η διάχυση σε βαθύτερα στρώματα χώματος.

Καθώς η κατακόρυφη μετακίνηση του ^{137}Cs στο χώμα έχει άμεση επίδραση στην εξωτερική έκθεση του πληθυσμού της περιοχής, πολυάριθμες μελέτες έχουν ασχοληθεί με το φαινόμενο αυτό και έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα για να περιγράψουν την μετακίνηση του ^{137}Cs στο χώμα και να

εξηγήσουν την κατακόρυφη κατανομή του. Η συνήθης μεθοδολογία, όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 2, συνίσταται στην ανάλυση δειγμάτων χώματος από επιμέρους στρώματα, πάχους 1-5cm, τα οποία υφίστανται ειδική επεξεργασία ξήρανσης. Η ποσότητα του ^{137}Cs, σε μονάδες ραδιενέργειας (Bq), σε κάθε τμήμα του δείγματος, καθορίζει την διαφοροποίηση της συγκέντρωσής του με το βάθος, το οποίο καλούμε κατά βάθος προφίλ της ραδιενέργειας του ^{137}Cs.

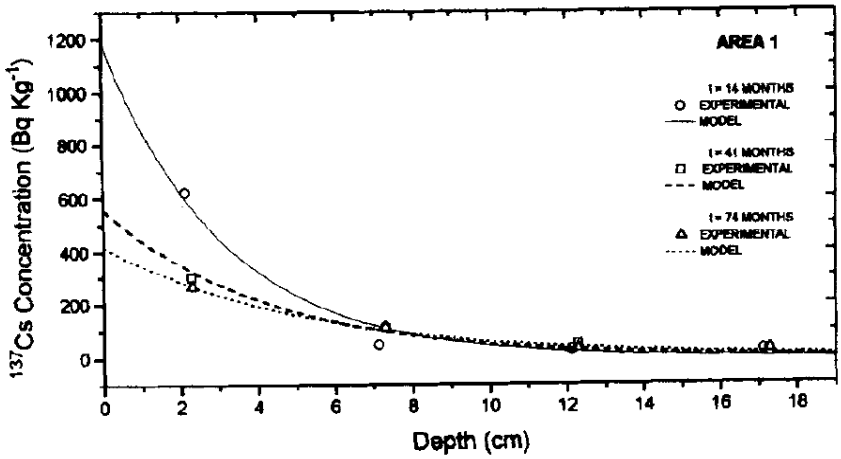
Γενικά, η συγκέντρωση ^{137}Cs στο χώμα, είτε ακολουθεί γνησίως φθίνουσα πορεία με το βάθος, ξεκινώντας από μία μέγιστη τιμή συγκέντρωσης στην επιφάνεια του εδάφους, είτε παρουσιάζει μέγιστο σε βάθος μερικών εκατοστών από τη επιφάνεια. Για να εκφραστεί ποσοτικά η μεταβολή της ραδιενέργειας του ισοτόπου με το βάθος, προσαρμόζονται μαθηματικά μοντέλα στα πειραματικά δεδομένα, για τα οποία περισσότερες λεπτομέρειες δίδονται από τους Smith et al. (1999). Τα μοντέλα τα οποία κυρίως χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του κατακόρυφου προφίλ του ^{137}Cs είναι η κατανομή Weibull, η εκθετική κατανομή και η Gaussian (κανονική) κατανομή. Μολονότι το πλέον χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι αυτό της εκθετικής κατά βάθος κατανομής, σύμφωνα με τους Smith et al. (1999) το απλό εκθετικό μοντέλο είναι το χειρότερα προσαρμοζόμενο από τα τρία μοντέλα.

Σημειώνεται ότι στην βιβλιογραφία η κατανομή του ^{137}Cs παρουσιάζεται είτε σε Bq/m^3 είτε σε Bq/m^2 είτε σε Bq/kg. Επίσης, σε ορισμένες μελέτες, το κατακόρυφο προφίλ του ^{137}Cs εκφράζεται ως ποσοστό της συνολικής ποσότητας του ^{137}Cs στο δεδομένο πεδίο. Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ, εντοπίστηκαν διάφορες προσεγγίσεις και μελέτες για την κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs στο έδαφος. Ορισμένες από αυτές έχουν ήδη παρουσιασθεί στο 2ο Κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάσθηκαν οι μεθοδολογίες εκτίμησης της δόσης λόγω του ^{137}Cs στο έδαφος.

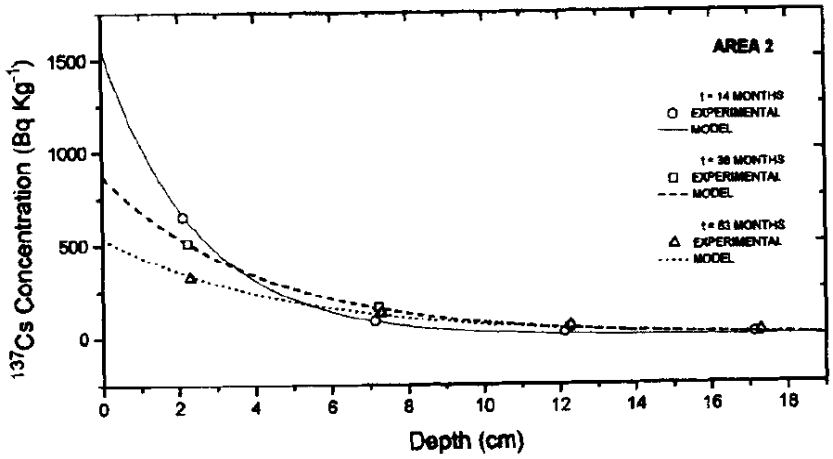
Οι Velasco et al (1997) μελέτησαν την κατακόρυφη μετακίνηση του ^{137}Cs στο χώμα, σε τρεις ορεινές περιοχές της βορειοανατολικής Ιταλίας, όπου η συγκέντρωση ^{137}Cs μετά το ατύχημα του Chernobyl κυμαινόταν από 20 έως 40 kBq/m^2. Για τον σκοπό αυτό, ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο, βασιζόμενο στην υπόθεση ότι η κατακόρυφη κατανομή του ραδιοϊσοτόπου μπορεί να περιγραφεί από μία φθίνουσα εκθετική καμπύλη, συνάρτηση του χρόνου που έχει περάσει από την απόθεση του ισοτόπου στο έδαφος. Από τις περιοχές αυτές, συνέλεξαν παραλληλεπίπεδα δείγματα χώματος, διαστάσεων

30×30cm^2 και βάθους 20 cm, τα οποία χώρισαν οριζοντίως σε επιμέρους στρώματα των 5 cm. Η διαδικασία συλλογής των δειγμάτων έλαβε χώρα περιοδικά από τον Ιούλιο 1987 έως τον Ιούλιο 1992. Τα δείγματα ελήφθησαν με απόσταση τουλάχιστον 1 m, ώστε να αποφευχθούν τυχόν αναμείξεις των δειγμάτων. Τα δείγματα αυτά αναλύθηκαν μέσω γ-φασματοσκοπίας, με χρήση ανιχνευτή HPGe. Το συνολικό ^{137}Cs που μετρήθηκε, διαχωρίστηκε στο προερχόμενο από τις πυρηνικές δοκιμές και σε αυτό από το ατύχημα του Chernobyl, προσδιορίζοντας τον λόγο ^{137}Cs/^{134}Cs και συγκρίνοντας την τιμή του με μελέτες παλαιότερες του 1986.

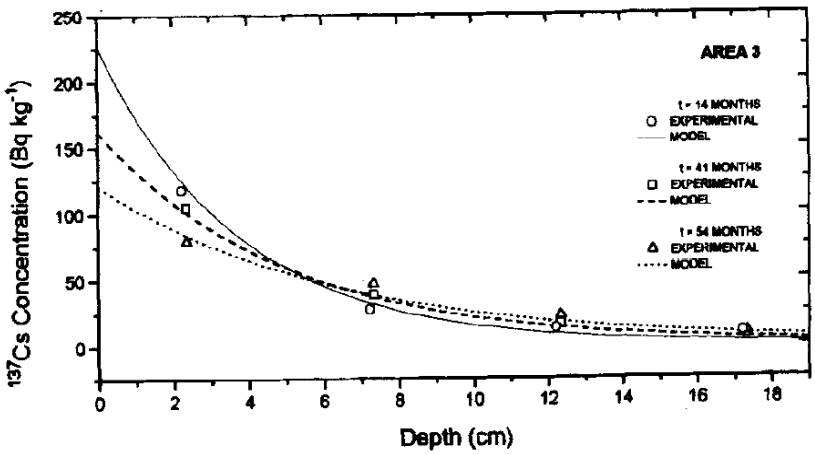
Το Σχήμα 5.1 παρουσιάζει την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του ^{137}Cs, όπως αυτή προσδιορίστηκε για κάθε περιοχή (συνολικά τρεις περιοχές). Οι πειραματικές τιμές και η θεωρητικές καμπύλες δίνονται για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές, ως προς την στιγμή της απόθεσης.



Σχήμα 5.1α. Κατανομή συγκέντρωσης ^{137}Cs στο χώμα [Velasco et al. (1997)].

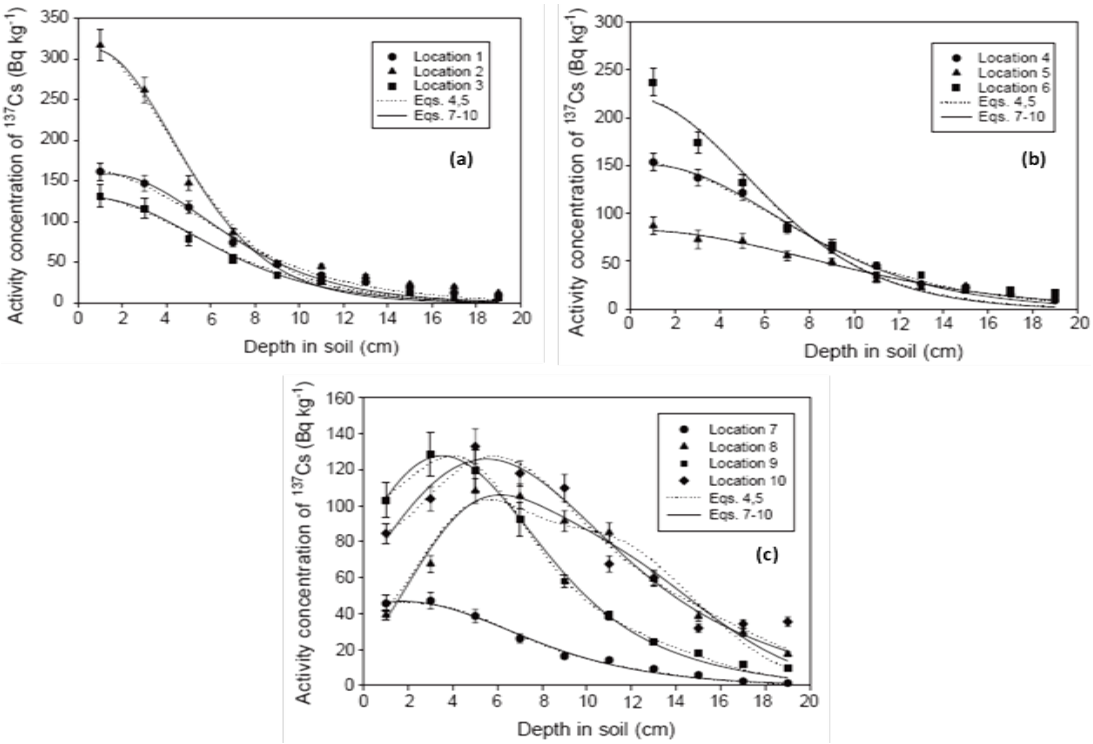


Σχήμα 5.1β. Κατανομή συγκέντρωσης ^{137}Cs στο χώμα [Velasco et al. (1997)].



Σχήμα 5.1γ. Κατανομή συγκέντρωσης ^{137}Cs στο χώμα [Velasco et al. (1997)].

Σε μία άλλη εργασία, οι Krstić et al (2004) μελέτησαν το κατακόρυφο προφίλ του ^{137}Cs στα περίχωρα της πόλης Kragujevac της κεντρικής Σερβίας, κατά την περίοδο άνοιξη-καλοκαίρι 2001. Επιλέχθηκαν δέκα θέσεις δειγματοληψίας, με διαφορετικούς τύπους ανόργανου χώματος που δεν είχαν καλλιεργηθεί, έτσι ώστε να μπορεί να μελετηθεί η επίδραση των χαρακτηριστικών του χώματος στην κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs. Τα δείγματα χώματος είχαν διαστάσεις 10×10cm^2 και βάθος 20cm και χωρίστηκαν σε επιμέρους οριζόντια στρώματα, πάχους 2 cm. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2.

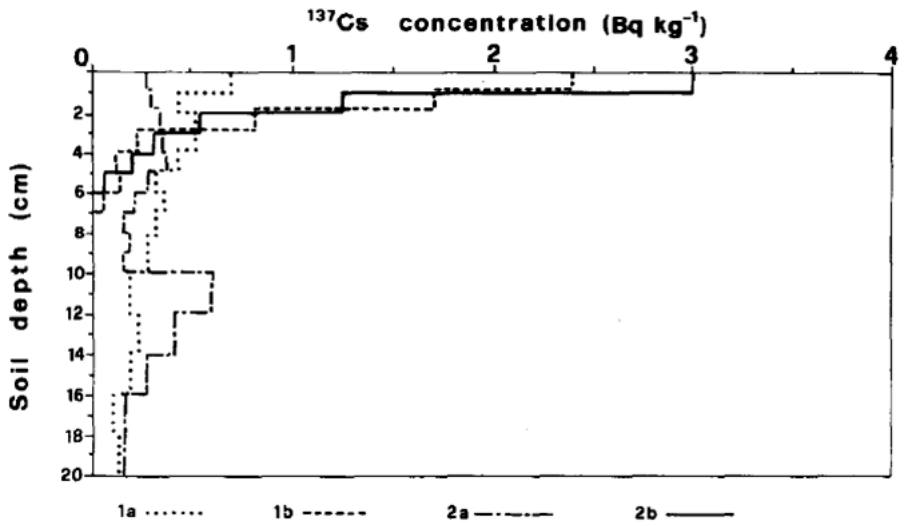


Σχήμα 5.2. Κατανομή συγκέντρωσης ^{137}Cs στο χώμα, όπως προσδιορίστηκε από τους Krstić et al. (2004) για 10 περιοχές.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2, οι δέκα περιοχές διαχωρίστηκαν σε δύο ομάδες, ανάλογα με τον χαρακτήρα του κατακόρυφου προφίλ. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τις περιοχές όπου το προφίλ του ^{137}Cs δεν εμφανίζει μέγιστο [Σχήμα 5.2 (a), (b)]. Σε αυτές, η συγκέντρωση του ^{137}Cs αποτελεί γνησίως φθίνουσα συνάρτηση του βάθους. Τέτοιου είδους κατανομή μπορεί να ερμηνευτεί θεωρώντας καθαρή διάχυση του ^{137}Cs. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τις περιοχές όπου παρουσιάζεται μέγιστο, μερικά εκατοστά κάτω από την επιφάνεια του χώματος [Σχήμα 5.2 (c)], το οποίο μπορεί να ερμηνευτεί υποθέτοντας και κατακόρυφη μετακίνηση του ^{137}Cs στο χώμα. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με δύο διαφορετικές συναρτήσεις και παρατηρήθηκε αρκετά καλή σύγκλιση των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα στα ανώτερα στρώματα του χώματος. Ωστόσο, δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας ΔΕ η περεταίρω εμβάθυνση στην μαθηματική ανάλυση των μοντέλων αυτών.

Βασιζόμενοι στην κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs, όπως αυτή προσδιορίσθηκε σε κάθε περιοχή, οι Krstić et al. (2004) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι στα επόμενα πενήντα χρόνια, το ^{137}Cs θα παραμείνει η κύρια πηγή εξωτερικής έκθεσης σε γ-ακτινοβολία. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι, δεκαπέντε χρόνια μετά το ατύχημα του Chernobyl (οπότε έγινε η έρευνα) και πάνω από τριάντα χρόνια μετά τις πυρηνικές δοκιμές, το ^{137}Cs παραμένει στα πρώτα 10 cm του ανώτερου στρώματος του χώματος. Κατέληξαν, λοιπόν, τελικά ότι, πράγματι, η διείσδυση του ^{137}Cs στο χώμα αποτελεί μία πολύ αργή διαδικασία.

Σε μία εργασία που έχει κάνει ο Persicani (1995) μελέτησε μία αγροτική έκταση κοντά σε πυρηνικό εργοστάσιο της βόρειας Ιταλίας, από όπου έλαβε δείγματα χώματος, συνολικού όγκου $\times$**20**$\times$20 cm^3, τα οποία χώρισε σε στρώματα ανά 1 cm μέχρι το βάθος των 10 cm και, ακολούθως ανά 2 cm. Τα δείγματα καθαρίστηκαν, ξηράνθηκαν και συμπιέστηκαν. Οι ποσότητες του ^{137}Cs και του ^{134}Cs προσδιορίσθηκαν με χρήση ανιχνευτή Ge(Li). Το ^{137}Cs το προερχόμενο από το Chernobyl προσδιορίσθηκε από την σύγκριση του λόγου $^{134}Cs/^{137}Cs$ με τιμές του λόγου αυτού πριν το ατύχημα του Chernobyl. Το Σχήμα 5.3 παρουσιάζει τα προφίλ του ^{137}Cs που παρατηρήθηκαν σε διάφορους τύπους χώματος της περιοχής, τα οποία όπως φαίνεται παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία.

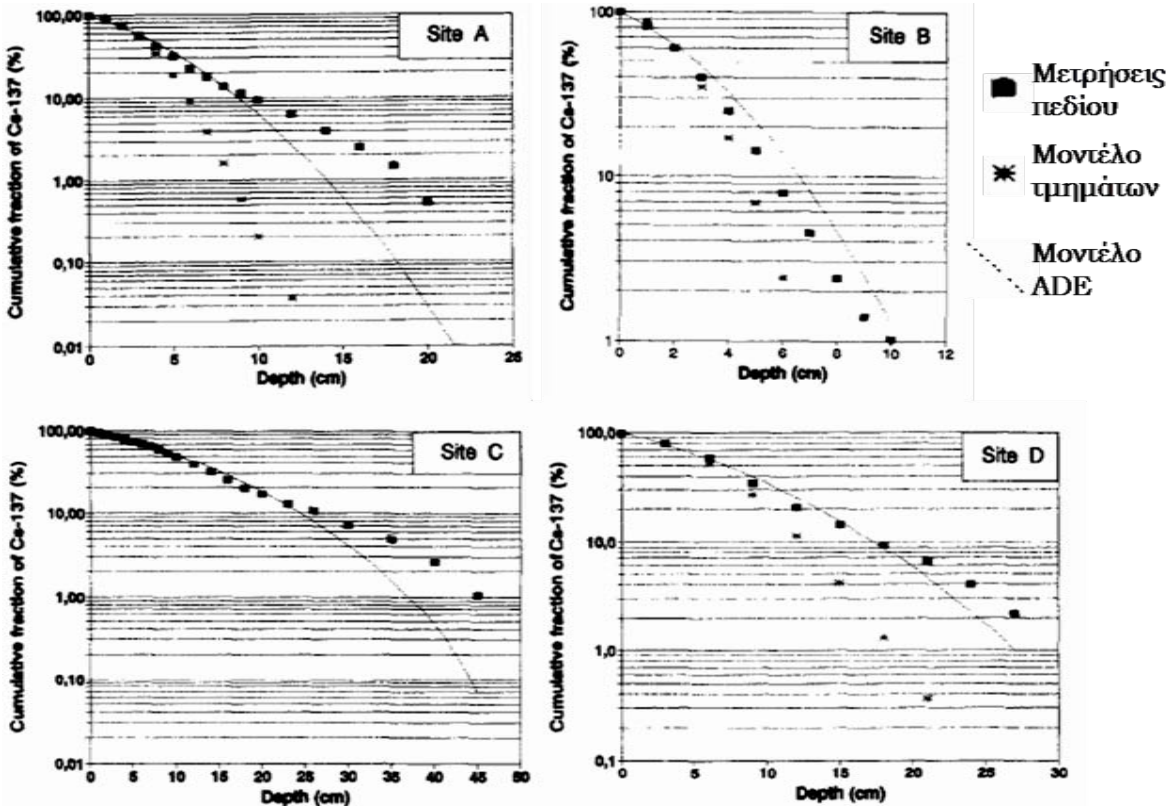


Σχήμα 5.3. Κατανομή συγκέντρωσης του προερχομένου από το ατύχημα του Chernobyl ^{137}Cs στο χώμα [Persicani (1995)].

Στα πλαίσια της μελέτης των Schuller et al. (1997), μελετήθηκε η κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους γεωργικών εδαφών, στην νότια Χιλή. Οι περιοχές που μελετήθηκαν παρουσίαζαν διαφορετική ένταση βροχοπτώσεων και επιλέχθηκαν ώστε να είναι όσο γίνεται πιο επίπεδες, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η οριζόντια μετανάστευση λόγω της βροχής. Για την λήψη των δειγμάτων χώματος, δημιουργήθηκε στο έδαφος μία τρύπα 1 m^3, από τα τοιχώματα της οποίας ελήφθησαν τα δείγματα, ύψους 1-3 cm, για τα πρώτα 10 cm του χώματος και ύψους 2-5 cm, ακολούθως. Το μέγιστο βάθος δειγματοληψίας ποικίλει μεταξύ 50-80 cm. Τα δείγματα υπέστησαν κατάλληλη επεξεργασία και, τελικά, η συγκέντρωση του ^{137}Cs προσδιορίσθηκε με χρήση ανιχνευτή HPGe. Στις κατά βάθος κατανομές του ^{137}Cs που μετρήθηκαν, προσαρμόστηκαν δύο θεωρητικά μοντέλα· το μεν ένα είναι ένα γραμμικό μοντέλο, χρονικά αμετάβλητο, το οποίο χωρίζει τα στρώματα του χώματος σε μία σειρά από επιμέρους τμήματα, συνδεόμενα μέσω του ρυθμού μεταφοράς των ραδιοϊσοτόπων· το δε άλλο είναι το μοντέλο ADE (Advection - Dispersion Equation ή Convection - Dispersion Equation), το οποίο, όπως αναφέρεται στην §2.5 λαμβάνει υπόψη του την μετατόπιση, την διασπορά και την απορρόφηση των στοιχείων στο έδαφος.

Σημειώνεται εδώ ότι οι περιοχές που μελετήθηκαν δεν έχουν υποστεί αξιόλογη ρύπανση από το ατύχημα του Chernobyl, και επομένως το ^{137}Cs στο χώμα προέρχεται αποκλειστικά από τις ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές. Οι κατά βάθος κατανομές του ^{137}Cs, όπως προσδιορίσθηκαν στα τέσσερα πεδία,

παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4. Στον Πίνακα 5.1 παρατίθεται η συνολική απόθεση ^{137}Cs για κάθε περιοχή σε $Bq \cdot m^{-2}$.



Σχήμα 5.4. Κατά βάθος προφίλ ^{137}Cs στο χώμα, σύμφωνα με θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα [Schuller et al. (1997)].

Site	Inventory[a] (Bq/m^2)
A	1210
B	790
C	1550
D	780

Πίνακας 5.1. Συνολική ποσότητα ^{137}Cs στα πεδία όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις [Schuller et al. (1997)).

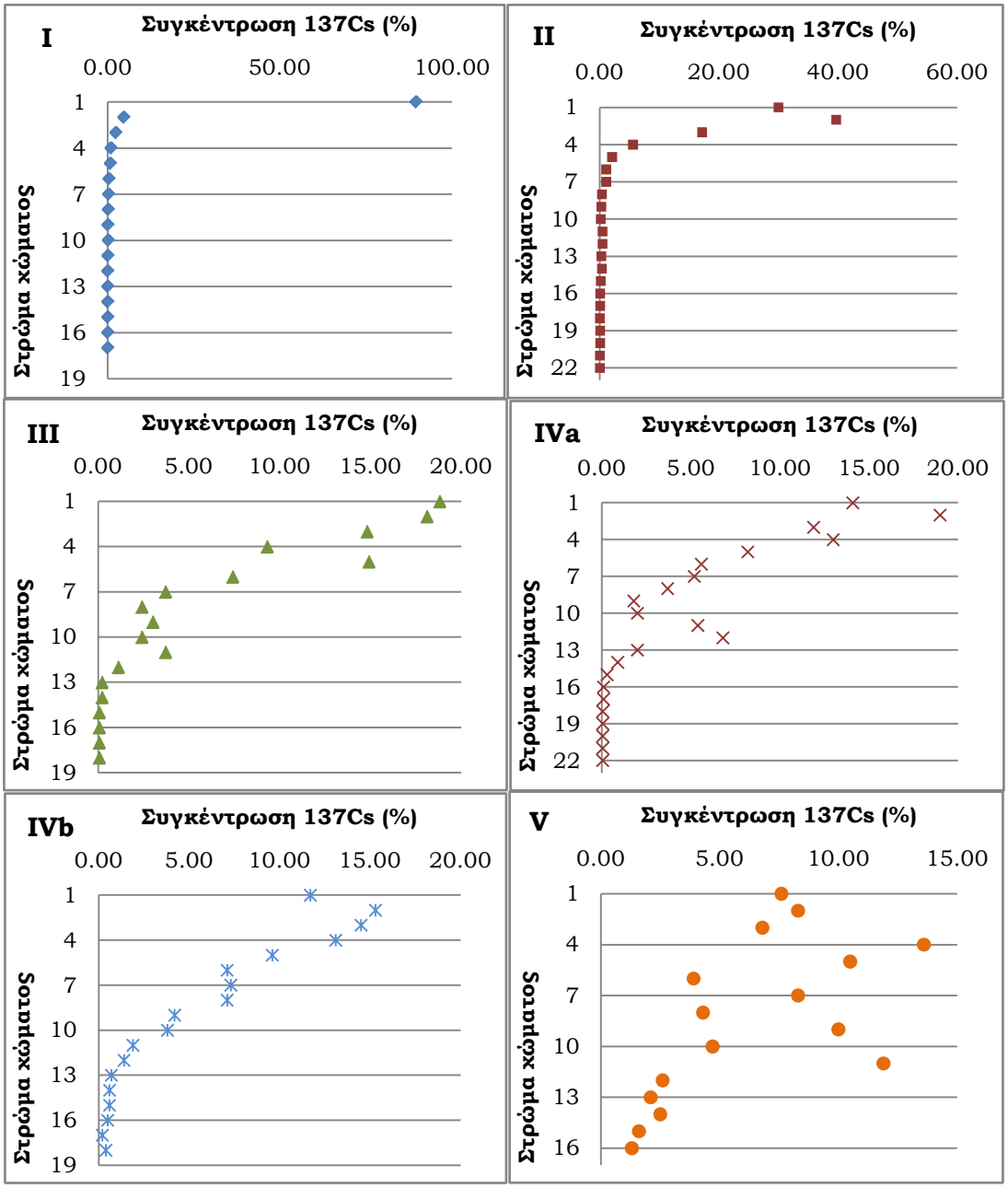
Οι Arapis et al. (1997) διεξήγαγαν μελέτη στην περιοχή Gomel της Λευκορωσίας, ως προς την μετακίνηση του ^{137}Cs και του ^{90}Sr στο έδαφος, θεωρώντας ότι ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει την κατακόρυφη μετατόπιση ενός ραδιοϊσοτόπου είναι ο τύπος του χώματος. Η δειγματοληψία διήρκησε από το 1987-1993 και έγινε προσπάθεια να καλυφθούν όλοι οι συνηθέστεροι τύποι χώματος. Τα δείγματα χώματος που ελήφθησαν είχαν

πάχος 1 cm, για τα πρώτα 10 cm χώματος και, ακολούθως, πάχος 5 cm, μέχρι το βάθος περίπου των 70 cm. Ετησίως λαμβάνονταν περί τα 1000 δείγματα χώματος, όπου η συγκέντρωση ^{137}Cs προσδιορίστηκε με γ-φασματοσκοπία. Στο Πίνακα 5.2 παρουσιάζεται η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs, όπως αυτή προσδιορίσθηκε στους έξι πιο αντιπροσωπευτικούς τύπους χώματος.

N	*Layer depth, cm*	*Activity of ^{137}Cs, %*					
		Representative soil profiles					
		group I 1993	*group II 1993*	*group III 1993*	*group IVa 1993*	*group IVb 1992*	*group V 1992*
1	v, 0–1	89·6	30·0	18·8	14·1	11·7	7·6
2	1–2	4·7	39·7	18·1	19·0	15·3	8·3
3	2–3	2·4	17·2	14·8	11·9	14·5	6·8
4	3–4	1·0	5·6	9·3	13·0-	13·1	13·6
5	4–5	0·8	2·1	14·9	8·2	9·6	10·5
6	5–6	0·4	1·1	7·4	5·6	7·1	3·9
7	6–7	0·3	1·1	3·7	5·2	7·3	8·3
8	7–8	0·2	0·4	2·4	3·7	7·1	4·3
9	8–9	0·1	0·3	3·0	1·8	4·2	10·0
10	9–10	0·2	0·2	2·4	2·0	3·8	4·7
11	10–15	0·2	0·5	3·7	5·4	1·9	11·9
12	15–20	0·1	0·5	1·1	6·8	1·4	2·6
13	20–25	< 0·1	0·3	0·2	2·0	0·7	2·1
14	25–30	< 0·1	0·4	0·2	0·9	0·6	2·5
15	30–35	< 0·1	0·2	< 0·1	0·3	0·6	1·6
16	35–40	< 0·1	0·1	< 0·1	0·1	0·5	1·3
17	40–45	< 0·1	0·1	< 0·1	0·1	0·2	
18	45–50	< 0·1	< 0·1	< 0·1	< 0·1	0·4	
19	50–55		0·1		< 0·1		
20	55–60		0·1		< 0·1		
21	60–65		< 0·1		< 0·1		
22	65–70		< 0·1		< 0·1		

Πίνακας 5.2. Κατακόρυφη κατανομή ^{137}Cs σε 6 αντιπροσωπευτικούς τύπους χώματος, 6 ή 7 χρόνια μετά το ατύχημα του Chernobyl, σύμφωνα με τους Arapis et al. (1997).

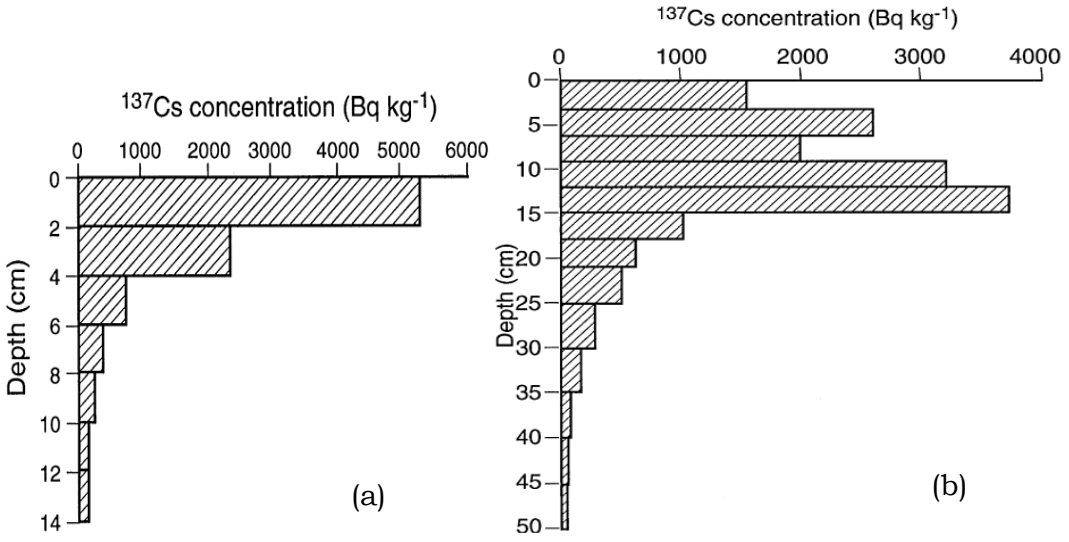
Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση των προφίλ αυτών. Παρατηρείται ότι, επτά χρόνια μετά το ατύχημα, όπου και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, η μεγαλύτερη ποσότητα του παραμένοντος ^{137}Cs βρίσκεται στα πρώτα 10 cm του χώματος, ενώ σε βάθη 50-70 cm η ποσότητα του ραδιοϊσοτόπου τείνει στο μηδέν.



Σχήμα 5.5. Προφίλ ^{137}Cs σε κάθε τύπο χώματος του Πίνακα 5.2, όπως προκύπτει από τους Arapis et al. (1997).

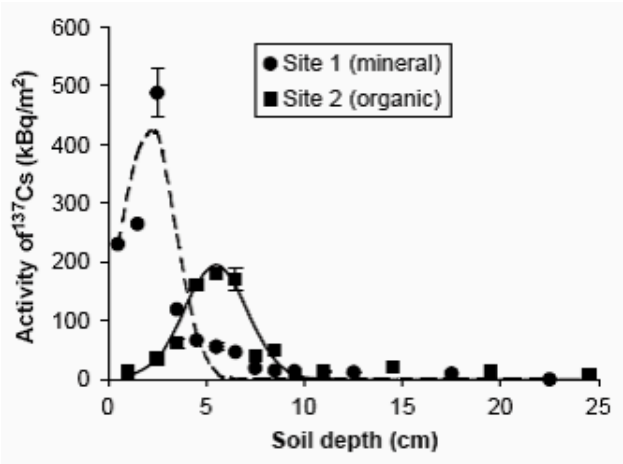
Οι Golosov et al (2000) μελέτησαν την λεκάνη απορροής του ποταμού Lokna στην περιοχή Plavsk της κεντρικής Ρωσίας, περιοχή η οποία υπέστη μεγάλη ραδιενεργό ρύπανση από ^{137}Cs προερχόμενο από το ατύχημα του Chernobyl. Στα πλαίσια της μελέτης τους, πραγματοποίησαν, τόσο μετρήσεις πεδίου, με χρήση φορητού ανιχνευτή, όσο και εργαστηριακές αναλύσεις, με χρήση ανιχνευτή HPGe, λαμβάνοντας δείγματα εδάφους από την περιοχή. Συγκεκριμένα, προσδιόρισαν την κατανομή του ^{137}Cs ξεχωριστά για τα τμήματα της λεκάνης απορροής τα οποία παρουσιάζουν κλίση (άρα δεν συγκεντρώνουν

νερό) και αποτελούν καλλιεργήσιμες περιοχές [Σχήμα 5.6, (a)], και ξεχωριστά για τον πυθμένα της λεκάνης απορροής, από όπου έλαβαν δείγματα ιζήματος [Σχήμα 5.6, (b)]. Η διαφορά στην κατανομή του ^{137}Cs στις δύο περιοχές αποδίδεται στο γεγονός ότι στον πυθμένα της λεκάνης απορροής προστίθεται διαρκώς νέο υλικό.



Σχήμα 5.6. Κατά βάθος κατανομή ^{137}Cs στο χώμα, σύμφωνα τους Golosov et al. (2000), (a) της καλλιεργήσιμης περιοχής της λεκάνης απορροής και (b) στον πυθμένα της λεκάνης απορροής (ίζημα).

Επιπλέον, πληροφορίες για την κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs μπορούν να ληφθούν και από βιβλιογραφικές πηγές στις οποίες έχει γίνει ήδη αναφορά στο 2ο Κεφάλαιο, όπου παρουσιάσθηκε η μεθοδολογία προσδιορισμού της δοσιμετρικής επιβάρυνσης λόγω του ^{137}Cs στο έδαφος. Συγκεκριμένα, οι Timms et al. (2005), που μελέτησαν το χωριό Orevichy της Λευκορωσίας, έλαβαν δείγματα χώματος πάχους 1 cm, μέχρι το βάθος των 10 cm, και ακολούθως πάχους 5 cm, στα οποία προσδιορίστηκε η συγκέντρωση ^{137}Cs, με ανιχνευτή σπινθηρισμού NaI. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs για οργανικό και ανόργανο χώμα. Η ραδιενέργεια του ^{137}Cs παρουσιάζεται και στον Πίνακα 5.3, για κάθε στρώμα χώματος που αναλύθηκε.

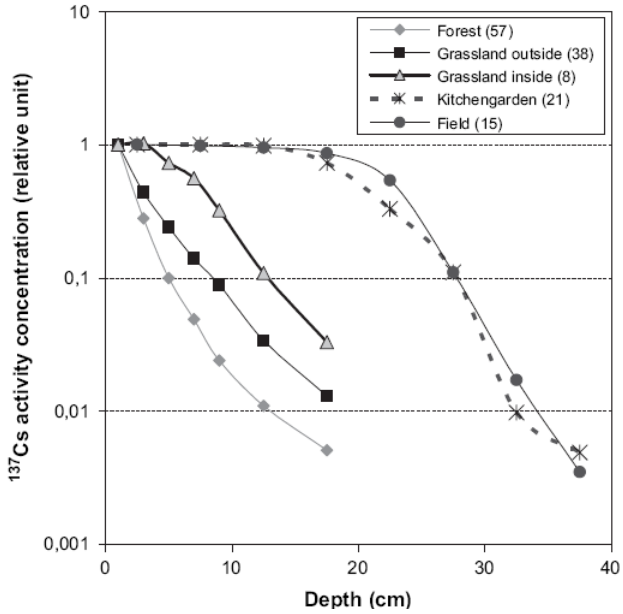


Σχήμα 5.7. Το κατά βάθος προφίλ του ^{137}Cs στα δύο πεδία που μελετήθηκαν από τους Timms et al. (2005).

Site 1 (mineral)		Site 2 (organic)	
Soil depth (cm)	Activity kBq/m^2	Soil depth (cm)	Activity kBq/m^2
Vegetation	2.3(0.2)	vegetation	8.6(1.0)
Forest litter	25.6(2.9)	0–2	13.1(1.6)
0–1	230.8(31.6)	2–3	35.6(4.6)
1–2	264.7(36.0)	3–4	61.6(7.8)
2–3	486.5(42.3)	4–5	160.7(18.6)
3–4	119.0(14.3)	5–6	179.5(23.0)
4–5	66.7(4.5)	6–7	170.0(19.0)
5–6	55.9(6.7)	7–8	40.6(5.2)
6–7	46.8(5.2)	8–9	48.2(5.7)
7–8	19.2(2.0)	9–10	8.7(1.2)
8–9	14.7(1.5)	10–12	14.0(1.8)
9–10	13.8(1.4)	12–17	21.9(2.2)
10–15	11.9(1.1)	17–22	13.1(1.2)
15–20	10.0(0.9)	22–27	8.7(0.8)
20–25	0.1(0.0)		
Total inventory	1367.7(66.3)	Total inventory	784.3(37.3)

Πίνακας 5.3. Η ραδιενέργεια του ^{137}Cs, σε kBq/m^2, όπως προκύπτει από την μελέτη των Timms et al. (2005).

Στην μελέτη των Ramzaev et al. (2006), στο Bryansk της Ρωσίας, ελήφθησαν κυλινδρικά δείγματα χώματος, ώστε να προσδιοριστεί η ραδιενέργεια ^{137}Cs ανά μονάδα επιφάνειας. Τα δείγματα, ανάλογα με το αν επρόκειτο για παρθένα ή καλλιεργημένα εδάφη, είχαν βάθος 20 ή 40 cm, διαιρέθηκαν σε επιμέρους στρώματα των 2 ή 5 cm και αναλύθηκαν με γ-φασματοσκοπία, με ανιχνευτές NaI(Tl) και HPGe. Η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs στο έδαφος παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.4 (§2.5) και απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 5.8, ενώ ο Πίνακας 5.4 παρουσιάζει τον ρυθμό δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs, όπως εκτιμήθηκε στην εργασία αυτή.



Σχήμα 5.8. Σχετική κατά βάθος κατανομή ^{137}Cs στο χώμα, σύμφωνα με τους Ramzaev et al. (2006).

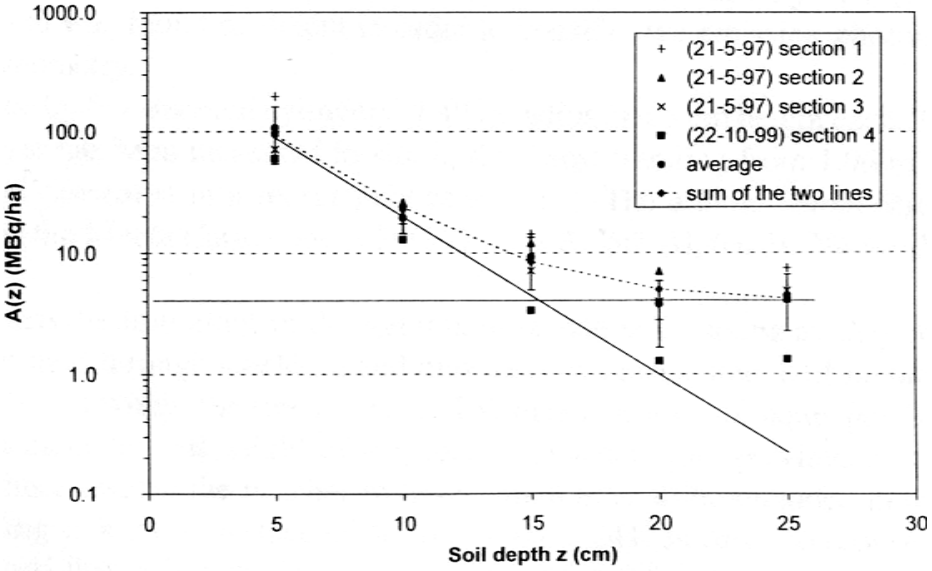
Location	Absorbed dose rates from terrestrial radionuclides ($nGy\,h^{-1}$)		Normalized absorbed dose rates due to ^{137}Cs fallout ($nGy\,h^{-1}$ per $kBq\,m^{-2}$ ^{137}Cs current ground deposition)	
	N	Mean ± s.d.[a]	*N*	Mean ± s.d.
Forests	27	18 ± 5	57	1.15 ± 0.19
Grasslands outside settlement	38	20 ± 6	38	1.04 ± 0.22
Arable fields	36	25 ± 5	47	0.37 ± 0.07
Grasslands inside settlement	8	24 ± 8	78	0.48 ± 0.12
Dirt surfaces	48	24 ± 5	229	0.26 ± 0.13
Kitchen gardens	52	25 ± 6	281	0.41 ± 0.07
Asphalt surfaces	11	50 ± 10	197	0.15 ± 0.07
One-story wooden houses	29	32 ± 6	164	0.10 ± 0.05
One-story brick and panel houses	16	54 ± 11	52	0.05 ± 0.04

Πίνακας 5.4. Ρυθμός απορροφώμενης δόσης εξαιτίας των φυσικών ραδιοϊσοτόπων του εδάφους και ανηγμένος ρυθμός απορροφώμενης δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs του εδάφους [Ramzaev et al. (2006)].

Πολύ ενδιαφέρον παρουσιάζει η εργασία του Clouvas et al. (2005), στην οποία μελετήθηκε ένα οικοσύστημα πευκοδάσους στην Κασσάνδρα της Χαλκιδικής και προσδιορίσθηκε η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs στο έδαφος. Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με την κατά βάθος μεταβολή της πυκνότητας και την κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs, όπως προκύπτουν από επεξεργασία των στοιχείων που παρουσιάζονται στην παραπάνω εργασία. Τα πρωτογενή στοιχεία της εργασίας αυτής παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.6 και 2.7 (§2.5). Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται γραφικά η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs για την υπόψη θέση δειγματοληψίας.

Βάθος (cm)	Επιφανειακή πυκνότητα (kg/ha)	Επιφανειακή πυκνότητα (g/cm^2)	Μαζική πυκνότητα (g/cm^3)	Συγκέντρωση ^{137}Cs MBq/ha	Συγκέντρωση ^{137}Cs (Bq/kg)
0-5	530000	5.3	1.06	107.75	203.30
5-10	560000	5.6	1.12	19.50	34.82
10-15	560000	5.6	1.12	9.22	16.46
15-20	640000	6.4	1.28	3.76	5.88
20-25	660000	6.6	1.32	4.45	6.74

Πίνακας 5.5. Κατακόρυφη κατανομή της πυκνότητας του χώματος και της συγκέντρωσης ^{137}Cs. [Clouvas et al. (2005)]



Σχήμα 5.9. Κατανομή ^{137}Cs στο χώμα (MBq/ha), σύμφωνα με τις μετρήσεις πεδίου των Clouvas et al. (2005).

Σύμφωνα με τον Clouvas et al. (2005), για την υπόψη θέση δειγματοληψίας, με την συγκεκριμένη κατά βάθος κατανομή ^{137}Cs, εκτιμάται συντελεστής μετατροπής της συγκέντρωσης του ^{137}Cs σε ρυθμό δόση ίσος με:

$$\mathbf{0.82\ nGyh^{-1}/kBqm^{-2}}$$

Στην ίδια βιβλιογραφική πηγή αναφέρεται συντελεστής μετατροπής για ένα εντελώς διαφορετικό δασικό οικοσύστημα που έχει την τιμή **1 $nGyh^{-1}/kBqm^{-2}$** και οι συγγραφείς καταλήγουν ότι, μία ρεαλιστική τιμή του συντελεστή μετατροπής της συγκέντρωσης ^{137}Cs σε ρυθμό δόση για ένα δασικό οικοσύστημα είναι περί το **0.9 $nGyh^{-1}/kBqm^{-2}$**

Από την παραπάνω ανασκόπηση, αναφορικά με την κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs προκύπτει η παρατήρηση ότι η συντριπτική πλειοψηφία

των κατά βάθος κατανομών ^{137}Cs που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία αποτελούν φθίνουσες κατανομές, με μέγιστη τιμή στην επιφάνεια του χώματος. Ωστόσο, παρατηρούνται και προφίλ συγκέντρωσης του ^{137}Cs, τα οποία εμφανίζουν μέγιστο σε βάθος μερικών εκατοστών από την επιφάνεια και τα οποία, όμως, είναι η πολύ λίγα, όπως προκύπτει από τις συγκεκριμένες βιβλιογραφικές αναφορές.

5.3. Ρυθμός δόσης για συγκεκριμένο κατακόρυφο προφίλ του ^{137}Cs στο έδαφος

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μία προσπάθεια υπολογισμού του ρυθμού δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs που βρίσκεται στο έδαφος και το οποίο ακολουθεί μία ορισμένη κατά βάθος κατανομή. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός θα γίνει για την κατά βάθος κατανομή η οποία παρουσιάζεται στην εργασία των Clouvas et al. (2005), έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση του ρυθμού δόσης που θα υπολογισθεί με αυτήν που δίνεται στην παραπάνω εργασία.

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο με χρήση του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE, προσδιορίσθηκαν για κάθε στρώμα χώματος ένας συντελεστής μετατροπής της συγκέντρωσης ^{137}Cs στο έδαφος (Bq/kg) σε ρυθμό δόσης σε ανθρώπινο ιστό (nGy/h), 1m πάνω από το έδαφος. Συνεπώς, για ορισμένη κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του ^{137}Cs μέσα στο χώμα, προκύπτει, για κάθε στρώμα χώματος *(i)*, η συνεισφορά του στρώματος αυτού στον συνολικό ρυθμό δόσης, εφαρμόζοντας μία σχέση της μορφής:

$$\dot{D}_i\left(\frac{nGy}{h}\right) = A_i\left(\frac{Bq}{kg}\right) \times CF_i\left(\frac{nGy}{h}\right) \Big/ \left(\frac{Bq}{kg}\right) \tag{5.1}$$

όπου:

- A_i : Η ειδική ραδιενέργεια του ^{137}Cs στο (i) στρώμα χώματος
- CF_i: Ο συντελεστής μετατροπής της ειδικής ραδιενέργειας του (i) στρώματος σε ρυθμό δόσης 1m από την επιφάνεια του εδάφους.

Εξυπακούεται ότι ο συνολικός ρυθμός δόσης 1m από την επιφάνεια του εδάφους, εξαιτίας όλων των στρωμάτων χώματος θα είναι το άθροισμα των επιμέρους ρυθμών δόσης που υπολογίζονται από τη σχέση (5.1).

$$\boxed{\dot{D}_{tot} = \sum_i \dot{D}_i} \quad (5.2)$$

Το βασικό πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίστηκε κατά την προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν πραγματικά πειραματικά αποτελέσματα σε συνδυασμό με τους συντελεστές που προσδιορίσθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ για κάθε στρώμα χώματος, ήταν ότι δεν υπήρχε απόλυτη ταύτιση της κατά βάθος διαμέρισης των στρωμάτων χώματος. Ένα άλλο πρόβλημα ήταν ότι δεν υπήρχε απόλυτη ταύτιση της κατά βάθος κατανομής της πυκνότητας. Προφανώς, λοιπόν, έπρεπε να γίνει κατάλληλη προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων της βιβλιογραφίας ώστε να είναι δυνατή η χρήση των συντελεστών που υπολογίσθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της μελέτης των Clouvas et al. (2005) διαπιστώνεται ότι η κατανομή του ^{137}Cs που λαμβάνεται στην μελέτη αυτή [Πίνακας 5.5] θεωρεί στρώματα χώματος πάχους 5 cm μέχρι το βάθος των 25 cm. Για κάθε στρώμα χώματος, εφόσον ήταν γνωστή η επιφανειακή του πυκνότητα (kg/ha) και το ύψος του στρώματος, μπορούσε ένα γίνει ο υπολογισμός της πυκνότητας, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Καταρχήν, είναι γνωστό ότι 1ha = 10000m^2, επομένως ισχύει η ισοδυναμία:

$$1\left({}^{kg}/_{ha}\right) = 10^{-5}\left({}^{g}/_{cm^2}\right)$$

Μετατρέποντας, λοιπόν, την τιμή της επιφανειακής πυκνότητας (kg/ha) κάθε στρώματος χώματος σε (g/cm^2) και διαιρώντας με το ύψος του κυλινδρικού στρώματος, το οποίο είναι σταθερό και ίσο με 5 cm προκύπτουν οι τιμές της πυκνότητας των στρωμάτων χώματος, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

Προκειμένου να γίνει προσαρμογή των κατακόρυφων κατανομών ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- Θεωρούμε ότι στο πάχους 5 cm στρώμα χώματος, η ποσότητα του ^{137}Cs η οποία αντιστοιχεί στο στρώμα αυτό, είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλο τον όγκο του στρώματος.

- Θεωρούμε, σύμφωνα και με την παρατήρηση των Clouvas et al. (2005), ότι σε βάθος χώματος μεγαλύτερο των 25 cm η τιμή της συγκέντρωσης του ^{137}Cs τείνει να σταθεροποιηθεί γύρω από την τιμή 4 MBq/ha, που αντιστοιχεί σε 6 Bq/kg, για την δεδομένη επιφανειακή πυκνότητα χώματος.

- Προσαρμόζουμε,την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του ^{137}Cs της μελέτης των Clouvas et al (2005) στον διαμερισμό του χώματος που έχει επιλεγεί στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, οπότε τελικά προκύπτει η ακόλουθη κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του ^{137}Cs στο χώμα του προβλήματός μας είναι:

Βάθος (cm)	**Συγκέντρωση ^{137}Cs (Bq/kg)**
0-0.25	203.30
0.25-1	203.30
1-2	203.30
2-3	203.30
3-4	203.30
4-6	***116.74***
6-8	34.82
8-11	***28.70***
11-14	16.46
14-17	***9.1***
17-20	5.88
20-24	6.74
24-28	***6.19***
28-32	6.00
32-36	6.00
36-40	6.00

Πίνακας 5.6. Κατακόρυφη κατανομή συγκέντρωσης ^{137}Cs.

- Παρατηρούμε ότι ορισμένα στρώματα χώματος του διαμερισμού μας, τα οποία είναι σημειωμένα στον Πίνακα 5.6, εμπίπτουν σε δύο διαφορετικά στρώματα χώματος της μελέτης των Clouvas et al. (2005). Η συγκέντρωση του ^{137}Cs σε κάθε στρώμα εξ αυτών προέκυψε ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των δύο συγκεντρώσεων των δύο επιμέρους στρωμάτων της βιβλιογραφικής αναφοράς, δηλαδή:

$m_1 \times A_1 + m_2 \times A_2 = m \times A$

$\Rightarrow \rho_1 \times V_1 \times A_1 + \rho_2 \times V_2 \times A_2 = \rho \times V \times A$

$\Rightarrow \rho_1 \times \alpha \times V \times A_1 + \rho_2 \times (1-\alpha) \times V \times A_2 = \rho \times V \times A$

$\Rightarrow \alpha \times \rho_1 \times A_1 + (1-\alpha) \times \rho_2 \times A_2 = \rho \times A$

$$\Rightarrow A = \frac{\alpha \times \rho_1 \times A_1 + (1-\alpha) \times \rho_2 \times A_2}{\alpha \times \rho_1 + (1-\alpha) \times \rho_2}$$

όπου:

- m_1, m_2: οι μάζες των δύο τμημάτων του στρώματος, όγκου V_1 και V_2, αντίστοιχα, που εμπίπτουν αντίστοιχα σε διαφορετικό στρώμα της μελέτης της βιβλιογραφίας.
- ρ_1, ρ_2: οι αντίστοιχες πυκνότητες των δύο στρωμάτων [Πίνακας 5.7]
- A_1, A_2: οι συγκεντρώσεις ^{137}Cs των δύο στρωμάτων [Πίνακας 5.7]
- A: η τιμή της συγκέντρωσης του ^{137}Cs που θα θεωρήσουμε ως συγκέντρωση του στρώματος συνολικού όγκου V. Για τα δύο τμήματα του στρώματος, όγκου V_1 και V_2, θεωρούμε ότι ισχύει:

  $V_1 = \alpha \cdot V$

  $V_2 = (1-\alpha) \cdot V$

Συνεπώς, σύμφωνα με την σχέση (5.1), πολλαπλασιάζοντας τον συντελεστή μετατροπής της συγκέντρωσης ^{137}Cs σε ρυθμό δόσης $nGy \cdot h^{-1}/Bq \cdot kg^{-1}$, όπως αυτοί προέκυψαν στην § 4.3.5 [Πίνακας 4.16], με τις τιμές της συγκέντρωσης του ^{137}Cs ($Bq \cdot kg^{-1}$), όπως δίνονται στον Πίνακα 5.5, προκύπτει τελικά ο ρυθμός δόσης ($nGy \cdot h^{-1}$) για κάθε στρώμα χώματος της διάταξης του προβλήματός μας, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί [Πίνακας 5.7]:

Βάθος (cm)	Συγκέντρωση ^{137}Cs (Bq/kg)	Συντελεστής μετατροπής $\left(\frac{nGy/h}{Bq/kg}\right)$	Ρυθμός Δόσης (nGy/h)
0-0.25	203.30	4.45E-03	9.04E-01
0.25-1	203.30	1.20E-02	2.44E+00
1-2	203.30	1.27E-02	2.59E+00
2-3	203.30	1.38E-02	2.81E+00
3-4	203.30	1.13E-02	2.31E+00
4-6	116.74	1.97E-02	2.30E+00
6-8	34.82	1.44E-02	5.03E-01
8-11	28.70	1.64E-02	4.69E-01
11-14	16.46	1.16E-02	1.90E-01
14-17	9.10	8.13E-03	7.39E-02
17-20	5.88	5.41E-03	3.18E-02
20-24	6.74	5.19E-03	3.50E-02
24-28	6.19	3.72E-03	2.30E-02
28-32	6.00	2.39E-03	1.43E-02
32-36	6.00	1.62E-03	9.73E-03
36-40	6.00	1.09E-03	6.54E-03

Πίνακας 5.7. Ρυθμός δόσης (nGy/h) εξαιτίας κάθε στρώματος χώματος του προβλήματός μας.

Αθροίζοντας τις τιμές του ρυθμού δόσης που προσδιορίσθηκαν (Σχέση 5.2) προκύπτει, τελικά, ο συνολικός ρυθμός δόσης, εξαιτίας της κατακόρυφης κατανομής του ^{137}Cs στο έδαφος, όπως αυτή θεωρήθηκε από τους Clouvas et al. (2005). Ο συνολικός ρυθμός δόσης, λοιπόν, προκύπτει ίσος με:

$$\dot{D}_{tot} = 1.470079E01 \ (nGy \cdot h^{-1})$$

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας του μεγέθους $\dot{D}_{tot}$ θα χρησιμοποιήσουμε το νόμο διάδοσης σφαλμάτων στις σχέσεις (5.1) και (5.2). Πιο συγκεκριμένα από τη σχέση (5.2) προκύπτει η αβεβαιότητα του μεγέθους $\dot{D}_{tot}$ ως εξής:

$$\sigma_{\dot{D}_{tot}} = \sqrt{\sum_i \sigma^2_{\dot{D}_i}} \quad (5.3)$$

όπου

- $\sigma_{\dot{D}_{tot}}$: η αβεβαιότητα / τυπική απόκλιση του μεγέθους $\dot{D}_{tot}$ σε επίπεδο 1σ

- $\sigma_{\dot{D}_i}$: η αβεβαιότητα / τυπική απόκλιση του μεγέθους $\dot{D}_i$ σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ

Ο προσδιορισμός του $\sigma_{\dot{D}_i}$ γίνεται εκ νέου με εφαρμογή του νόμου διάδοσης σφαλμάτων στη σχέση (5.1) και προκύπτει

$$C_{\dot{D}_i} = \sqrt{C_{A_i}^2 + C_{CF_i}^2} \qquad (5.4)$$

όπου

- $C_{\dot{D}_i}$: η μεταβλητότητα (σχετική αβεβαιότητα) του μεγέθους $\dot{D}_i$ σε επίπεδο 1σ. Ισχύει ότι:

$$C_{\dot{D}_i} = \sigma_{\dot{D}_i} / \dot{D}_i \qquad (5.5)$$

- C_{A_i} : η μεταβλητότητα (σχετική αβεβαιότητα) του μεγέθους A_i σε επίπεδο 1σ

- C_{CF_i} : η μεταβλητότητα (σχετική αβεβαιότητα) του μεγέθους CF_i σε επίπεδο 1σ, όπως λαμβάνεται από τις προσομοιώσεις.

Καθώς δεν έχουμε διαθέσιμα στοιχεία για την αβεβαιότητα του μεγέθους A_i μπορούμε να αγνοήσουμε τη συνεισφορά της στην τελική αβεβαιότητα του συνολικού ρυθμού δόσης $\dot{D}_{tot}$, δηλαδή $C_{A_i} = 0$ [3]. Άλλωστε, η αβεβαιότητα κατά τον υπολογισμό της ραδιενέργειας του ^{137}Cs στις συνήθεις αναλύσεις μπορούμε

---

[3] Έχοντας ήδη υποθέσει ότι $C_{A_i} = 0$ γίνεται αντιληπτό ότι $C_{\dot{D}_i} = C_{CF_i}$ με άλλα λόγια οι σχετικές αβεβαιότητες των μεγεθών $\dot{D}_i$ και CF_i ταυτίζονται. Οι τιμές λαμβάνονται από τις προσομοιώσεις.

να θεωρήσουμε ότι είναι πολύ μικρότερη από την αβεβαιότητα με την οποία έχουν εκτιμηθεί οι συντελεστές μετατροπής δόσης. Τελικά, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\sigma_{\dot{D}_{tot}} = \sqrt{\sum_i \left(C_{CF_i} \cdot \dot{D}_i\right)^2} \qquad (5.6)$$

και με βάση τα στοιχεία των Πινάκων 4.15 και 5.7 προκύπτει η τυπική απόκλιση του συνολικού ρυθμού δόσης $\sigma_{\dot{D}_{tot}}$ =0.13 nGy·h^{-1} και επομένως ο συνολικός ρυθμός δόσης προκύπτει ίσος με:

$$\dot{D}_{tot} = 14.70 \pm 0.87\ \%\ (nGy \cdot h^{-1})$$

Σύμφωνα με τους Clouvas et al (2005), ο ρυθμός δόσης αυτός υπολογίζεται από το γινόμενο:

$$\dot{D}_{tot} = (0.82 nGy \cdot h^{-1} / kBq \cdot kg^{-1}) \cdot (14.5 kBq \cdot m^{-2})$$

$$\Rightarrow \quad \dot{D}_{tot} = 11.89\ nGy \cdot h^{-1}$$

Η απόκλιση της τιμής του ρυθμού δόσης που προσδιορίσθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από την τιμή των Clouvas et al (2005) είναι ίση με:

$$\frac{11.89 - 14.70}{11.89} \times 100 = -23.63\%$$

Η διαφορά αυτή εκ πρώτης όψεως φαίνεται πολύ μεγάλη, πρέπει όμως να επισημανθεί ότι:

- Η δόση που δίνεται από τους Clouvas et al. (2005) είναι η απορροφώμενη δόση στον αέρα, ενώ στα πλαίσια της ΔΕ υπολογίζεται η απορροφώμενη δόση σε πρότυπο ιστό (κατά ICRP). Επισημαίνεται ότι, για μονοενεργειακά φωτόνια η διαφορά της απορροφώμενης δόσης μεταξύ των δύο υλικών οφείλεται στη διαφορά του συντελεστή (μ_a/ρ) των δύο υλικών. Μάλιστα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.8, για φωτόνια στην ενεργειακή περιοχή έως ~660keV – ενεργειακή περιοχή των φωτονίων τα οποία αποθέτουν

ενέργεια στον απορροφητή για το υπόψη πρόβλημα – η διαφορά μεταξύ των συντελεστών (μ_a/ρ) κυμαίνεται περί το 9%, με τις τιμές του υλικού «ιστός» να είναι υψηλότερες. Είναι λοιπόν λογικό να θεωρηθεί ότι ένα μέρος της διαφοράς του ρυθμού δόσης που υπολογίζεται στα πλαίσια της ΔΕ από την δόση που υπολογίζεται από τους Clouvas et al (2005), της τάξης του 9%, οφείλεται στο διαφορετικό υλικό του απορροφητή.

Ενέργεια (keV)	**Μαζικός συντελεστής απορρόφησης ΑΕΡΑ (cm^2/g)**	**Μαζικός συντελεστής απορρόφησης ΙΣΤΟΥ (cm^2/g)**	**Διαφορά**
100	2.325E-02	2.545E-02	8.64%
150	2.496E-02	2.745E-02	9.07%
200	2.672E-02	2.942E-02	9.18%
300	2.872E-02	3.164E-02	9.23%
400	2.949E-02	3.249E-02	9.23%
500	2.966E-02	3.269E-02	9.27%
600	2.953E-02	3.254E-02	9.25%
800	2.882E-02	3.176E-02	9.26%

Πίνακας 5.8. Διαφορά μαζικών συντελεστών απορρόφησης για υλικό «αέρα» και υλικό «ιστό», για εύρος ενεργειών από 100 έως 800 keV.

- Η δόση που δίνεται από τους Clouvas et al (2005) είναι δόση που έχει εκτιμηθεί μετά από μέτρηση μέσα σε ένα πευκοδάσος, όπου η ύπαρξη δένδρων οπωσδήποτε λειτουργεί κατά κάποιο τρόπο ως θωράκιση της ακτινοβολίας.

- Η πυκνότητα του χώματος στο στρώματα κοντά στην επιφάνεια που έχει χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της ΔΕ είναι υψηλότερη της πυκνότητας που θεωρείται από τους Clouvas et al (2005), κάτι που έχει επίδραση τόσο στη συγκέντρωση του ^{137}Cs ανά kg, όσο και στην εξασθένηση των φωτονίων που προέρχονται από βαθύτερα στρώματα.

- Τέλος, σχετικά με τις μετρήσεις που έχουν γίνει από in-situ ανιχνευτή από τους Clouvas et al (2005) δεν υπάρχει καμία εκτίμηση της αβεβαιότητας που συνοδεύει συνολικά την εκτίμηση της δόσης.

Αν ως συντελεστής μετατροπής δόσης χρησιμοποιηθεί όχι η τιμή που υπολογίζεται στην εργασία των Clouvas et al. (2005), την οποία

χρησιμοποιήσαμε προηγουμένως, αλλά η τιμή **0.9 nGy·h^{-1}/kBq·m^{-2}**, η οποία σύμφωνα με τους παραπάνω είναι μία «τιμή ευρύτερης εφαρμογής» που αφορά βέβαια πάλι σε δασικό οικοσύστημα, τότε, για συνολική ποσότητα ^{137}Cs ίση με **14.5 kBq·m^{-2}**, ο συνολικός ρυθμός δόσης προκύπτει:

$$\dot{D}_{tot} = (0.9nGy \cdot h^{-1} / kBq \cdot kg^{-1}) \cdot (14.5kBq \cdot m^{-2})$$

⇒ $\dot{D}_{tot}$= **13.05 nGy·h^{-1}**

και η απόκλιση της τιμής του ρυθμού δόσης που προσδιορίσθηκε στην ΔΕ από την τελευταία τιμή του ρυθμού δόσης είναι:

$$\frac{13.05 - 14.70}{13.05} \times 100 = \mathbf{-12.64\%}$$

Αξίζει τον κόπο να γίνει και ένας υπολογισμός του ρυθμού δόσης για την περίπτωση που αναφέρεται στην εργασία των Clouvas et al. (2005) με χρήση συντελεστή μετατροπής ραδιενέργειας σε ρυθμό δόσης που λαμβάνεται από την εργασία των Ramzaev et al (2006) από τον Πίνακα 5.5. Σύμφωνα με την υπόψη εργασία, για ένα χωράφι (grassland outside) η κατανομή του ^{137}Cs ακολουθεί ικανοποιητικά την εκθετική μορφή (Σχήμα 5.8), όπως και στην εργασία των Clouvas et al. (2005) και ο συντελεστής μετατροπής δόσης έχει εκτιμηθεί σε **1.04 nGy·h^{-1}/kBq·m^{-2}**. Με χρήση της τιμής αυτής η δόση για την περίπτωση του εδάφους που περιγράφεται στην εργασία των Clouvas et al. (2005) εκτιμάται ίση με:

$$\dot{D}_{tot} = (1.04nGy \cdot h^{-1} / kBq \cdot kg^{-1}) \cdot (14.5kBq \cdot m^{-2})$$

⇒ $\dot{D}_{tot}$= **15.08 nGy·h^{-1}**

και η απόκλιση της τιμής του ρυθμού δόσης που προσδιορίσθηκε στην ΔΕ από την τελευταία τιμή του ρυθμού δόσης είναι:

$$\frac{15.08 - 14.70}{15.08} \times 100 = \mathbf{2.52\%}$$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

- Η συνεισφορά στο συνολικό ρυθμό δόσης των στρωμάτων χώματος για βάθος μεγαλύτερο των 24 cm, δηλαδή των τεσσάρων τελευταίων στρωμάτων, υπολογίστηκε ίση με **5.36E-02 nGy/h**, το οποίο αποτελεί το 0.36% του συνολικού ρυθμού δόσης και, επομένως, για το συγκεκριμένο προφίλ ^{137}Cs, μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

5.4. Συμπεράσματα

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα υπολογισμού του ρυθμού δόσης που έγινε με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ΔΕ και τη σύγκριση που έγινε με τα αποτελέσματα που προέκυψαν θεωρώντας σχετικούς συντελεστές που προτείνονται στη βιβλιογραφία, μπορούν να προκύψουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μεθοδολογία εκτίμησης του ρυθμού δόσης η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ΔΕ μπορεί να οδηγήσει σε εκτίμηση του ρυθμού δόσης για δεδομένη κατά βάθος κατανομή με ικανοποιητική ακρίβεια.

- Μεγάλο πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής είναι η ταχύτητα και η ευελιξία με την οποία μπορεί να εφαρμοσθεί, για διαφορετικές κατά βάθος κατανομές.

- Προφανώς, οι συντελεστές που έχουν προσδιορισθεί αναφέρονται σε συγκεκριμένο τύπο χώματος και για συγκεκριμένη κατά βάθος κατανομή της πυκνότητας του.

- Εξυπακούεται ότι, προκειμένου να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια κατά τον υπολογισμό του ρυθμού δόσης θα πρέπει να γίνεται προσεκτική επιλογή των διαφόρων παραμέτρων και να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερα γνωστή η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs.

- Ο προσδιορισμός συντελεστών δόσης για τα στρώματα βάθους μεγαλύτερου των 25 cm, για τις συνήθεις κατά βάθος κατανομές που ανευρέθησαν στη βιβλιογραφία αποδείχθηκε μάλλον περιττός, καθώς η συνεισφορά των στρωμάτων αυτών μάλλον θα πρέπει να θεωρηθεί αμελητέα.

- Από τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων υπολογισμού του ρυθμού δόσης με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας, φαίνεται ότι η επιλογή να προσομοιωθούν κύλινδροι χώματος ακτίνας 10 m δικαιώνεται.
- Η μεθοδολογία αυτή μπορεί άνετα να επεκταθεί για άλλες ενέργειες φωτονίων καθώς και για άλλους τύπους χώματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) αποτελεί μία προσπάθεια να καταστρωθεί μία μεθοδολογία εκτίμησης του ρυθμού δόσης εξαιτίας ραδιενεργών ισοτόπων που βρίσκονται στο έδαφος, με χρήση αποκλειστικά τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo (M-C). Συγκεκριμένα, η εργασία εστιάζει στην εκτίμηση του ρυθμού δόσης 1m από την επιφάνεια του εδάφους, εξαιτίας του ραδιενεργού ^{137}Cs που υπάρχει στο έδαφος, το οποίο προέρχεται κυρίως από το ατύχημα του Chernobyl και αποτελεί ένα από τα πιο επικίνδυνα ραδιενεργά ισότοπα. Εξυπακούεται ότι η μεθοδολογία αυτή μπορεί να προσαρμοσθεί για την εκτίμηση του ρυθμού δόσης εξαιτίας άλλων ραδιενεργών ισοτόπων που βρίσκονται στο έδαφος. Ο ρυθμός δόσης εξαρτάται σημαντικά από την κατανομή που έχει το αντίστοιχο ισότοπο στο έδαφος. Για το λόγο αυτό η μεθοδολογία αναπτύχθηκε με γνώμονα το να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της δόσης για διάφορες κατά βάθος κατανομές.

Στο 2ο Κεφάλαιο της ΔΕ γίνεται αρχικά μία παρουσίαση βασικών δοσιμετρικών μεγεθών. Στη συνέχεια αναπτύσσονται μία σειρά από θεωρητικές σχέσεις οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στον υπολογισμό της δόσης για μία σειρά από απλές γεωμετρίες. Συγκεκριμένα, για σημειακή πηγή, δισκοειδή πηγή και για κυλινδρική πηγή όγκου. Ακολούθως γίνεται μία ενδελεχής βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις μεθοδολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση της δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs. Μελετώντας την βιβλιογραφία ως προς τις μεθόδους υπολογισμού της δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs του εδάφους, διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν πολλές ασάφειες, ελλείψεις και διαφορές, καθώς και ότι ο προσδιορισμός της δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs του εδάφους παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Οι μέθοδοι που εντοπίστηκαν στις βιβλιογραφικές αναφορές αφορούν κυρίως σε μετρήσεις πεδίου ή εργαστηριακές μετρήσεις. Υπάρχουν δε ελάχιστες έως ανύπαρκτες εφαρμογές κώδικα προσομοίωσης και θεωρητικών σχέσεων και όσες εντοπίστηκαν δεν αφορούν σε υπολογισμό της δόσης αποκλειστικά με κώδικα

προσομοίωσης ή με θεωρητικές σχέσεις, αλλά σε προσδιορισμό βοηθητικών στοιχείων, συνδυάζοντας πειραματικά δεδομένα. Επιπλέον πρέπει να καταγραφεί ότι σε όλες τις εργασίες ο υπολογισμός του ρυθμού δόσης γίνεται στον αέρα και όχι σε ανθρώπινο ιστό, όπως στην παρούσα ΔΕ

Σημαντικό επίσης συμπέρασμα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αποτελεί η διαπίστωση ότι οι πλέον καθοριστικοί παράγοντες για το επίπεδο της δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs είναι, πέραν της αρχικής αποθέσεως, η κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του ^{137}Cs μέσα στο χώμα και η κατά βάθος κατανομή της πυκνότητας του χώματος. Τέλος, όπως διαπιστώνεται από όλους τους ερευνητές, σήμερα, η μεγαλύτερη ποσότητα του ^{137}Cs παραμένει στα πρώτα εκατοστά του χώματος.

Στο 3ο Κεφάλαιο έγινε προσπάθεια κατανόησης του τρόπου λειτουργίας του κώδικα προσομοίωσης (M-C) PENELOPE και ειδικότερα το πώς είναι δυνατόν αυτός να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό δόσης. Διαπιστώθηκε ότι ο κώδικας δίνει διάφορες δυνατότητες για υπολογισμό δόσης. Κάθε μία από αυτές ελέγχθηκε ως προς την ευκολία και την ακρίβειά της. Οι δοκιμές βασίσθηκαν στην επίλυση απλών προβλημάτων υπολογισμού δόσης μέσω προσομοίωσης, για τα οποία ήταν δυνατό να αναπτυχθεί και αναλυτική λύση. Συγκεκριμένα, αντιμετωπίσθηκαν τα προβλήματα υπολογισμού δόσης εξαιτίας σημειακής πηγής, δισκοειδούς πηγής και κυλινδρικής πηγής όγκου. Όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις αυτές, υπάρχουν δύο σημεία τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής, διότι μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Από την μία, στην περίπτωση διαδοχικών προσομοιώσεων, των οποίων τα αποτελέσματα επιθυμούμε να συγκρίνουμε, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς η ημιγωνία εκπομπής της πηγής φωτονίων. Από την άλλη, είναι σημαντικό, στην περίπτωση που σε ένα σημείο της διάταξής μας θεωρείται συγχρόνως Ανιχνευτής Δόσης και Ανιχνευτής Αποτιθέμενης Ενέργειας, οι δύο αυτοί ανιχνευτές πρέπει να ταυτίζονται γεωμετρικά, ώστε και οι τιμές της δόσης που προκύπτουν από τα αρχεία εξόδου των δύο ανιχνευτών να ταυτίζονται επίσης. Τελικά, συμπεραίνουμε ότι, τόσο ο ανιχνευτής δόσης όσο και ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ ικανοποιητικά για την εκτίμηση της δόσης σε πιο πολύπλοκα προβλήματα.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αυτά των θεωρητικών υπολογισμών διαπιστώθηκε ότι η χρήση του κώδικα PENELOPE μπορεί να οδηγήσει σε υπολογισμό της δόσης με ικανοποιητική ακρίβεια, για σχετικά πολύπλοκα προβλήματα. Επιπλέον, κατέδειξε το ποιος είναι ο καλύτερος τρόπος αξιοποίησης των δυνατοτήτων του κώδικα για υπολογισμό της δόσης. Σε αυτό το στάδιο της εργασίας η δόση υπολογιζόταν σε (eV/g).

Σημειώνεται ότι, καθώς ο source κώδικας PENMAIN του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE ορίζει σημειακή πηγή φωτονίων σε συγκεκριμένη θέση, απαιτήθηκε τροποποίηση του κώδικα, ώστε να δημιουργηθεί επιφανειακή πηγή, στην οποία τα φωτόνια εκπέμπονται από τυχαία κάθε φορά θέση, μέσα στα όρια της επιφάνειας. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της τυχαιότητας της δειγματοληψίας του σημείου εκπομπής, ο οποίος έδειξε ότι στατιστικά καλύπτεται όλη η επιφάνεια της πηγής φωτονίων.

Στο ίδιο Κεφάλαιο, πραγματοποιώντας διαδοχικές προσομοιώσεις για δισκοειδείς πηγές διαφόρων ακτίνων, προέκυψε ότι η εξάρτηση της δόσης από την ακτίνα της δισκοειδούς πηγής αποτελεί πολύ καλή λογαριθμική συνάρτηση. Μάλιστα, βρέθηκε ότι η συνολική δόση τείνει ασυμπτωτικά προς μία οριακή τιμή, όσο μεγαλώνει η ακτίνα, κάτι που φυσικά ήταν αναμενόμενο. Η διερεύνηση αυτή βοήθησε στην επιλογή των διαστάσεων των πηγών που θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα βήματα της ΔΕ. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι η προσομοίωση πηγών πολύ μεγάλων διαστάσεων παρουσιάζει μεγάλα προβλήματα, κυρίως όσον αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με την ταχύτητα της προσομοίωσης.

Στο 4ο Κεφάλαιο της ΔΕ με χρήση του κώδικα PENELOPE γίνεται ο προσδιορισμός της δόσης σε ιστό που βρίσκεται 1m πάνω από το έδαφος εξαιτίας των φωτονίων που εκπέμπονται από ένα στρώμα χώματος, συγκεκριμένου πάχους, το οποίο βρίσκεται σε ορισμένο βάθος. Αρχικά έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση προκειμένου να προσδιορισθούν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά του χώματος, δηλαδή την σύστασή του και την κατακόρυφη κατανομή της πυκνότητάς του. Εντοπίσθηκε πλούσια βιβλιογραφία ειδικά όσον αφορά στην πυκνότητα του χώματος, η οποία μετά από επεξεργασία προσαρμόσθηκε στις ανάγκες της παρούσης εργασίας, ώστε να προκύψει ένα είδος χώματος που χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια.

Η γεωμετρία του προβλήματος αποφασίσθηκε να αποτελείται από διαδοχικά στρώματα χώματος, συγκεκριμένης πυκνότητας, συνολικού ύψους 40 cm, από έναν κυβικό ιστό σε απόσταση 1 m από την επιφάνεια του χώματος και από αέρα, ο οποίος πληροί όλον τον υπόλοιπο κενό χώρο. Για τον ορισμό των στρωμάτων χώματος συγκεκριμένης σύστασης και πυκνότητας, δημιουργήθηκαν νέα υλικά, μέσα στον κώδικα προσομοίωσης, σύμφωνα με την διαδικασία που ορίζει το αρχείο material.exe. Σημειώνεται ότι, εξ ορισμού από τον κώδικα προσομοίωσης, επιτρέπεται σε μία γεωμετρία να υπερβαίνει τα 10 διαφορετικά υλικά. Θεωρώντας αυτή την γεωμετρία, πραγματοποιήθηκαν 16 προσομοιώσεις, θεωρώντας διαδοχικά κυλινδρικές πηγές φωτονίων, ακτίνας 10 m και μεταβλητού ύψους, μέσα στον όγκο του χώματος, ξεκινώντας από την επιφάνεια του εδάφους, μέχρις του βάθους των 40 cm. Βέβαια, και σε αυτήν την περίπτωση απαιτήθηκε τροποποίηση του κώδικα χρήστη PENMAIN, ώστε να ορίζει κυλινδρική πηγή φωτονίων, συγκεκριμένων κάθε φορά διαστάσεων, και έλεγχος της ομοιόμορφης κατανομής των αρχικών θέσεων των σωματιδίων μέσα στην πηγή. Επισημαίνεται ότι κάθε κυλινδρική πηγή φωτονίων ελήφθη να εκπέμπει σφαιρικά, ώστε να ληφθούν υπόψη οι σκεδάσεις και οπισθοσκεδάσεις των φωτονίων μέσα στο χώμα.

Από τις προσομοιώσεις που έγιναν, προέκυψε τελικά η συνεισφορά στη δόση (eV/g) κάθε στρώματος χώματος, συγκεκριμένης πυκνότητας, όπως αυτά ορίστηκαν στις προσομοιώσεις. Για την πρώτη κυλινδρική πηγή φωτονίων που προσομοιώσαμε συγκρίθηκε η τιμής της δόσης με την τιμή που προκύπτει από την αντίστοιχη θεωρητική σχέση που ορίσθηκε στο 2ο Κεφάλαιο και διαπιστώθηκε οι δύο αυτές τιμές συγκλίνουν ικανοποιητικά. Τέλος, προσδιορίσθηκε η σχέση μετατροπής της δόσης (eV/g) σε ρυθμό δόσης ανά μονάδα συγκέντρωσης του ^{137}Cs στο έδαφος, δηλαδή (nGy/h)/(Bq/kg), και, τελικά, για κάθε στρώμα χώματος, προσδιορίσθηκε ένας συντελεστής μετατροπής της συγκέντρωσης ^{137}Cs σε ρυθμό δόσης. Τονίζεται ότι οι συντελεστές μετατροπής που προσδιορίσθηκαν αφορούν σε ρυθμό δόσης σε ανθρώπινο ιστό.

Στο 5ο Κεφάλαιο γίνεται αρχικά μία ενδελεχής βιβλιογραφική διερεύνηση αναφορικά με την κατά βάθος κατανομή που ακολουθεί το ^{137}Cs, στο έδαφος. Διαπιστώθηκε ότι, συνήθως, η συγκέντρωση του ^{137}Cs στο χώμα

ακολουθεί γνησίως φθίνουσα κατανομή με μέγιστη τιμή στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ, σε λίγες περιπτώσεις διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζει μέγιστο σε βάθος μερικών εκατοστών από την επιφάνεια του εδάφους.

Με χρήση των συντελεστών μετατροπής της συγκέντρωσης ^{137}Cs σε ρυθμό δόσης, και θεωρώντας μία τυπική κατά βάθος κατανομή ^{137}Cs από τη βιβλιογραφία υπολογίσθηκε ο ρυθμός δόσης σε ύψος 1m πάνω από το έδαφος για την υπόψη περίπτωση κατανομής. Συγκρίνοντας τον συνολικό ρυθμό δόσης που προέκυψε με αυτόν της βιβλιογραφικής πηγής προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μέθοδος υπολογισμού του συνολικού ρυθμού δόσης, εξαιτίας της κατακόρυφης κατανομής του ^{137}Cs, όπως αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ΔΕ, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εκτιμήσει το ρυθμό δόσης για οποιαδήποτε κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs, πολύ εύκολα, απλά με τη χρήση ενός φύλλου EXCEL.

Καθώς η παρούσα ΔΕ είχε ως στόχο την κατάστρωση μίας μεθοδολογίας για τον ακριβή υπολογισμό της δόσης εξαιτίας της παρουσίας ενός ραδιενεργού ισοτόπου στο έδαφος, και συγκεκριμένα του ^{137}Cs, με χρήση αποκλειστικά του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE και όχι καθ' αυτό τον αριθμητικό προσδιορισμό της δόσης για συγκεκριμένο πρόβλημα, υπάρχουν πολλά περιθώρια περαιτέρω εξέλιξης και βελτίωσης του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Έτσι, είναι καταρχήν δυνατό η χρήση αυτής της μεθοδολογίας να επεκταθεί για οποιοδήποτε άλλο τεχνητό ή φυσικό ραδιενεργό ισότοπο. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα να γίνει πιο ακριβής μελέτη της σύστασης του εδάφους και της κατακόρυφης κατανομής της πυκνότητάς του, καθώς και της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης του ^{137}Cs στο έδαφος. Είναι δε εξαιρετικά ενδιαφέρον να συσχετισθούν τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας αυτής και με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων εκτίμησης του ρυθμού δόσης, αλλά και με σχετικά πειραματικά αποτελέσματα. Τέλος θα είχε ενδιαφέρον να προσδιορισθούν συντελεστές μετατροπής της δόσης και για άλλους τύπους χώματος και κατά βάθος κατανομές της πυκνότητας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Π.1.1. Ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης του αέρα

Air, Dry (Near Sea Level)

	Energy (MeV)	μ/ρ (cm^2/g)
	1.00000E-03	3.606E+03
	1.50000E-03	1.191E+03
	2.00000E-03	5.279E+02
	3.00000E-03	1.625E+02
	3.20290E-03	1.340E+02
18 K	3.20290E-03	1.485E+02
	4.00000E-03	7.788E+01
	5.00000E-03	4.027E+01
	6.00000E-03	2.341E+01
	8.00000E-03	9.921E+00
	1.00000E-02	5.120E+00
	1.50000E-02	1.614E+00
	2.00000E-02	7.779E-01
	3.00000E-02	3.538E-01
	4.00000E-02	2.485E-01
	5.00000E-02	2.080E-01
	6.00000E-02	1.875E-01
	8.00000E-02	1.662E-01
	1.00000E-01	1.541E-01
	1.50000E-01	1.356E-01
	2.00000E-01	1.233E-01
	3.00000E-01	1.067E-01
	4.00000E-01	9.549E-02
	5.00000E-01	8.712E-02
	6.00000E-01	8.055E-02
	8.00000E-01	7.074E-02

1.00000E+00	6.358E-02
1.25000E+00	5.687E-02
1.50000E+00	5.175E-02
2.00000E+00	4.447E-02
3.00000E+00	3.581E-02
4.00000E+00	3.079E-02
5.00000E+00	2.751E-02
6.00000E+00	2.522E-02
8.00000E+00	2.225E-02
1.00000E+01	2.045E-02
1.50000E+01	1.810E-02
2.00000E+01	1.705E-02

Π.1.2. Ολικός μαζικός συντελεστής απορρόφησης ανθρώπινου μαλακού ιστού

Tissue, Soft (ICRU-44)

	Energy (MeV)	μ_{en}/ρ (cm²/g)
	1.00000E-03	3.701E+03
	1.03542E-03	3.376E+03
	1.07210E-03	3.079E+03
11 K	1.07210E-03	3.090E+03
	1.50000E-03	1.247E+03
	2.00000E-03	5.577E+02
	2.14550E-03	4.566E+02
15 K	2.14550E-03	4.629E+02
	2.30297E-03	3.782E+02
	2.47200E-03	3.086E+02
16 K	2.47200E-03	3.137E+02
	2.64140E-03	2.594E+02
	2.82240E-03	2.142E+02
17 K	2.82240E-03	2.169E+02
	3.00000E-03	1.819E+02
	3.60740E-03	1.061E+02
19 K	3.60740E-03	1.089E+02
	4.00000E-03	8.030E+01
	5.00000E-03	4.135E+01
	6.00000E-03	2.389E+01
	8.00000E-03	9.935E+00
	1.00000E-02	4.987E+00
	1.50000E-02	1.402E+00
	2.00000E-02	5.663E-01
	3.00000E-02	1.616E-01
	4.00000E-02	7.216E-02
	5.00000E-02	4.360E-02
	6.00000E-02	3.264E-02
	8.00000E-02	2.617E-02

1.00000E-01	2.545E-02
1.50000E-01	2.745E-02
2.00000E-01	2.942E-02
3.00000E-01	3.164E-02
4.00000E-01	3.249E-02
5.00000E-01	3.269E-02
6.00000E-01	3.254E-02
8.00000E-01	3.176E-02
1.00000E+00	3.074E-02
1.25000E+00	2.938E-02
1.50000E+00	2.807E-02
2.00000E+00	2.583E-02
3.00000E+00	2.259E-02
4.00000E+00	2.045E-02
5.00000E+00	1.895E-02
6.00000E+00	1.786E-02
8.00000E+00	1.639E-02
1.00000E+01	1.547E-02
1.50000E+01	1.422E-02
2.00000E+01	1.362E-02

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΑΡΧΕΙΟ PDCOMPOS.P05,ΜΕ ΤΟΥΣ ΚΩΔΙΚΟΥΣ ΑΡΙΘΜΟΥΣ ΤΟΥΣ

Π.2.1. Στοιχεία (κωδικός αριθμός = ατομικός αριθμός)

1 Hydrogen
2 Helium
3 Lithium
4 Beryllium
5 Boron
6 Amorphous carbon
7 Nitrogen
8 Oxygen
9 Fluorine
10 Neon
11 Sodium
12 Magnesium
13 Aluminum
14 Silicon
15 Phosphorus
16 Sulfur
17 Chlorine
18 Argon
19 Potassium
20 Calcium
21 Scandium
22 Titanium
23 Vanadium
24 Chromium
25 Manganese
26 Iron
27 Cobalt
28 Nickel
29 Copper
30 Zinc
31 Gallium
32 Germanium
33 Arsenic
34 Selenium
35 Bromine
36 Krypton
37 Rubidium
38 Strontium
39 Yttrium
40 Zirconium
41 Niobium
42 Molybdenum
43 Technetium
44 Ruthenium
45 Rhodium
46 Palladium
47 Silver
48 Cadmium
48 Cadmium
49 Indium
50 Tin
51 Antimony
52 Tellurium
53 Iodine
54 Xenon
55 Cesium
56 Barium
57 Lanthanum
58 Cerium
59 Praseodymium
60 Neodymium
61 Promethium
62 Samarium
63 Europium

64 Gadolinium
65 Terbium
66 Dysprosium
67 Holmium
68 Erbium
69 Thulium
70 Ytterbium
71 Lutetium
72 Hafnium
73 Tantalum
74 Tungsten
75 Rhenium
76 Osmium
77 Iridium
78 Platinum
79 Gold
80 Mercury
81 Thallium
82 Lead
83 Bismuth
84 Polonium
85 Astatine
86 Radon
87 Francium
88 Radium
89 Actinium
90 Thorium
91 Protactinium
92 Uranium
93 Neptunium
94 Plutonium
95 Americium
96 Curium
97 Berkelium
98 Californium
99 Einsteinium

Π.2.2. Ενώσεις και Μίγματα (αλφαβητικά)

100 Acetone
101 Acetylene
102 Adenine
103 Adipose tissue (ICRP)
104 Air, dry (near sea level)
105 Alanine
106 Aluminum oxide
107 Amber
108 Ammonia
109 Aniline
110 Anthracene
111 B-100 bone-equivalent plastic
112 Bakelite
113 Barium fluoride
114 Barium sulfate
115 Benzene
116 Beryllium oxide
117 Bismuth germanium oxide
118 Blood (ICRP)
119 Bone, compact (ICRU)
120 Bone, cortical (ICRP)
121 Boron carbide
122 Boron oxide
123 Brain (ICRP)
124 Butane
125 N-butyl alcohol
126 C-552 air-equivalent plastic
127 Cadmium telluride
128 Cadmium tungstate
129 Calcium carbonate
130 Calcium fluoride
131 Calcium oxide
132 Calcium sulfate
133 Calcium tungstate
134 Carbon dioxide
135 Carbon tetrachloride
136 Cellulose acetate, cellophane
137 Cellulose acetate butyrate
138 Cellulose nitrate
139 Ceric sulfate dosimeter solution
140 Cesium fluoride
141 Cesium iodide
142 Chlorobenzene
143 Chloroform
144 Concrete, portland
145 Cyclohexane
146 1,2-dichlorobenzene
147 Dichlorodiethyl ether
148 1,2-dichloroethane
149 Diethyl ether
150 N,n-dimethyl formamide
151 Dimethyl sulfoxide
152 Ethane
153 Ethyl alcohol
154 Ethyl cellulose
155 Ethylene
156 Eye lens (ICRP)
157 Ferric oxide
158 Ferroboride
159 Ferrous oxide
160 Ferrous sulfate dosimeter solution
161 Freon-12
162 Freon-12b2
163 Freon-13
164 Freon-13b1
165 Freon-13i1
166 Gadolinium oxysulfide
167 Gallium arsenide
168 Gel in photographic emulsion
169 Pyrex glass
170 Glass, lead
171 Glass, plate
172 Glucose
173 Glutamine

174 Glycerol
175 Graphite
176 Guanine
177 Gypsum, plaster of Paris
178 N-heptane
179 N-hexane
180 Kapton polyimide film
181 Lanthanum oxybromide
182 Lanthanum oxysulfide
183 Lead oxide
184 Lithium amide
185 Lithium carbonate
186 Lithium fluoride
187 Lithium hydride
188 Lithium iodide
189 Lithium oxide
190 Lithium tetraborate
191 Lung (ICRP)
192 M3 wax
193 Magnesium carbonate
194 Magnesium fluoride
195 Magnesium oxide
196 Magnesium tetraborate
197 Mercuric iodide
198 Methane
199 Methanol
200 Mix d wax
201 Ms20 tissue substitute
202 Muscle, skeletal (ICRP)
203 Muscle, striated (ICRU)
204 Muscle-equivalent liquid, with sucrose
205 Muscle-equivalent liquid, without sucrose
206 Naphthalene
207 Nitrobenzene
208 Nitrous oxide
209 Nylon, du Pont elvamide 8062
210 Nylon, type 6 and type 6/6
211 Nylon, type 6/10
212 Nylon, type 11 (rilsan)
213 Octane, liquid
214 Paraffin wax
215 N-pentane
216 Photographic emulsion
217 Plastic scintillator (vinyltoluene based)
218 Plutonium dioxide
219 Polyacrylonitrile
220 Polycarbonate (makrolon, lexan)
221 Polychlorostyrene
222 Polyethylene
223 Polyethylene terephthalate (mylar)
224 Polymethyl methacrilate (lucite, perspex, plexiglass)
225 Polyoxymethylene
226 Polypropylene
227 Polystyrene
228 Polytetrafluoroethylene (teflon)
229 Polytrifluorochloroethylene
230 Polyvinyl acetate
231 Polyvinyl alcohol
232 Polyvinyl butyral
233 Polyvinyl chloride
234 Polyvinylidene chloride (saran)
235 Polyvinylidene fluoride
236 Polyvinyl pyrrolidone
237 Potassium iodide
238 Potassium oxide
239 Propane
240 Propane, liquid
241 N-propyl alcohol
242 Pyridine
243 Rubber, butyl
244 Rubber, natural
245 Rubber, neoprene
246 Silicon dioxide
247 Silver bromide
248 Silver chloride
249 Silver halides in photographic emulsion
250 Silver iodide

251 Skin (ICRP)
252 Sodium carbonate
253 Sodium iodide
254 Sodium monoxide
255 Sodium nitrate
256 Stilbene
257 Sucrose
258 Terphenyl
259 Testes (ICRP)
260 Tetrachloroethylene
261 Thallium chloride
262 Tissue, soft (ICRP)
263 Tissue, soft (ICRU four-component)
264 Tissue-equivalent gas (methane based)
265 Tissue-equivalent gas (propane based)
266 Tissue-equivalent plastic (A-150)
267 Titanium dioxide
268 Toluene
269 Trichloroethylene
270 Triethyl phosphate
271 Tungsten hexafluoride
272 Uranium dicarbide
273 Uranium monocarbide
274 Uranium oxide
275 Urea
276 Valine
277 Viton fluoroelastomer
278 Water, liquid
279 Water vapor
280 Xylene

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

ΕΜΜΕΣΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΟΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΑΠΟΤΙΘΕΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ENERGY DEPOSITION DETECTOR)

Οι τιμές της αποτιθέμενης ενέργειας στους δύο ανιχνευτές μπορεί εύκολα να επιβεβαιωθούν από τα αναλυτικά δεδομένα που παρατίθενται στα αρχεία pm_spc_enddet_1.dat και pm_spc_enddet_2.dat.

ΒΗΜΑ 1

Υπολογίζεται το πλήθος των φωτονίων, τα οποία αποθέτουν ενέργεια εμπίπτουσα σε κάθε μία ενεργειακή περιοχή που ορίζεται στο αντίστοιχο αρχείο pm_spc_enddet_#.dat (# = 1 , 2), μέσω της σχέσης:

$$\boxed{photons = PDF \times dE \times total_photons}$$

όπου:

- photons : το πλήθος των φωτονίων που αποθέτουν ενέργεια εντός μιας ενεργειακής περιοχής
- PDF : η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ενεργειακής περιοχής ~(1/(eV×particle)). Πρόκειται για την δεύτερη στήλη του αρχείου εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης δόσης.
- DE : το εύρος της ενεργειακής περιοχής (eV). Στην συγκεκριμένη περίπτωση, προκύπτει ίσο με 6000 eV.
- total photons : το συνολικό πλήθος των φωτονίων που εκπέμφθηκαν από την πηγή (ιστορίες). Ο συνολικός αριθμός φωτονίων που προσομοιώθηκαν καταγράφεται, σύμφωνα με τα όσα προβλέπει ο κώδικας χρήστη, στο αρχείο εξόδου penmain.dat, όπως αναφέρθηκε στην §3.2.1.3. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση, ο αριθμός των ιστοριών που προσομοιώθηκαν είναι 6.724256E+08.

ΒΗΜΑ 2

Υπολογίζεται η συνολική αποτιθέμενη ενέργεια στον ανιχνευτή, από όλα τα φωτόνια, ως υπέρθεση των ενεργειών που κάθε φωτόνιο αποθέτει, με χρήση της σχέσης:

$$E_{tot} = \sum_i E_i \cdot photons_i \qquad (3.2)$$

όπου:

- E_{tot} : η συνολικά αποτιθέμενη ενέργεια όλων των φωτονίων της προσομοίωσης
- E_i : η μέση ενέργεια της i ενεργειακής περιοχής. Πρόκειται για την πρώτη στήλη του αρχείου εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης δόσης.
- $photons_i$: το πλήθος των φωτονίων, τα οποία αποθέτουν στον ανιχνευτή ενέργεια εντός της i ενεργειακής περιοχής, όπως αυτό προέκυψε από το Βήμα1.

Τελικά, η αποτιθέμενη ενέργεια σε κάθε ανιχνευτή προκύπτει ίση με:

E_1 = 1.293275 eV στον ανιχνευτή 1 (κυβικός, ακμής 2cm)

E_2 = 0.724728 eV στον ανιχνευτή 2 (σφαιρικός, ακτίνας 1cm)

ΒΗΜΑ 3

Συγκρίνουμε την τιμή της αποτιθέμενης ενέργειας, όπως αυτή προκύπτει από το αρχείο εξόδου penmain.dat., για τους δύο ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας, με αυτή που υπολογίσαμε προηγουμένως. Έτσι, για τον μεν κυβικό ανιχνευτή, η τιμή που προκύπτει από το αρχείο penmain.dat είναι 1.293530E+00 και η τιμή που υπολογίσαμε είναι 1.293275E+00, για τον δε σφαιρικό ανιχνευτή, είναι 7.247399E-01 και 7.247284E-01, αντίστοιχα. Η τιμή, λοιπόν, της μέσης αποτιθέμενης ενέργειας που υπολογίστηκε μέσω του αρχείου εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας είναι στατιστικά η ίδια με την αντίστοιχη τιμή που υπολογίζει το πρόγραμμα μέσω της προσομοίωσης,

την οποία αποθηκεύει στο αρχείο αποτελεσμάτων penmain.dat. Η απόκλιση, την οποία αποδίδουμε σε στρογγυλοποιήσεις κατά την διάρκεια των υπολογισμών, υπολογίζεται, για τον κυβικό και σφαιρικό ανιχνευτή, αντίστοιχα:

$$[(1.293530-1.293275)/1.293530]\times 100 = 0.0197\%$$
$$[(0.7247399-0.7247284)/0.7247399]\times 100 = 0.0016\%$$

ποσοστά που μας δίνουν την δυνατότητα να θεωρήσουμε ότι οι δύο τιμές ταυτίζονται.

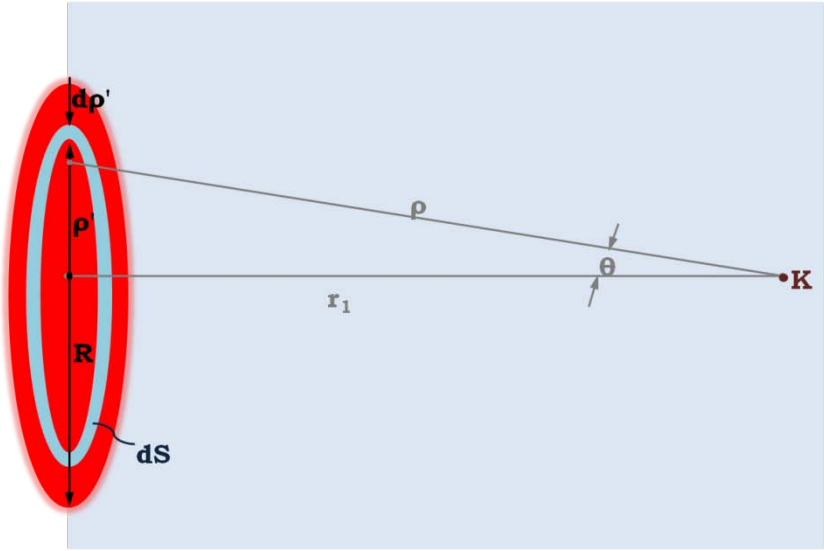
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ & ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ

Η δόση, όταν δεν εξαρτάται από την επιφάνεια της πηγής, είναι λογαριθμική συνάρτηση της ακτίνας της πηγής, όπως επιβεβαιώνεται ακολούθως.

Σύμφωνα με τον Λεωνίδου (1984), θεωρούμε δισκοειδή πηγή φωτονίων ενέργειας E_γ (MeV), ακτίνας R (cm), που εκπέμπει ισότροπα Q φωτόνια/cm^2·sec και εξετάζουμε την ροή των φωτονίων σε δεδομένο σημείο K.

Εφόσον πρόκειται για σημείο, απορρόφηση της ακτινοβολίας στην ύλη δεν υφίσταται. Επιπλέον, στην συγκεκριμένη προσέγγιση αμελούμε την εξασθένηση της ακτινοβολίας στον αέρα. Επομένως, ο μόνος παράγοντας απομείωσης της ροής είναι η απόσταση (νόμος αντιστρόφων τετραγώνων).



Σχήμα Π4.1. Γεωμετρία υπολογισμού ροής εξαιτίας δισκοειδούς πηγής φωτονίων.

Ισχύει: $\rho = \sqrt{\rho'^2 + r_1^2}$

$\rho' \cdot d\rho' = \rho \cdot d\rho$

Η στοιχειώδης ροή στο σημείο K λόγω της στοιχειώδους πηγής επιφάνειας dS=2πρ'×dρ' θα είναι:

$$d\Phi = \frac{Q \times 2\pi\rho' \times d\rho'}{4\pi\rho^2} \Rightarrow d\Phi = \frac{Q \times \rho \times d\rho}{2\rho^2} \Rightarrow d\Phi = \frac{Q \times d\rho}{2\rho}$$

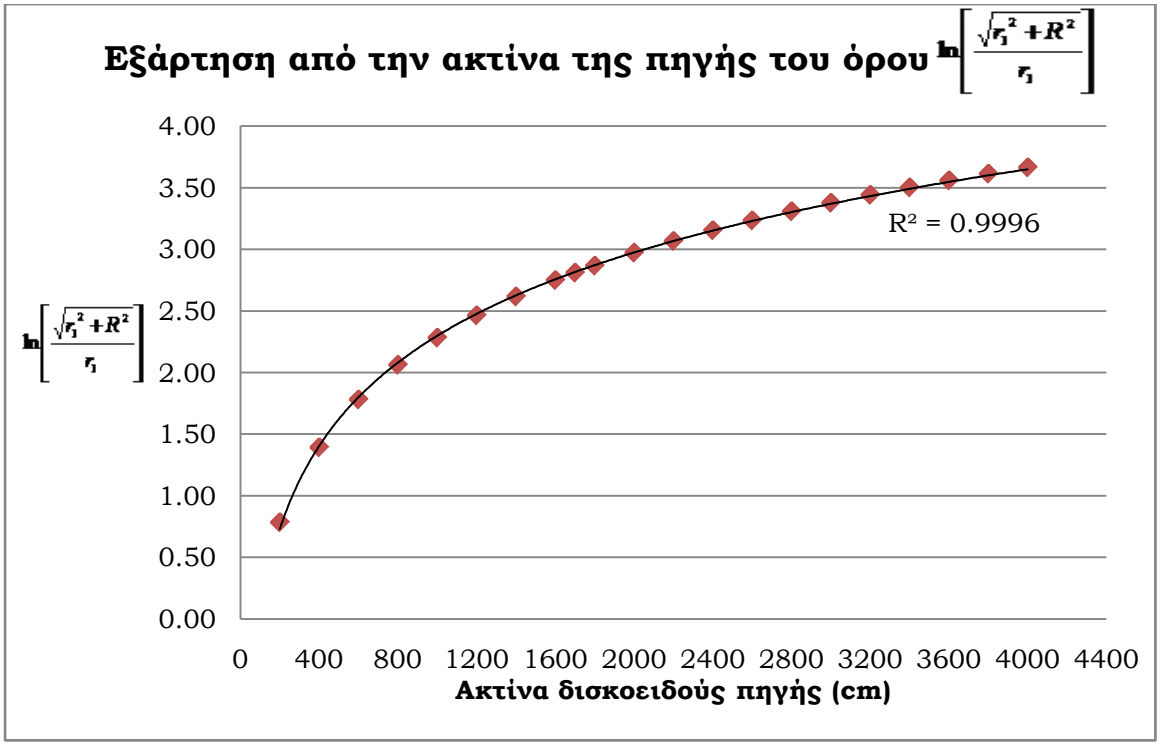
Ολοκληρώνοντας ως προς ρ από r_1 έως $\sqrt{r_1^2 + R^2}$ παίρνουμε:

$$\Phi = \frac{Q}{2} \times \int_{r_1}^{\sqrt{r_1^2+R^2}} \frac{d\rho}{\rho} \Rightarrow \Phi = \frac{Q}{2} \times \ln\left[\frac{\sqrt{r_1^2 + R^2}}{r_1}\right]$$

Η εξάρτηση της ροής των φωτονίων από την ακτίνα της πηγής εκφράζεται από τον όρο $\ln\left[\frac{\sqrt{r_1^2 + R^2}}{r_1}\right]$. Στο πρόβλημα που εξετάστηκε στην §3.4.2, η απόσταση r_1 από το κέντρο της πηγής έως το κέντρο του ιστού, όπου υπολογίζεται η δόση, είναι ίση με 101 cm (100 cm αέρα+2/2 cm ιστού). Έτσι, υπολογίζουμε την τιμή του όρου, που εκφράζει την εξάρτηση της ροής από την ακτίνα της πηγής, για διάφορες τιμές της ακτίνας της πηγής. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον πίνακα και στο διάγραμμα που ακολουθούν.

Ακτίνα Δίσκου R (cm)	$\ln\left[\frac{\sqrt{r_1^2 + R^2}}{r_1}\right]$		
200	0.785063	**2200**	2.972351
400	1.393401	**2400**	3.067434
600	1.781450	**2600**	3.154272
800	2.062890	**2800**	3.234180
1000	2.283118	**3000**	3.308181
1200	2.463849	**3200**	3.377088
1400	2.617038	**3400**	3.441556
1600	2.749944	**3600**	3.502122
1800	2.810335	**3800**	3.559231
2000	2.867298	**4000**	3.613257

Πίνακας Π4.1. Μεταβολή του όρου $ln\left[\frac{\sqrt{r_1^2+R^2}}{r_1}\right]$ για διάφορες ακτίνες πηγής.

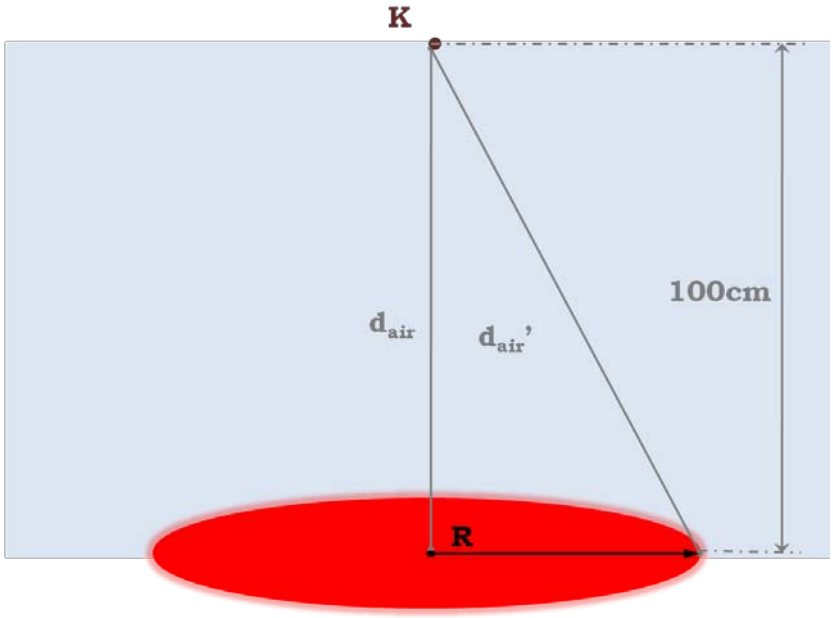


Σχήμα Π4.2. Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης του όρου $ln\left[\frac{\sqrt{r_1^2+R^2}}{r_1}\right]$ από την ακτίνα της δισκοειδούς πηγής.

Στο παραπάνω διάγραμμα, στα σημεία που προέκυψαν από τους θεωρητικούς υπολογισμούς, προσαρμόσαμε λογαριθμική συνάρτηση. Επίσης, όπως αναφέραμε προηγουμένως, η εξάρτηση της ροής των φωτονίων από την ακτίνα της πηγής εκφράζεται από τον όρο $\ln\left[\frac{\sqrt{r_1^2+R^2}}{r_1}\right]$, ο οποίος αποτελεί πολύ καλή λογαριθμική συνάρτηση της ακτίνας της δισκοειδούς πηγής. Επομένως και η ροή των φωτονίων αποτελεί λογαριθμική συνάρτηση της ακτίνας της πηγής. Επιπλέον, εφόσον η δόση συνδέεται με την ακτίνα μόνο μέσω της ροής των φωτονίων, ακολουθεί το ίδιο προφίλ. Επιβεβαιώνεται, δηλαδή, ότι η δόση τελικά αποτελεί λογαριθμική συνάρτηση της ακτίνας της πηγής.

Ωστόσο, πρέπει να σημειώσουμε ότι η εξασθένηση της ακτινοβολίας στον αέρα δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, σε διατάξεις όπου υπάρχει απόσταση μεταξύ πηγής και απορροφητή, όπως αποδεικνύεται ακολούθως.

Θεωρούμε την διάταξη του σχήματος, όπου εξετάζουμε την ροή της ακτινοβολίας στο σημείο Κ. Έστω ότι η πηγή εκπέμπει φωτόνια ενέργειας E_γ=660 keV και η απόσταση του σημείου Κ από την πηγή ότι είναι 100 cm.



Σχήμα Π4.3. Υπολογισμός εξασθένησης τη ακτινοβολίας στον αέρα.

Η εξασθένηση της ακτινοβολίας στον αέρα δίνεται από την σχέση:

$$I = I_0 \times e^{-\mu_{air} \cdot d_{air}}$$
$$\Rightarrow \frac{I}{I_0} = e^{-\mu_{air} \cdot d_{air}}$$

Για E_γ=660 keV, με γραμμική παρεμβολή, από το Παράρτημα 1-Π.1.1., προσδιορίζουμε τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένησης του αέρα ίσο με $(\mu/\rho)_{air}$=0.077607cm^2/g. Λαμβάνοντας ρ_{air}=1.20479×10^{-3}g/cm^3 υπολογίζουμε τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης του αέρα ως εξής:

$$\mu_{air} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{air} \times \rho_{air}$$
$$\Rightarrow \mu_{air} = 0.077607 cm^2 / g \times 1.20479 \times 10^{-3} g / cm^3$$
$$\Rightarrow \mu_{air} = 9.35 \times 10^{-5} cm^{-1}$$

Συνεπώς, υπολογίζουμε την απομείωση της ακτινοβολίας για διάφορες αποστάσεις.

- Για d_{air} = 100 cm → $\mu_{air} \times d_{air} = 9.35 \times 10^{-3}$

  Οπότε $\frac{I}{I_0} = 0.99069$ ή ~ 99.1 %

- Για R = 500 cm → $d'_{air} = \sqrt{R^2 + d_{air}{}^2}$
  $\Rightarrow d'_{air} = \sqrt{500^2 + 100^2}$
  $\Rightarrow d'_{air} = 509.9cm$

  d'_{air} = 509,9 cm → $\mu_{air} \times d'_{air} = 0.047676$

  Οπότε $\frac{I}{I_0} = 0.95344$ ή ~ 95.3 %

- Για R = 1000 cm → $d'_{air} = \sqrt{R^2 + d_{air}{}^2}$
  $\Rightarrow d'_{air} = \sqrt{1000^2 + 100^2}$
  $\Rightarrow d'_{air} = 1005cm$

  d'_{air} = 1005 cm → $\mu_{air} \times d'_{air} = 0.093968$

  Οπότε $\frac{I}{I_0} = 0.91031$ ή ~ 91 %

Δηλαδή, εάν η πηγή μας έχει ακτίνα 10m, τότε η **εξασθένηση της ακτινοβολίας εξαιτίας του αέρα** είναι της τάξης του **9%**, μέγεθος μη αμελητέο.

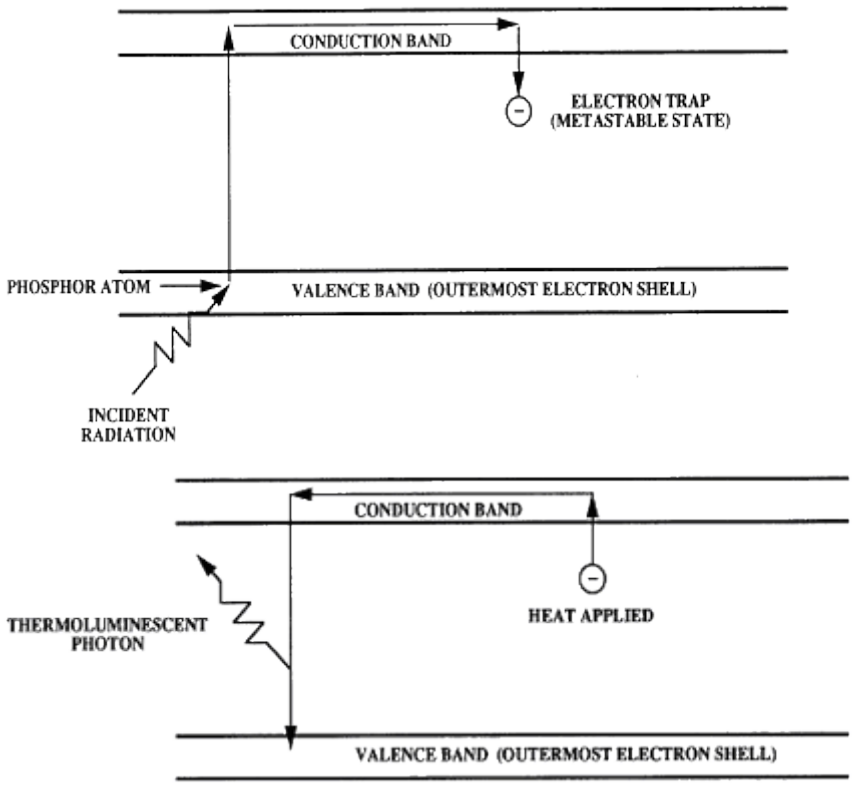
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5

ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑ - ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΑ (TLDs)

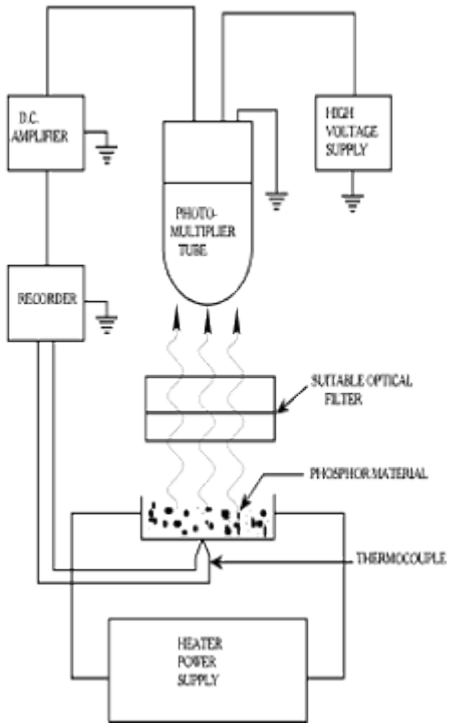
Σημειώνουμε ότι θερμοφωταύγεια (thermo-luminescence) ονομάζεται η ιδιότητα ορισμένων υλικών να μετατρέπουν την ενέργεια που προέρχεται από ακτινοβόληση από ιονίζουσα ακτινοβολία σε ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος, συνήθως στα όρια του ορατού φωτός. Η φωταύγεια διαχωρίζεται στον φθορισμό (fluorescence), ο οποίος αναφέρεται στην εκπομπή φωτεινής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια ή κλάσματα του δευτερολέπτου μετά την ακτινοβόληση, και στον φωσφορισμό (phosphorescence), ο οποίος αναφέρεται στην εκπομπή ακτινοβολίας μετά το πέρας της ακτινοβόλησης (διάστημα δευτερολέπτων έως και εβδομάδων) και ο οποίος μας ενδιαφέρει στην παρούσα φάση.

Οι ανιχνευτές αυτοί, λοιπόν, ακολουθούν την εξής αρχή λειτουργίας: Κατά την έκθεσή τους σε ιονίζουσα ακτινοβολία, τα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος διεγείρονται και ηλεκτρόνια μεταπηδούν από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας, καθιστώντας το υλικό μετασταθές. Υπό κανονικές συνθήκες, τα ηλεκτρόνια παραμένουν σε αυτή την κατάσταση. Θερμαίνοντας, όμως, το υλικό, τα ηλεκτρόνια επανέρχονται στις χαμηλότερες ενεργειακές στοιβάδα, εκπέμποντας φωτόνια αντίστοιχης ενέργειας, συνήθως υπό την μορφή ορατού φωτός [Σχήμα Π5.1].

Το εκπεμπόμενο φως μετράται με την χρήση φωτοπολλαπλασιαστή και ο αριθμός των φωτονίων που μετρώνται είναι ανάλογος της ποσότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Μία τυπική διάταξη ανάλυσης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από ένα TLD εμφανίζεται στο Σχήμα Π5.2.



Σχήμα Π5.1. Αρχή λειτουργίας TLD



Σχήμα Π5.2. Διάταξη ανάγνωσης TLD

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΝΕΩΝ ΑΡΧΕΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής των δεδομένων για τα στοιχεία που αποτελούν το υλικό που συνθέτουμε (στην περίπτωσή της παρούσας Δ.Ε., χώμα δεδομένης σύστασης και πυκνότητας), βάσει αυτών, το πρόγραμμα εμφανίζει συγκεντρωτικά την σύσταση του νέου υλικού, όπως φαίνεται ακολούθως:

```
  Enter atomic number and fraction by weight of the  6-th element ...
20
3.095

  Element: Ca (Z=20), fraction by weight = 3.09500E+00

  Enter atomic number and fraction by weight of the  7-th element ...
26
4.307

  Element: Fe (Z=26), fraction by weight = 4.30700E+00

  Element: H  (Z= 1), atoms/molecule = 5.87735E-01
  Element: O  (Z= 8), atoms/molecule = 1.00000E+00
  Element: Al (Z=13), atoms/molecule = 7.31330E-02
  Element: Si (Z=14), atoms/molecule = 2.38368E-01
  Element: K  (Z=19), atoms/molecule = 2.23405E-02
  Element: Ca (Z=20), atoms/molecule = 2.17942E-02
  Element: Fe (Z=26), atoms/molecule = 2.17651E-02
```

Σχήμα Π6.1. Ισοτοπική σύσταση του νέου υλικού.

Στο σημείο αυτό, η σύσταση του νέου υλικού δεν παρουσιάζεται σε όρους συγκέντρωσης κατά βάρος (%) κάθε στοιχείου στο νέο υλικό, αλλά παρουσιάζεται ο αριθμός των ατόμων του στοιχείου αυτού που περιέχονται σε ένα μόριο του νέου υλικού. Για τον υπολογισμό αυτό, γίνεται η θεώρηση ότι το στοιχείο με την μεγαλύτερη συγκέντρωση συνεισφέρει 1 άτομο/μόριο υλικού, δηλαδή ότι:

Σε 1 μόριο χώματος περιέχεται 1 άτομο Ο.

Όμως, στην πραγματικότητα ισχύει το εξής:

Σε 1 μόριο χώματος περιέχονται $\frac{56.690}{16.00}$=3.543125 άτομα Ο.

Με βάση, λοιπόν, αυτή την θεώρηση ανάγονται όλες οι συγκεντρώσεις των στοιχείων ως προς την συγκέντρωση του οξυγόνου, που θεωρείται μοναδιαία, ως εξής:

Σε 1 μόριο χώματος περιέχονται $\frac{2.099}{1.008}/3.543125$ = 0.587713 άτομα H.

Σε 1 μόριο χώματος περιέχονται $\frac{6.992}{26.98}/3.543125$ = 0.073143 άτομα Al.

Σε 1 μόριο χώματος περιέχονται $\frac{23.722}{28.09}/3.543125$ = 0.238349 άτομα Si.

Σε 1 μόριο χώματος περιέχονται $\frac{3.095}{39.10}/3.543125$= 0.022341 άτομα K.

Σε 1 μόριο χώματος περιέχονται $\frac{3,095}{40.08}/3.543125$= 0.021794 άτομα Ca.

Σε 1 μόριο χώματος περιέχονται $\frac{4.307}{55.84}/3.543125$= 0.021769 άτομα Fe.

Σε καθένα από τα παραπάνω κλάσματα, ο αριθμητής αποτελεί την % κατά βάρος συγκέντρωση του στοιχείου στο υλικό και ο παρονομαστής το ατομικό βάρος του στοιχείου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Arapis G.D., Karandinos M.G., 2004. Migration of 137Cs in the soil of sloping semi-natural ecosystems in Northern Greece. Journal of Environmental Radioactivity 77 (2), 133–142.

Arapis G., Petrayev E., Shagalova E., Zhukova O., Sokolik G., Ivanova T., 1997. Effective migration velocity of ^{137}Cs and ^{90}Sr as a function of the type of soils in Belarus. Journal of Environmental Radioactivity 34 (2), 171-185.

Bresson L. M., Moran C. J., Assouline S., 2004. Use of bulk density profiles from x-radiography to examine structural crust models. Soil Science Society of America Journal 68, 1169-1176.

Bunzl K., Schimmack W., Jacob P., 2001. Uncertainty analysis of the external gamma-dose rate due to the variability of the vertical distribution of 137Cs in the soil. Journal of Environmental Radioactivity 54 (2), 243-252.

Clouvas A., Xanthos S., Antonopoulos-Domis M., Alifragis D.A., 2005. Radiocesium gamma dose rates in Greek pine forest: measurements and Monte Carlo computations. Radioactivity in the Environment 7, 1155-1166.

Endo S., Tosaki N., Hoshi M., Shizuma K., 2000. Neutron dose equivalent estimation from the specific activity of ^{51}Cr. Journal of Environmental Radioactivity 50 (1-2), 89-96.

General Soil Test Interpretation Guide. Soiltest Farm Consultants, inc.

Golosov V.N., Walling D.E., Kvasnikova E.V., Stukin E.D., Nikolaev A.N., Panin A.V., 2000. Application of a field-portable scintillation detector for studying the distribution of ^{137}Cs inventories in a small basin in Central Russia. Journal of Environmental Radioactivity 48 (1), 79-94.

Goncharov V.M., Shein E.V., Faustova E.V., Tymbaev V.G. The complex agrophysical evaluation criteria of soil cover. Moscow State University. 9th International Conference on Agrophysics, 2005.

Ivanov Y.A., Lewyckyj N., Levchuk S.E., Prister B.S., Firsakova S.K., Arkhipov N.P., Arkhipov A.N., Kruglov S.V., Alexakhini R.M., Sandallsg J., Askbranth S., 1997. Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr from Chernobyl fallout in Ukrainian, Belarussian and Russian soils. Journal of Environmental Radioactivity 35 (1), 1-21.

Krstić D., Nikezić D., Stevanović N. Jelić M., 2004. Vertical profile of ^{137}Cs in soil. Applied Radiation and Isotopes 61 (6), 1487-1492.

Kudelsky A.V., Smith J.T., Ovsiannikova S.V., Hiltonb J., 1996. Mobility of Chernobyl-derived 137Cs in a peatbog system within the catchment of the Pripyat River, Belarus. The Science of the Total Environment 188, 101-113.

Logsdon S. D., Cambardella C. A., 2000. Temporal changes in small depth-incremental soil bulk density. Soil Science Society of America Journal 64, 710-714.

Miller K. M., Shebell P., 1993. In situ gamma-ray spectrometry. A tutorial for environmental radiation scientists. Environmental Measurements Laboratory - U.S. Department of energy.

PENELOPE [Version 2005] Manual

Persicani D., 1995. Analysis of potential radiocaesium soil contamination: a case study using two different simulation models. Journal of Environmental Radioactivity 27 (2), 161-180.

Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J., Hinis E.P., Simopoulos S.E., 2001. Geographical mapping and associated fractal analysis of the long-lived Chernobyl fallout radionuclides in Greece. Journal of Environmental Radioactivity 53 (1), 59-66.

Pommé S., Uyttenhove J., Van Waeyenberge B., Genicot J-L., Culot J-P., Hardeman F., 1998. Radiocesium contamination in Belgium. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 235 (1-2), 139-144.

Quindos L.S., Fernández P.L., Ródenas C., Gómez-Arozamena J., Arteche J., 2004. Conversion factors for external gamma dose derived from natural radionuclide in soils. Journal of Environmental Radioactivity 71 (2), 139-145.

Ramzaev V., Yonehara H., Hille R., Barkovsky A., Mishine A., Sahoo S.K., Kurotaki K., Uchiyama M., 2006. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia, in 1996-2003. Journal of Environmental Radioactivity 85 (2-3), 205-227.

Roth C. H., 1997. Bulk density of surface crusts: depth functions and relationships to texture. Catena 29 (3-4), 223-237.

Saito K., Jacob P., 1995. Gamma ray fields in air due to sources in the ground. Radiation Protection Dosimetry 58, 29-45.

Schuller P., Ellies A., Kirchner G., 1997. Vertical migration of fallout ^{137}Cs in agricultural soils from Southern Chile. The Science of the Total Environment 193 (3), 197-205.

Shultis J.K., Faw R.E. Radiation Shielding. American Nuclear Society, Inc.

Simopoulos S.E., 1989. Soil sampling and ^{137}Cs analysis of the chernobyl fallout in Greece. Applied Radiation and Isotopes 40 (7), 607-613.

Smith J.T., Elder D.G., 1999. A comparison of models for characterizing the distribution of radionuclides with depth in soils. European Journal of Soil Science 50, 295-307.

Timms D.N., Smith J.T., Coe E., Kudelsky A.V., Yankov A.I., 2005. In situ measurements of the sub-surface gamma dose from Chernobyl fallout. Applied Radiation and Isotopes 62 (6), 923–930.

Timms D.N., Smith J.T., Cross M.A., Kudelsky A.V., Horton G., Mortlock R., 2004. A new method to account for the depth distribution of ^{137}Cs in

soils in the calculation of external radiation dose-rate. Journal of Environmental Radioactivity 72 (3), 323–334.

Velasco R.H., Toso J.P., 1997. Radiocesium in the northern part of Italy after the Chernobyl accident: vertical soil transport and soil-to-plant transfer. Journal of Environmental Radioactivity 37 (1), 73-83.

Αθανασίου Νικόλαος, 2006. Διπλωματική Εργασία. Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης φωτονιακών ακτινοβολιών και ύλης με χρήση του κώδικα PENELOPE - Εφαρμογή σε προβλήματα υπολογισμού θωρακίσεων και βαθμονόμησης ανιχνευτικών διατάξεων. ΕΜΠ.

Γεωργιάδης Θ., Γιαννόπουλος Π., Κασπίρης Π., Σκούρας Δ., Δημητρέλλος Γ., Τηνιακός Λ., Μπούκα Ε., Περγαντής Φ., 2001. Οικολογική έρευνα και διαχείριση των περιοχών αλυκής και Όρους Δίκαιος του Δήμου Δικαίου της νήσου Κω. Πανεπιστήμιο Πάτρας.

Λεωνίδου Δ., 1984. Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολιών & ύλης - Δοσιμετρία - Θωράκιση. Ε.Μ.Π.

Λεωνίδου Δ., 1984. Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολιών & ύλης - Δοσιμετρία - Θωράκιση - ΑΣΚΗΣΕΙΣ. Ε.Μ.Π.

Τραμπίδου Γ., Σταματελάτος Ι., Κρητίδης Π., Φλώρου Ε., 2006. Εκτίμηση εξωτερικών δόσεων από την έκθεση στη γάμμα ακτινοβολία του εδάφους με συγκριτική χρήση διαφόρων μεθόδων. e-Περιοδικό Επιστήμης & Τεχνολογίας 1 (2), 79-85.

Δικτυακοί τόποι

[α] http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/

[β] http://www.nukeworker.com/study/hp/tlds/tlds.shtml\

[γ] http://www.agriculture.gr/forum/showthread.php?t=115

[δ] http://en.wikipedia.org/wiki/Bulk_density

[ε] http://www.life-t.gr/