

ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ^{137}Cs ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΑΠΟΘΕΣΗ ΛΟΓΩ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ

Γ.Ν. Παπαδάκος, Δ.Ι. Καράγγελος, Ν.Π. Πετρόπουλος, Ε.Π. Χίνης,
Μ.Ι. Αναγνωστάκης, Σ.Ε. Σιμόπουλος
Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, Ηρ. Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου
e-mail: gpar@nuclear.ntua.gr

Περίληψη

Η αποτίμηση των επιπέδων της παραμένουσας συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος, τόσο στην επιφάνεια όσο και κατά βάθος, μετά από ένα ατύχημα όπως αυτό στο Chernobyl είναι σημαντική για την παρακολούθηση των πιθανών συνεπειών του ατυχήματος στο οικοσύστημα. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας διενεργήθηκαν το 2007 δειγματοληψίες χώματος από έδαφος επιφανειακά και σε βάθος έως 26cm, σε 14 διαφορετικές τοποθεσίες της Ελληνικής επικράτειας όπου το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ είχε γενικά καταγράψει υψηλά επίπεδα απόθεσης ^{137}Cs κατά και μετά το έτος 1986. Σε συγκεκριμένη τοποθεσία υψηλής απόθεσης οι δειγματοληψίες στην επιφάνεια του εδάφους και κατά βάθος έγιναν ακολουθώντας σχηματισμό καννάβου με πλευρές 60m και κόμβους ανά 20m, ενώ στις υπόλοιπες 13 τοποθεσίες πραγματοποιήθηκαν επιφανειακές και κατά βάθος δειγματοληψίες σε μοναδικά σημεία. Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων των δειγμάτων διερευνήθηκαν και οι συνιστώσες αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση ραδιοϊσοτόπων, όπως προκύπτουν κυρίως λόγω της γεωστατιστικής διασποράς, της ίδιας διαδικασίας της δειγματοληψίας, των μεταβολών της φαινόμενης πυκνότητας του χώματος κατά βάθος, της προετοιμασίας των δειγμάτων για μέτρηση και τέλος λόγω της ίδιας της μέτρησης. Για την πλήρη απογραφή αυτών των συνιστωσών χρησιμοποιήθηκε διαδικασία αξιολόγησης αιτίου – αποτελέσματος ώστε να εντοπισθούν από τις πιο πάνω συνιστώσες αβεβαιότητας οι πλέον σημαντικές και να γίνει ορθή εφαρμογή του νόμου διάδοσης αβεβαιότητας σύμφωνα και με τον ISO GUM. Όπως εξάλλου αναμένεται, η όλη επεξεργασία πέρα από την αποτύπωση της κατά βάθος μετανάστευσης του ^{137}Cs , είκοσι έτη μετά την απόθεση με κατάλληλες συσχετίσεις, δείχνει κατ' αρχήν ότι η κυρίαρχη συνιστώσα της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας είναι εκείνη που οφείλεται στην γεωστατιστική διασπορά της συγκέντρωσης ενός αποτεθέντος ραδιοϊσοτόπου κατά επίπεδα εδάφους, είτε στην επιφάνεια είτε στο βάθος. Ο κάρναβος δειγματοληψίας φαίνεται να εκτιμά χονδρικά την συνιστώσα αυτή κυρίως με την τεχνική του ημιβαριογράμματος. Πιο πυκνός βελτιστοποιημένος κάρναβος δυνατόν να αποδώσει ακριβέστερα τη συνιστώσα αυτή με πολλαπλάσιο εργαστηριακό κόστος σε ανθρώπινο δυναμικό και πόρους. Με τα υπάρχοντα δεδομένα, στην περίπτωση μέτρησης της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs με τη χρήση μιας μοναδικής δειγματοληψίας βάθους, αυτή η συνιστώσα τυπικής αβεβαιότητας εκτιμάται σε περίπου 23% του αποτελέσματος της μέτρησης, ενώ η αντίστοιχη τυπική αβεβαιότητα για το μέγιστο βάθος διείσδυσης του ^{137}Cs στο έδαφος ανέρχεται σε περίπου 38% του υπολογιζόμενου.

Λέξεις κλειδιά: ραδιενεργός απόθεση, δειγματοληψία εδάφους, κατά βάθος κατανομή ^{137}Cs , γεωστατιστική αβεβαιότητα, διάγραμμα ημιμεταβλητότητας

Abstract

The evaluation of the remaining isotopes concentration levels in soil, both on the surface and also in depth, after a Chernobyl – like nuclear accident is important for the monitoring of possible effects to the ecosystem because of the accident. Within the presented research, soil samples have been collected in 2007 at 14 different locations of the Hellenic terrain, both from the surface and also from depths up to 26cm; sampling locations were selected from the measurements pool where NTUA Nuclear Energy Laboratory had identified high levels of ^{137}Cs deposition during and after the year 1986. In one specific location of high deposition samples were collected following a 60m by 60m Cartesian grid with a 20m nodes distance between nodes. Single surface and in depth samples were collected from the rest 13 locations. The uncertainty components were investigated as these evolve during sample processing and isotope concentration measurements and were found mainly due to the geostatistical variation, the sampling process itself, the variation in the effective density of soil by depth, the preparation of samples for measurement and the measurement itself. A cause-effect assessment process was used to explain these components, in order to identify the most important ones and to properly apply the law of error propagation as described in ISO GUM. Moreover, besides the inventorying of the in depth migration of ^{137}Cs twenty years after the deposition using the collected data and appropriate fittings, the whole process demonstrated that the dominating component of the combined uncertainty is the one due to the horizontal geostatistical variation of the deposited isotopes concentration. The sampling grid seems to provide a gross evaluation of this component, mainly by the use of the semivariogram technique. Denser, optimized grid could return more accurate values for this component but with a multiplied laboratory cost, both in terms of human and material resources. Using the hereby collected data and in the case of a single depth soil sampling, this uncertainty component has been evaluated to about 23% of the measurement result for the total remaining ^{137}Cs deposition and to about 38% of the calculated value for ^{137}Cs effective penetration depth.

Keywords: radioactive deposition, soil sampling, ^{137}Cs depth distribution, geostatistical uncertainty, semivariogram

1. Εισαγωγή

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι η αξιολόγηση του επιπέδου της αβεβαιότητας στη μέτρηση της παραμένουσας ραδιενέργειας ^{137}Cs στο Ελληνικό έδαφος. Η ποσότητα του ^{137}Cs , η οποία εναποτέθηκε αρχικά στο Ελληνικό επιφανειακό έδαφος εξαιτίας της απόθεσης υποπροϊόντων της σχάσης εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl, διερευνήθηκε για το μεγαλύτερο μέρος της χερσαίας Ελλάδας ήδη από το δεύτερο μισό του 1986, από το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΠΤ-ΕΜΠ), μέσω εκτεταμένης δειγματοληψίας άνω των 1200 δειγμάτων επιφανειακού εδάφους (Simopoulos, 1989). Έκτοτε, το ραδιενεργό ^{137}Cs έχει μεταναστεύσει εξαιτίας διαφόρων φυσικών διεργασιών και άλλων αιτιών, κυρίως κατακόρυφα, σε βαθύτερα στρώματα εδάφους (βλ. π.χ. Antonopoulos-Domis et al., 1995). Εξαιτίας ακριβώς αυτής της μετανάστευσης, σήμερα, σχεδόν 30 έτη μετά το ατύχημα, τα επιφανειακά δείγματα εδάφους δεν αρκούν για να παρέχουν επαρκή πληροφορία για την εκτίμηση της συνολικής παραμένουσας συγκέντρωσης ^{137}Cs στο Ελληνικό έδαφος και επιβάλλεται να χρησιμοποιηθούν και τεχνικές δειγματοληψίας κατά βάθος, ώστε να προσδιορίζεται η αθροιστική συγκέντρωση του ^{137}Cs σε θεωρητικές στήλες "απέιρου" βάθους, αλλά και το ενεργό βάθος διείσδυσής του, ως δείκτης του μέγιστου βάθους εδάφους στο οποίο αυτό ανιχνεύεται. Τόσο οι φυσικές διεργασίες αλλά και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες επί των εδαφών, όσο και οι τεχνικές των επιφανειακών και κατά βάθος δειγματοληψιών εδάφους, αλλά και η προετοιμασία των δειγμάτων προς μέτρηση και η ίδια η μέτρησή τους είναι δυνατόν να εισάγουν στην εκτίμηση των ζητούμενων αποτελεσμάτων σημαντικές αβεβαιότητες. Προκειμένου να διερευνηθούν οι πηγές των αβεβαιοτήτων αυτών διενεργήθηκαν το 2007 δειγματοληψίες χώματος κυρίως από αδιατάρακτο έδαφος επιφανειακά και σε βάθος έως 26cm, σε 14 διαφορετικές τοποθεσίες της Ελληνικής επικράτειας. Σε συγκεκριμένη τοποθεσία υψηλής απόθεσης της Δυτικής Θεσσαλίας (Μαυρομάτι, Καρδίτσα) οι δειγματοληψίες στην επιφάνεια του εδάφους και κατά βάθος έγιναν ακολουθώντας σχηματισμό καννάβου με πλευρές 60m και κόμβους ανά 20m -δηλ. συνολικά 16 τοπικά σημεία δειγματοληψίας, ενώ στις υπόλοιπες 13 τοποθεσίες, πραγματοποιήθηκαν επιφανειακές και κατά βάθος δειγματοληψίες σε μοναδικά σημεία. Σημειώνεται ότι η δειγματοληψία σε σχηματισμό καννάβου πραγματοποιήθηκε με κύριο σκοπό την αξιολόγηση των επιπέδων της γεωστατιστικής διασποράς της συγκέντρωσης του ^{137}Cs σε μια περιοχή σχετικά περιορισμένης έκτασης.

2. Πειραματική μέθοδος

2.1. Σχεδιασμός δειγματοληψιών

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των θέσεων δειγματοληψίας εδάφους επιφανειακά και κατά βάθος επιλέχθηκαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να περιλαμβάνουν:

(α) Χώμα από βοσκότοπους, (β) Μη χρησιμοποιούμενο έδαφος (γ) Χώμα από περιοχές με υψηλή βλάστηση, είτε δασώδεις ή με καρποφόρα δέντρα (δ) Χώμα από καλλιεργημένους αγρούς, και (ε) Χώμα από τα ιζηματογενή στρώματα

Οι θέσεις των σημείων δειγματοληψίας επιλέχθηκαν με βάση:

(1) τα αρχικά αποτελέσματα των δειγματοληψιών επιφανειακού εδάφους του 1986 (Simopoulos, 1989, Petropoulos et al., 1996). Από τα αποτελέσματα αυτά επιλέχθηκαν ως πρόσφορες για δειγματοληψία, συγκεκριμένες περιοχές στη Θεσσαλία και την Δυτική Μακεδονία, στις οποίες αποτέθηκαν σχετικά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ^{137}Cs λόγω του

ατυχήματος στο Chernobyl, αλλά και άλλες περιοχές για σύγκριση, όπως η Αττική, στις οποίες η υπόψη απόθεση ήταν ελάχιστη, και

(2) τα προκαταρκτικά ευρήματα μιας δοκιμαστικής δειγματοληψίας εδαφών, η οποία πραγματοποιήθηκε σε κλίμακα στις περιοχές της Θεσσαλίας και της Δυτικής Μακεδονίας ώστε να διαπιστωθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις το μέγιστο βάθος δειγματοληψίας στην περιοχή των 25cm συναντά έδαφος στο οποίο το ^{137}Cs δεν έχει ακόμα μεταναστεύσει (Καρφόπουλος et al., 2007).

2.2. Μεθοδολογία δειγματοληψίας

Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως δύο διαφορετικές μεθοδολογίες για τη συλλογή των δειγμάτων χώματος.

(1) Για τις δειγματοληψίες επιφάνειας εδάφους χρησιμοποιήθηκαν απλά σκαπτικά εργαλεία για τη συλλογή δειγμάτων από το ανώτερο στρώμα του χώματος, πάχους περίπου ενός εκατοστού με την τεχνική της απόξεσης μέχρι να συγκεντρωθεί μάζα δείγματος στην περιοχή από 0.75 έως 1.00kg.

(2) Για τις κατά βάθος δειγματοληψίες στις περισσότερες περιπτώσεις εδάφους χρησιμοποιήθηκε ως δειγματολήπτης, κοίλη κυλινδρική αδαμαντοκορώνα εσωτερικής διαμέτρου $D = 75.5 \pm 0.1\text{mm}$ και πάχους κελύφους $w = 1.9 \pm 0.1\text{mm}$ και οδόντων κοπής $w' = 3.5 \pm 0.1\text{mm}$, κατάλληλη για προσαρμογή σε ένα ηλεκτρικό δράπανο ισχύος 1600W. Η μέθοδος δειγματοληψίας περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενες διαδοχικές γεωτρήσεις για τη συλλογή δειγμάτων χώματος πάχους 5cm και διαμέτρου D , από διαδοχικά βάθη μέχρι μέγιστο βάθος 26cm (βλ. και Σχήμα 1). Πριν την εφαρμογή αυτής της μεθόδου δειγματοληψίας σε κάποιο σημείο, συλλέγεται από το ίδιο ακριβώς σημείο ένα επιφανειακό δείγμα εδάφους βάθους 1cm με τη μέθοδο που έχει ήδη περιγραφεί. Στη συνέχεια ακολουθεί η δειγματοληψία της αντίστοιχης στήλης εδάφους με βήματα των 5cm. Κατά αυτόν τον τρόπο η κατά βάθος δειγματοληψία που προκύπτει καλύπτει ανά δείγμα τα βάθη 0 έως 1cm, 1 έως 6cm, 6 έως 11cm, 11 έως 16cm, 16 έως 21cm και 21 έως 26cm αντίστοιχα. Διακρίνονται τα εξής τέσσερα μεγέθη: (α) το βάθος x_i του κάτω επιπέδου του i -οστού κυλινδρικού δείγματος, (β) το βάθος x_{i-1} του άνω επιπέδου του i -οστού κυλινδρικού δείγματος (\equiv το βάθος x_{i-1} του κάτω επιπέδου του $i-1$ κυλινδρικού δείγματος), (γ) το μέσο βάθος \bar{x}_i του δείγματος και (δ) το πάχος h του δείγματος:



Σχήμα 1: Όψεις δραπάνου και αδαμαντοκορώνας
Αριστερά: Δράπανο κατά τη δειγματοληψία, Δεξιά: Οπή δειγματοληψίας

Είναι:

$$\bar{x}_i = \frac{x_{i-1} + x_i}{2} \quad (1)$$

$$h_i = x_i - x_{i-1} \quad (2)$$

2.3. Προετοιμασία δειγμάτων

Όλα τα δείγματα αεροξηράνθηκαν. Στη συνέχεια η περιεχόμενη υγρασία $\omega\%$ κάθε δείγματος μετρήθηκε με τη χρήση ζυγού υγρασίας διακριτικής ικανότητας 0.01g για δείγμα 10g ή 0.1%. Κατόπιν, μετρήθηκε η μάζα m_{sample} του συνολικού συλλεγμένου υλικού κάθε δείγματος μετά τη διαδικασία αεροξήρανσης με τη χρήση ζυγού διακριτικής ικανότητας 0.1g. Έπειτα απομακρύνθηκαν από κάθε δείγμα οι ορατοί λίθοι και μικρολίθοι μέχρι διαμέτρου περίπου 2 - 3mm. Οι λίθοι ξεπλύθηκαν προσεκτικά και κατόπιν μετρήθηκε η μάζα τους m_{pebble} με τη χρήση του ζυγού και ακολούθως και ο όγκος τους V_{pebble} με τη χρήση της μεθόδου εκτοπισμού όγκου ύδατος και βαθμονομημένους ογκομετρικούς σωλήνες ποικίλων διακριτικών ικανοτήτων. Η διαδικασία προετοιμασίας κάθε δείγματος ολοκληρώθηκε με τον εγκιβωτισμό ενός μέρους του υλικού χώματος κάθε δείγματος μέσα σε τυποποιημένο πλαστικό δοχείο (*box*), από εκείνα που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τις γεωμετρικές μέτρησης που είναι αναγκαίες για την ανάλυση του δείγματος σε διάταξη - γ φασματοσκοπίας.

2.4. Μέτρηση δειγμάτων στη $-\gamma$ φασματοσκοπία

Κάθε ένα από τα δείγματα χώματος μετρήθηκε τουλάχιστον μία φορά σε μία από τις τέσσερις διατάξεις ημιαγωγών ανιχνευτών $-\gamma$ φασματοσκοπίας υψηλής ανάλυσης του ΕΠΤ-ΕΜΠ για τον προσδιορισμό της κατά μάζα ειδικής ραδιενέργειας C του ^{137}Cs . Για την εξαγωγή του αποτελέσματος χρησιμοποιήθηκαν ενεργειακές και ποσοτικές βαθμονομήσεις των διατάξεων με πιστοποιημένες πηγές αναφοράς που περιέχουν γνωστές ποσότητες από πολλά ραδιοϊσότοπα, συμπεριλαμβανομένου του ^{137}Cs , τα οποία εκπέμπουν φωτόνια σε ένα ευρύ φάσμα ενεργειών καθώς και κατάλληλο λογισμικό.

3. Υπολογισμοί

3.1. Παραμένουσα ραδιενέργεια ^{137}Cs σε στήλη εδάφους

Για κάθε δείγμα υπολογίστηκε η ολική ραδιενέργεια A σε Bq, που περιέχεται στην ξηρή και ελεύθερη λίθων μάζα του όπως αυτό συλλέχθηκε στο πεδίο δειγματοληψίας (*field*):

$$A = m_{field} C \quad (3)$$

όπου

$$m_{field} = \left(m_{sample} - m_{pebble} \right) \left(\frac{100 - \omega\%}{100} \right) \quad (4)$$

Παρόλα αυτά, κατά τη δειγματοληψία διαπιστώνονται περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί η μάζα του δείγματος m_{field} , η οποία αντιστοιχεί στην τυποποιημένη οριζόντια επιφάνεια αναφοράς των δειγματοληπτών βάθους. Η τελευταία ορίζεται

προφανώς από την εσωτερική διάμετρο των αντίστοιχων κυλίνδρων. Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται η μετατροπή της πυκνότητας του δείγματος:

$$\rho_{box} = \frac{m_{box}}{V_{box}} \quad (5)$$

όπως αυτό μετρήθηκε εγκιβωτισμένο, στην αντίστοιχη πυκνότητα στο έδαφος του πεδίου δειγματοληψίας την ώρα της συλλογής:

$$\rho_{field} = \frac{m_{field}}{V_{field}} \quad (6)$$

Μετά τη μετατροπή αυτή και δεδομένου ότι ο όγκος δειγματοληψίας V_{field} μπορεί να υπολογίζεται, η πυκνότητα ρ_{field} στο έδαφος του πεδίου είναι δυνατόν να μετατραπεί στην αντίστοιχη μάζα m_{field} . Ο όγκος V_{field} θεωρείται ελεύθερος λίθων και υπολογίζεται ως:

$$V_{field} = V_{sample} - V_{pebble} \quad (7)$$

Προφανώς η ποσότητα V_{sample} υπολογίζεται ως:

$$V_{sample} = \pi \frac{D^2}{4} h = S \cdot h \quad (8)$$

όπου $h = 5\text{cm}$ το πάχος δειγματοληψίας βάθους.

Η σχέση που συνδέει τα μεγέθη ρ_{field} και ρ_{box} , προέκυψε ως συσχέτιση από τα πειραματικά δεδομένα των δειγματοληψιών, για τα οποία είναι γνωστή η ρ_{field} και η μέτρησή της αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κάθε δείγματος. Η συσχέτιση έχει τη γενική μορφή:

$$\rho_{field}(x) / \rho_{box}(x) = a + b(1 - e^{-x/c}) \quad (9)$$

όπου x το βάθος δειγματοληψίας, $a = 0.92 \pm 0.08$, $b = 0.57 \pm 0.08$ και $c = 3.7 \pm 1.6\text{cm}^{-1}$.

Οι παράμετροι της (9) βρέθηκε ότι γενικά ισχύουν για κάθε ελληνικό έδαφος αλλά με σχετικά χαμηλό συντελεστή πολλαπλής συσχέτισεως $R^2 = 0.55$.

Δεδομένου ότι με την εφαρμογή των παραπάνω καλύφθηκαν όλες οι περιπτώσεις υπολογισμού της A ακόμη και όταν η τιμή της m_{field} ήταν άγνωστη, υπολογίσθηκαν για κάθε δειγματοληψία βάθους τα αθροίσματα ραδιενέργειας για κάθε βάθος x_i :

$$A(x_i) = \sum_{x=0}^{x_i} A_i \quad (10)$$

όπου x_i είναι το κατώτατο βάθος του i -οστού δείγματος σε μία κατά βάθος στήλη δειγματοληψίας. Το μέγιστο i είναι τυπικά ίσο με "6". Στα παραγόμενα ζεύγη τιμών $[x_i, A(x_i)]$ με $i = 1$ έως 6, μπορεί να προσαρμόζεται καμπύλη της μορφής Weibull (όπως π.χ. προτείνει με παρόμοιο τρόπο ο Dahm et al., 2002):

$$A(x) = A_{\infty} \left[1 - \exp(-d \cdot x^p) \right] \quad (11)$$

Με βάση την (11) μπορεί να προσδιορίζεται η συνολική ραδιενέργεια A_{∞} του ^{137}Cs στην εξεταζόμενη στήλη εδάφους για θεωρητικά άπειρο βάθος. Η ποσότητα A_{∞} αποδίδει την ραδιενέργεια όλης της στήλης, ακόμη και στις περιπτώσεις που η ποσότητα του ^{137}Cs αποδεικνύεται ότι έχει διεισδύσει σε βάθος μεγαλύτερο των 26cm, στο οποίο καταλήγουν

τυπικά οι δειγματοληψίες. Το τελικό αποτέλεσμα σχετικά με την συνολική παραμένουσα ραδιενέργεια του ^{137}Cs σε κάθε κατά βάθος στήλη δειγματοληψίας, εκφρασμένο ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους σε kBq m^{-2} , προκύπτει για διάφορα βάθη ως:

$$\text{για βάθος } x: I(x) = A(x) \cdot S^{-1} \text{ και για άπειρο βάθος: } I_{\infty} = A_{\infty} \cdot S^{-1} \quad (12)$$

όπου S η διατομή του δειγματολήπτη σε m^2 .

Το ενεργό βάθος διείσδυσης x_{eff} του ^{137}Cs , δηλαδή το βάθος έως το οποίο βρίσκεται το 99% της ραδιενέργειας του ^{137}Cs , υπολογίζεται κατά τον Dahm et al. (2002) από:

$$x_{eff} = \left[-\frac{1}{d} \ln(0.01) \right]^{1/p} \quad (13)$$

4. Ανάλυση αβεβαιότητας

4.1. Σφάλματα ορισμού μετρήσεων και ορισμού υπολογισμών

Διακρίνονται τα ακόλουθα σφάλματα του είδους αυτού: (1) Η συνολική μάζα δείγματος m_{sample} , όπως συλλέχθηκε στο πεδίο (με υγρασία και λίθους) θεωρείται ότι μετράται χωρίς απώλειες κατά τη διαδικασία συλλογής. (2) Η πιστότητα της εσωτερικής διαμέτρου D_k και άρα και της διατομής των κοίλων κυλινδρικών δειγματοληπτών θεωρείται υψηλή. (3) Η οριζόντια διατομή S των συλλεγόμενων κυλινδρικών δειγμάτων θεωρείται ταυτόσημη με την οριζόντια εσωτερική διατομή του κοίλου κυλίνδρου του χρησιμοποιούμενου δειγματολήπτη. Αυτή η παραδοχή ισχύει μόνο προσεγγιστικά δεδομένου ότι η μηχανική της δειγματοληψίας καταστρέφει τη γεωμετρία του δείγματος. Για την εκτίμηση της επίδρασης του εν-λόγω σφάλματος εκτιμάται μια τύπου "B" τυπική αβεβαιότητα σύμφωνα με την τιμή του πάχους του κοίλου κυλίνδρου του δειγματολήπτη, με τριγωνική κατανομή, με την οποία διαμορφώνεται ένα διάστημα τιμών γύρω από την S . Επομένως, για την δυσμενέστερη περίπτωση αυτή εκτιμάται από την ασφαλή πλευρά ως:

$$u_s = \pi \left[(D+w')^2 - D_2^2 \right] / (4\sqrt{6}) \text{ cm} \quad (14)$$

Με αντικατάσταση η τιμή της u_s εκτιμάται ως 1.7cm^2 ή $\sim 4\%$ αντίστοιχα. (4) Η εκτίμηση της συνολικής παραμένουσας ραδιενέργειας του ^{137}Cs βασίζεται στην παραδοχή ότι οι λίθοι που περιέχονται σε ένα δείγμα δεν έχουν ρυπανθεί με ^{137}Cs , παρά μόνο στην επιφάνειά τους (βλ. π.χ. Petersen et al., 1990). (5) Η ειδική κατά μάζα ραδιενέργεια C κάθε δείγματος θεωρείται ότι προκύπτει από το μέρος του δείγματος το οποίο μετρήθηκε. (6) Η εκτίμηση της συνολικής παραμένουσας ραδιενέργειας του ^{137}Cs σε εξεταζόμενη στήλη αδιατάρακτου εδάφους θεωρείται ότι προκύπτει, χωρίς την εισαγωγή συστηματικών σφαλμάτων, από βάθος δειγματοληψίας μέχρι το πολύ 26cm. (7) Η εκτίμηση της συνολικής παραμένουσας ραδιενέργειας του ^{137}Cs σε εξεταζόμενη στήλη αδιατάρακτου εδάφους βασίζεται στην συσχέτιση (11), της οποίας οι παράμετροι εκτιμώνται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων με πολύ μικρά σφάλματα. (8) Η εκτίμηση της συνολικής παραμένουσας ραδιενέργειας του ^{137}Cs σε εξεταζόμενη στήλη αδιατάρακτου εδάφους βασίζεται στην συσχέτιση (11), η οποία δεν μπορεί να λάβει υπόψη άλλες προγενέστερες του Chernobyl αποθέσεις ^{137}Cs . Οι αποθέσεις αυτές οφείλονται στις παλαιότερες ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές και σύμφωνα με ορισμένους βρίσκονται κατά μέσο όρο στα ίδια επίπεδα με τις αποθέσεις από το Chernobyl (DeCort et al., 1998, Szerbin et al., 1999, Almgren et al., 2006).

4.2. Μετρολογικά χαρακτηριστικά οργάνων

Αναφέρονται τα ακόλουθα μετρολογικά χαρακτηριστικά: (1) Η πιστότητα της διαδικασίας ζύγισης με τη χρήση του ζυγού, υπό συνθήκες επαναληψιμότητας, έχει γενικά ελεγχθεί και βρέθηκε να είναι κατώτερη της διακριτικής του ικανότητας. (2) Η πιστότητα της διαδικασίας προσδιορισμού της περιεχόμενης υγρασίας δείγματος χώματος με τη χρήση ζυγού υγρασίας, υπό συνθήκες επαναληψιμότητας, έχει γενικά ελεγχθεί από την εταιρεία κατασκευής και βρίσκεται στην περιοχή από 0.2 έως 0.5%. (3) Με τη μέθοδο του εκτοπισμού όγκου ύδατος ο όγκος των λίθων V_{pebble} που περιέχονται σε κάθε δείγμα υπολογίζεται ως:

$$V_{pebble} = V_{w,final} - V_{w,net} \quad (15)$$

όπου $V_{w,net}$ και $V_{w,final}$ είναι η αρχική και η τελική ένδειξη ογκομετρικού σωλήνα πριν και μετά την τοποθέτηση του υλικού λίθων στο περιεχόμενο νερό. Η κύρια πηγή αβεβαιότητας σε αυτή τη μέτρηση είναι η διακριτική ικανότητα του ογκομετρικού σωλήνα, η οποία μπορεί να εκτιμηθεί με μια τύπου "B" τυπική αβεβαιότητα με ομοιόμορφη κατανομή και ακραίες τιμές \pm το ήμισυ της διακριτικής ικανότητας γύρω από την ένδειξη του ογκομετρικού σωλήνα. Η προκύπτουσα σχετική τυπική αβεβαιότητα εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 2% και 15% (για πολύ μικρούς μετρούμενους όγκους λίθων που πλησιάζουν την τιμή της διακριτικής ικανότητας του χρησιμοποιούμενου σωλήνα). Για την υιοθέτηση μιας τιμής σχετικής τυπικής αβεβαιότητας από την ασφαλή πλευρά, λαμβάνεται υπόψη ότι, οι τιμές πυκνότητας των λίθων που προέκυψαν υπολογίστηκαν ως $2.6 \pm 0.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ που οδηγούν στην τιμή σχετικής τυπικής αβεβαιότητας 6%. (4) Τέλος, η τυπική αβεβαιότητα u_C μέτρησης της ειδικής κατά μάζα ραδιενέργειας C δείγματος τυποποιημένης γεωμετρίας σε διάταξη $-\gamma$ φασματοσκοπικής ανάλυσης του ΕΠΤ-ΕΜΠ κυμαίνεται μεταξύ 4% για υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας (όπως στην πλειοψηφία των δειγμάτων βάθους έως 16cm στις δειγματοληψίες στη Θεσσαλία και τη Δ. Μακεδονία) και 10% για πολύ χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας (όπως στην Αττική και, γενικά, για δείγματα από βάθη μεγαλύτερα των 16cm). Στην αβεβαιότητα αυτή συμβάλλουν (α) η τυπική αβεβαιότητα των πηγών αναφοράς που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση των διατάξεων με τιμή τουλάχιστον $u_{CRM} = 2\%$ (β) το σφάλμα Poisson της μέτρησης ραδιενέργειας και (γ) το σφάλμα απόδοσης φωτοκορυφής από το λογισμικό της $-\gamma$ φασματοσκοπικής ανάλυσης.

4.3. Αβεβαιότητα σχετικά με το βάθος δειγματοληψίας

(1) Η αβεβαιότητα προσδιορισμού του βάθους x_i του i -οστού δείγματος είναι σημαντική συνιστώσα αβεβαιότητας διότι το βάθος χρησιμοποιείται ως είσοδος στην συσχέτιση του μοντέλου (11). Για την εκτίμησή της μπορεί να χρησιμοποιείται μία τύπου "B" τυπική αβεβαιότητα θεωρώντας ως ακραίες τιμές απόκλισης γύρω από την ρυθμισμένη τιμή ενός βάθους το $\pm 0.5 \text{ cm}$ με τριγωνική κατανομή. Συνεπώς $u_{x_i} = u_{x_{i-1}} = (0.5/\sqrt{6}) \text{ cm} = 0.2 \text{ cm}$. Δεδομένου ότι το ελάχιστο βάθος συλλογής ενός τέτοιου δείγματος είναι 1cm και το μέγιστο είναι 26cm η σχετική τυπική αβεβαιότητα προσδιορισμού ενός τέτοιου βάθους εκτιμάται στην περιοχή από 0.8 έως 20%.

(2) Η αβεβαιότητα προσδιορισμού του μέσου βάθους του i -οστού δείγματος μπορεί να παίζει ρόλο στις περιπτώσεις υπολογισμών όταν η μάζα m_{field} δεν είναι γνωστή. Δεδομένου ότι το μέσο βάθος προκύπτει από την (1), η συνδυασμένη αβεβαιότητα για τον υπολογισμό του (θεωρώντας ότι οι δύο μετρήσεις βάθους από τις οποίες αυτό

υπολογίζεται είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους) εκτιμάται ως $(\sqrt{2}/2) \cdot 0.2\text{cm} = 0.14\text{cm}$. Δεδομένου ότι το ελάχιστο μέσο βάθος που χρησιμοποιείται για υπολογισμούς είναι 3.5cm και το μέγιστο είναι 23.5cm η σχετική τυπική αβεβαιότητα προσδιορισμού ενός τέτοιου βάθους εκτιμάται στην περιοχή από 0.6 έως 4%.

(3) Η αβεβαιότητα προσδιορισμού του πάχους h_i του i -οστού δείγματος μπορεί να παίζει ρόλο στις περιπτώσεις υπολογισμών όταν η μάζα m_{field} δεν είναι γνωστή. Δεδομένου ότι το πάχος αυτού του δείγματος προκύπτει από την (2), η συνδυασμένη αβεβαιότητα για τον υπολογισμό του (θεωρώντας ότι οι δύο μετρήσεις βάθους από τις οποίες αυτό υπολογίζεται είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους) εκτιμάται ως $\sqrt{2} \cdot 0.2\text{cm} = 0.28\text{cm}$ που για ένα δείγμα τυπικού πάχους 5cm ισοδυναμεί με σχετική τυπική αβεβαιότητα 5.6%.

4.4. Αβεβαιότητα λόγω γεωστατιστικής διασποράς

Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων για τη συνολική παραμένουσα ραδιενέργεια του ^{137}Cs και το αντίστοιχο ενεργό βάθος διείσδυσης του στο έδαφος, όπως προέκυψαν από την πολλαπλή δειγματοληψία σε σχηματισμό καννάβου αξιοποιήθηκαν ώστε να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα λόγω της γεωστατιστικής διασποράς του ίδιου του εκτιμώμενου μεγέθους. Δεδομένου ότι ο κάρναβος είχε διαστάσεις 60m x 60m, και σε αυτόν λήφθηκαν κατά βάθος δείγματα από 16 σημεία σε ορθοκανονικό πλέγμα, αποδεικνύεται ότι οποιοδήποτε σημείο μιας τόσο περιορισμένης περιοχής αποτελεί εν δυνάμει αντιπροσωπευτικό σημείο δειγματοληψίας για τη μέτρηση της παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs στην περιοχή αυτή, δεδομένου ότι: (α) διαπιστώθηκε στατιστική κανονικότητα στις συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^{137}Cs στην επιφάνεια αλλά και στις συνολικές παραμένουσες ραδιενέργειες ανά στήλη δειγματοληψίας βάθους, (β) διαπιστώθηκε έλλειψη ετερογένειας στον εξεταζόμενο κάρναβο για τα ίδια μεγέθη με τη χρήση των εξειδικευμένων δεικτών "Moran I" και "Geary C" και (γ) οι διαστάσεις του καννάβου είναι ευρύτερες των αποκλίσεων προσδιορισμού θέσης με τη χρήση GPS. Με βάση τα παραπάνω, για την κατ' αρχήν εκτίμηση της αβεβαιότητας λόγω της γεωστατιστικής διασποράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί στατιστική επί δείγματος με μία τύπου "A" τυπική αβεβαιότητα δεδομένου ότι διατίθενται ικανοποιητικό πλήθος $N = 16$ μετρήσεων, η οποία υπολογίζεται ως το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής του πλήθους δειγματοληψιών που αποφασίζεται να συλλεχθεί. Με αυτόν τον τρόπο, για τη συνολική παραμένουσα ραδιενέργεια ^{137}Cs σε μία τοποθεσία δειγματοληψίας, η αντίστοιχη σχετική τυπική αβεβαιότητα εκτιμάται σε 27%, ενώ για το ενεργό βάθος διείσδυσης εκτιμάται σε 43%, όταν η εκτίμηση βασίζεται σε μία μοναδική δειγματοληψία στήλης. Η γεωστατιστική αβεβαιότητα αναλύθηκε επιπλέον με βάση την τεχνική του διαγράμματος ημιμεταβλητότητας (semivariogram), έτσι ώστε να εκτιμηθεί και η επίδραση της απόστασης (separation) μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας.

5. Αποτελέσματα και συνδυασμένη αβεβαιότητα

5.1. Αβεβαιότητα λόγω της προσαρμογής Dahm

Η σχετική τυπική αβεβαιότητα που αντιστοιχεί στον υπολογισμό της συνολικής παραμένουσας απόθεσης ^{137}Cs , I_∞ από τη σχέση (11) προκύπτει ως το τυπικό σφάλμα από τη διαδικασία προσαρμογής, δηλ. ως:

$$u_{I_{\infty},relative}^2 = u_{A_{\infty},relative}^2 + u_{S,relative}^2 \quad (16)$$

Η αβεβαιότητα του βάθους δεν συνεισφέρει στην εκτίμηση του I_{∞} , καθώς η μερική παράγωγος της συνάρτησης του $I(x)$ σε σχέση με το βάθος για μεγάλα βάθη μηδενίζεται.

Το ενεργό βάθος διείσδυσης x_{eff} του ^{137}Cs υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (13), από τους συντελεστές που προκύπτουν από την προσαρμογή της σχέσης (11). Επομένως, η αντίστοιχη τυπική αβεβαιότητα $u_{x_{eff}}$ προκύπτει ως:

$$u_{x_{eff}}^2 = (C_d \cdot u_d)^2 + (C_p \cdot u_p)^2 + 2 \cdot C_d \cdot C_p \cdot cov(d, p) \quad (17)$$

όπου

$$C_d = \frac{\partial x_{eff}}{\partial d}, \quad C_p = \frac{\partial x_{eff}}{\partial p} \quad (18)$$

και τα u_d , u_p και $cov(d, p)$ προέκυψαν σύμφωνα με τη διαδικασία προσαρμογής.

Ο Πίνακας 1 δείχνει τα αποτελέσματα της συνολικής παραμένουσας απόθεσης ^{137}Cs , I_{∞} και του αντίστοιχου ενεργού βάθους διείσδυσης x_{eff} σε κάθε σημείο δειγματοληψίας, όπως προέκυψαν από την προσαρμογή καμπύλης Dahm στην κατακόρυφη κατανομή της αθροιστικής ραδιενέργειας του ^{137}Cs . Η τυπική αβεβαιότητα προσαρμογής για την ποσότητα x_{eff} μπορεί να υπολογίζεται από τις (17) και (18). Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα από την πολλαπλή δειγματοληψία καννάβου η σχετική τυπική αβεβαιότητα λόγω ποιότητας προσαρμογής στην καμπύλη Dahm, εκτιμάται για το I_{∞} από 4% έως 6% (επηρεάζεται πολύ από την αβεβαιότητα της διατομής S) και για το x_{eff} από περίπου 2% έως 19%. Είναι φανερό ότι οι διαδικασίες προσαρμογής στην εξίσωση (11) μεταφέρουν όλες τις αβεβαιότητες που εξαρτώνται από τυχαία σφάλματα και συνδέονται με τα συσχετιζόμενα μεγέθη, όπως τα σφάλματα (α) προσδιορισμού βάθους δείγματος, (β) της πυκνότητας του εδάφους όπου χρειάζεται, (γ) της μάζας του δείγματος όπου χρειάζεται, και (δ) του όγκου του δείγματος όπου χρειάζεται, στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων της συσχέτισης, δηλαδή απευθείας στα αποτελέσματα για τα ζητούμενα μεγέθη I_{∞} και x_{eff} .

5.2. Συγχώνευση αβεβαιοτήτων με την αβεβαιότητα λόγω γεωστατιστικής διασποράς

Το διάγραμμα στο Σχήμα 2 δείχνει τη σχετική τυπική αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων του Πίνακα 1 σχετικά με το μέγεθος I_{∞} όπως προέκυψε με υπολογισμούς της αντίστοιχης ημιμεταβλητότητας, η οποία από τη φύση της περιλαμβάνει και την γεωστατιστική διασπορά. Το διάγραμμα σχετικά με το μέγεθος x_{eff} είναι ποιοτικά αντίστοιχο. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν φυσικά τα αποτελέσματα από την κατά βάθος δειγματοληψία σε σχηματισμό καννάβου (αριστερή στήλη).

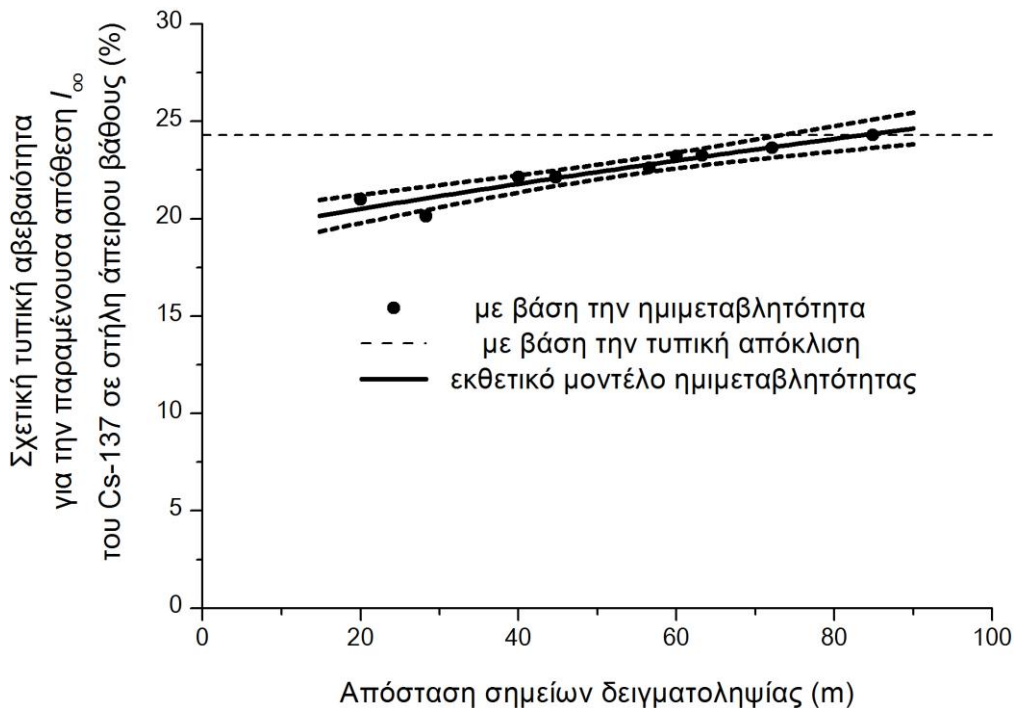
Από την ανάλυση ημιμεταβλητότητας προκύπτει μια τιμή της σχετικής τυπικής αβεβαιότητας, η οποία περιλαμβάνει σχεδόν το σύνολο των παραγόντων αβεβαιότητας των ενδιάμεσων υπολογισμών και των εκτιμήσεων μέσω της προσαρμογής Dahm αλλά και την αβεβαιότητα λόγω της γεωστατιστικής διασποράς. Η αβεβαιότητα αυτή είναι αντιπροσωπευτική για αποστάσεις δειγματοληψίας στην περιοχή ακτίνας έως 20m και είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίζεται με την στατιστική επί δείγματος, δηλ. χωρίς γεωστατιστική στάθμιση στο επίπεδο, σε σχέση με ένα δείγμα μετρήσεων που απέχουν μεταξύ τους έως το πολύ 75m.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα κατά στήλη δειγματοληψίας βάθους:
 (i) για τη συνολική ραδιενέργεια A_{∞} , (ii) για την παραμένουσα απόθεση ^{137}Cs I_{∞} , και
 (iii) για το αντίστοιχο ενεργό βάθος διείσδυσης x_{eff} , από την προσαρμογή Dahm
 (έτος αναφοράς ραδιενέργειας 2007)

Θέση	Δειγματοληψία καννάβου (Θ)			Τοποθεσία	Υπόλοιπες δειγματοληψίες		
	$A_{\infty}^{(a)}$ (Bq)	$x_{eff}^{(b)}$ (cm)	$I_{\infty}^{(b)}$ (kBq m^{-2})		$A_{\infty}^{(a)}$ (Bq)	$x_{eff}^{(b)}$ (cm)	$I_{\infty}^{(b)}$ (kBq m^{-2})
1	174 (4)	13.3	38.8	ΕΜΠ 2 (Α)	ΣΜΣ	ΣΜΣ	ΣΜΣ
2	107 (1)	16.9	24.0	ΕΜΠ 3 (Α)	1.80 (0.03)	29.9	0.4
3	91 (3)	14.9	20.3	ΕΜΠ 4 (Α)	3.20 (0.07)	22.4	0.7
4	100 (2)	15.4	22.3	ΕΜΠ 5 (Α)	0.7 (0.1)	ΣΜΣ	0.2
5	99 (2)	13.4	22.1	Χαμολιά (Α)	5.9 (0.2)	17.2	1.3
6	113 (2)	22.3	25.2	Π. Ράφτη 1 (Α)	ΣΜΣ	ΣΜΣ	ΣΜΣ
7	85.0 (0.5)	7.6	19.0	Π. Ράφτη 2 (Α)	8.0 (0.7)	57.9	1.8
8	114.0 (0.3)	22.7	25.5	Π. Ράφτη 3 (Α)	10 (1)	39.3	2.2
9	91.0 (0.6)	18.4	20.3	'Αγ. Κων/νος (Α)	11±4	ΣΜΣ	2.6
10	115 (2)	17.2	25.6	Τρικοκκιά (ΔΜ)	155 (5)	18.9	34.7
11	112 (1)	12.3	25.0	Μελίσσιο (ΔΜ)	143 (1)	8.8	31.9
12	133 (6)	31.8	29.7	Μικρόκαστρο (ΔΜ)	85 (2)	20.3	18.9
13	181 (2)	17.6	40.4	Παλαιόκαστρο (ΔΜ)	88 92)	20.9	19.6
14	140 (3)	29.6	31.2	Σκήτη (ΔΜ)	136 (9)	38.6	30.5
15	133 (1)	15.9	29.9	Μ. Κεφαλόβρυσο	80 (1)	26.8	17.8
16	90 (2)	19.2	20.2	Αγ. Κυριακή (Θ)	11 (1)	ΣΜΣ	2.5
				Βλαχογιάννη 1 (Θ)	ΣΜΣ	ΣΜΣ	ΣΜΣ
				Βλαχογιάννη 2 (Θ)	102 (3)	26.2	22.9
				Στεφανόβουνο 1 (Θ)	11.6 (0.2)	24.0	2.6
				Στεφανόβουνο 2 (Θ)	11.3 (0.2)	22.6	2.5
				Αγ. Βησσαρίων (Θ)	120 (2)	22.2	26.9
				Λοζάδα (Θ)	71.2 (0.2)	20.5	15.9

^(a) Η απόλυτη τυπική αβεβαιότητα σε Bq δίνεται σε παρένθεση
^(b) Η αντίστοιχη συνδυασμένη σχετική αβεβαιότητα δίνεται στο κείμενο,
 ΣΜΣ: Στατιστικά Μη Σημαντικό αποτέλεσμα,
 Α: Αττική, ΔΜ: Δυτική Μακεδονία, Θ: Θεσσαλία

Μία οποιαδήποτε μοναδική κατά βάθος δειγματοληψία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντιπροσωπευτική του εξεταζόμενου εδάφους σε ακτίνα από 10 έως περίπου 20m. Επομένως σε τέτοια περίπτωση, η σχετική τυπική αβεβαιότητα για το I_{∞} βρίσκεται στην περιοχή από 20 έως 23% και για το x_{eff} στην περιοχή από 35 έως 40%.



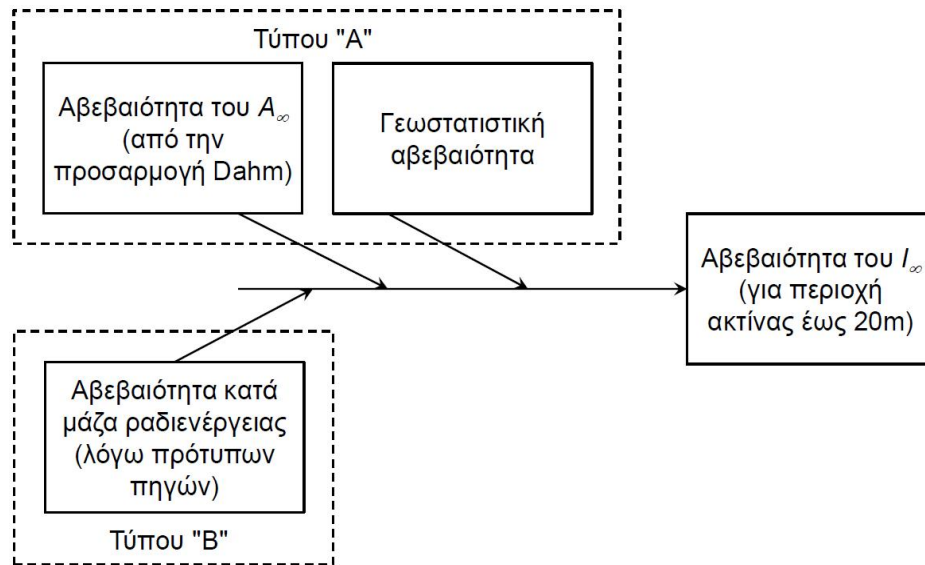
Σχήμα 2: Σχετική τυπική αβεβαιότητα για την παραμένουσα απόθεση I_{∞}

Η ακτίνα των 20m υπερκαλύπτει σαφώς την ακρίβεια προσδιορισμού συντεταγμένων με μία σύγχρονη συσκευή GPS. Είναι επομένως ορθότερο να χρησιμοποιούνται αντί του τυπικού σφάλματος της μέσης τιμής οι σχετικές τυπικές αβεβαιότητες για το I_{∞} και το x_{eff} , όπως εκτιμώνται από την ανάλυση ημιμεταβλητότητας. Η παράμετρος της γεωστατιστικής διασποράς των αποτελεσμάτων είναι η κυρίαρχη συνιστώσα στην εν λόγω υπολογιζόμενη σχετική τύπου "A" τυπική αβεβαιότητα για τα τελικά αποτελέσματα για τα μεγέθη I_{∞} και x_{eff} . Οι μόνες συνιστώσες αβεβαιότητας που δεν μπορούν να συνυπολογιστούν στην εκτίμηση αυτή με βάση τους υπολογισμούς της ημιμεταβλητότητας είναι εκείνες που οφείλονται σε συστηματικά σφάλματα.

5.3. Το τελικό διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος

Ο νόμος διάδοσης των σφαλμάτων εφαρμόζεται σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στον οδηγό JCGM 100 (2008) που βασίζεται στον οδηγό ISO GUM (1995). Το τελικό διάγραμμα αιτίου - αποτελέσματος για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας του μεγέθους I_{∞} , φαίνεται στο Σχήμα 3. Το διάγραμμα προκύπτει αν ληφθεί υπόψη η ανάλυση συνιστωσών αβεβαιότητας και αγνοηθούν οι μη σημαντικές συνιστώσες (Ellison, 2012). Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η τύπου "A" τυπική αβεβαιότητα που υπολογίζεται με βάση την ημιμεταβλητότητα συνυπολογίζει όλες τις συνιστώσες αβεβαιότητας που οφείλονται σε τυχαία σφάλματα.

Σε αυτήν πρέπει να προστίθενται και τυχόν αβεβαιότητες τύπου "B" που δεν συνυπολογίζονται σε αυτές και αντιπροσωπεύουν και τυχαία σφάλματα, τα οποία δεν μπορούν να καλυφθούν από αυτήν την τύπου "A" τυπική αβεβαιότητα. Στην εξεταζόμενη περίπτωση πρόκειται για μία μόνο συνιστώσα: η αβεβαιότητα της μέτρησης δείγματος τυποποιημένης γεωμετρίας σε διάταξη $-\gamma$ φασματοσκοπικής ανάλυσης του ΕΠΤ-ΕΜΠ που οφείλεται στην αβεβαιότητα των πηγών βαθμονόμησης.



Σχήμα 3: Διάγραμμα αιτίου - αποτελέσματος για τη χαρτογράφηση των αιτίων αββαιότητας κατά την εκτίμηση του I_∞

Επομένως, ο υπολογισμός για τη συνδυασμένη σχετική αββαιότητα για το I_∞ δίνεται από τη σχέση:

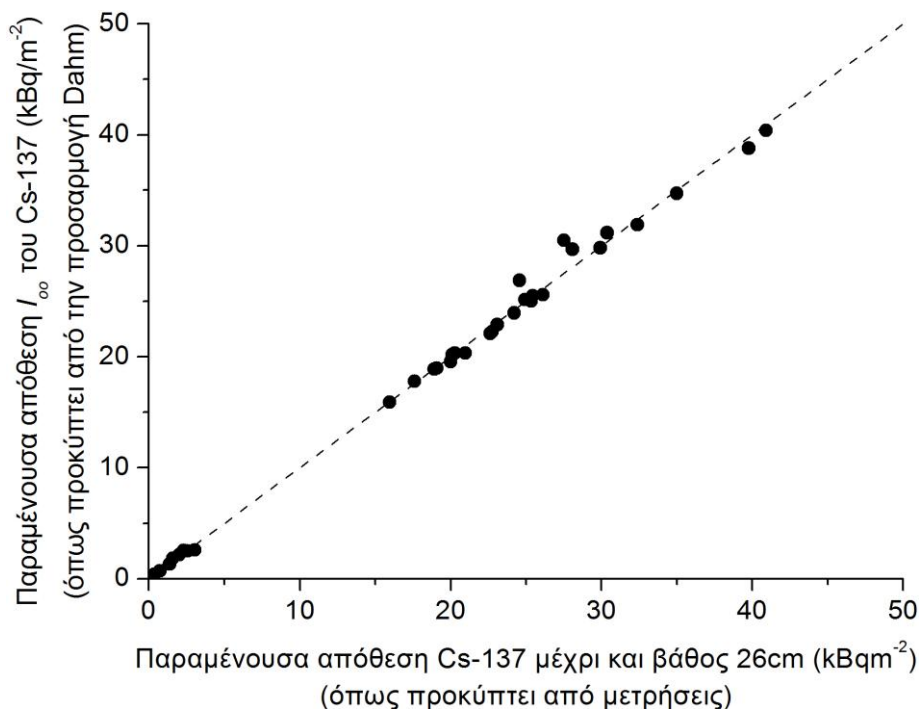
$$u_{I_\infty}^2 = u_{typeA,relative}^2 + u_{CRM,relative}^2 \quad (19)$$

Ο αντίστοιχος υπολογισμός για τη συνδυασμένη σχετική αββαιότητα για το x_{eff} είναι ίσος με τον πρώτο προσθετέο του δεύτερου μέλους της σχέσης (19). Σύμφωνα με την επεξεργασία και τις υποθέσεις της παρούσας εργασίας η σχετική τυπική αββαιότητα για το I_∞ εκτιμάται σε περίπου 23% και για το x_{eff} σε περίπου 38%, για το χειρότερο σενάριο των επιμέρους συνιστωσών.

6. Σχόλια και συμπεράσματα

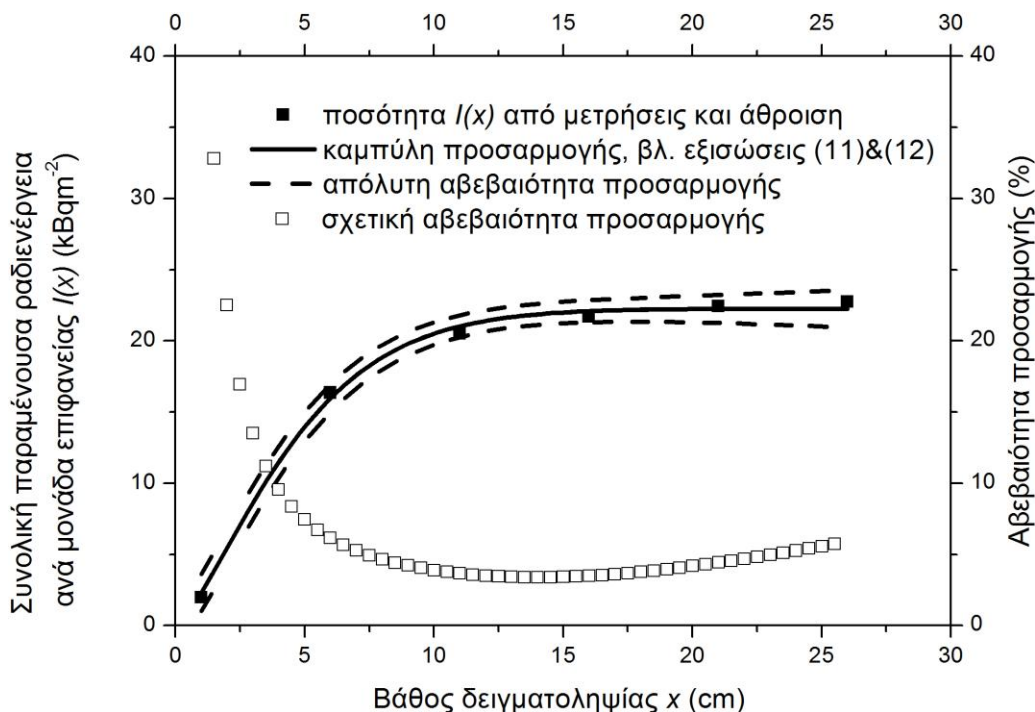
Είναι φανερό ότι η σχετική τυπική αββαιότητα λόγω γεωστατιστικής διασποράς είναι η σημαντικότερη και αναπόφευκτη πηγή αββαιότητας για τα εξεταζόμενα μεγέθη. Πρακτικά όλες οι άλλες πηγές αββαιότητας μπορούν να αγνοούνται υπό προϋποθέσεις, λόγω αμελητέας συμβολής. Η γεωστατιστική αββαιότητα στα εξεταζόμενα μεγέθη αποδίδεται κυρίως στις φυσικές διεργασίες κατακόρυφης και δευτερευόντως οριζόντιας μετανάστευσης του ^{137}Cs προς το βάθος, οι οποίες εξελίχθηκαν από το 1986 έως το 2007, έτος στο οποίο αναφέρονται οι παρουσιαζόμενες δειγματοληψίες. Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 σχετικά με την αββαιότητα της προσαρμογής στην εξίσωση (11) για το μέγεθος A_∞ , δείχνουν ότι αυτή είναι πολύ μικρή και ότι η προσαρμογή είναι, όπως προκύπτει από έξι συνολικά δείγματα βάθους σε κάθε στήλη δειγματοληψίας, πολύ καλής ποιότητας.

Αντίστοιχοι υπολογισμοί δείχνουν ότι η αββαιότητα της προσαρμογής για το αθροιστικό μέγεθος $A(x = 26\text{cm})$, παρότι κατά τι μεγαλύτερη δεν είναι και πάλι σημαντική. Αυτή η διαπίστωση επιτρέπει γενικά την κατευθείαν εκτίμηση της I_∞ μόνο από δειγματοληψία διαδοχικών δειγμάτων κατά βάθος και μέχρι $x = 26\text{cm}$ και τον υπολογισμό της αντίστοιχης $I(x = 26\text{cm})$. Η I_∞ και η $I(x = 26\text{cm})$ συνδέονται με ισχυρά θετική γραμμική συσχέτιση κατά τον τρόπο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Η απευθείας εκτίμηση της παραμένουσας απόθεσης I_{∞} , με τη βοήθεια μετρήσεων μέχρι και βάθος 26cm είναι δυνατή διότι συνδέονται με υψηλή θετική συσχέτιση

Η εκτίμηση της ποσότητας $I(x = 26\text{cm})$ διορθωμένη για ημερομηνία αναφοράς 01 Μαΐου 1986, μπορεί να συνδέεται απευθείας με την αρχική απόθεση ^{137}Cs από το ατύχημα στο Chernobyl, όπως αυτή εκτιμήθηκε από τις γεωστατιστικές απεικονίσεις που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (βλ. Παπαδάκος, 2012 και Papadakos, 2014).



Σχήμα 4: Η ποσότητα $I(x)$ σε συνάρτηση με το βάθος δειγματοληψίας x για μία από τις κατά βάθος δειγματοληψίες καννάβου στην τοποθεσία Μαυρομάτι. Η ελάχιστη σχετική αβεβαιότητα προσαρμογής εντοπίζεται σε βάθος 12cm.

Τέλος, η προσαρμογή Dahm δεν μπορεί να προσδιορίσει την αθροιστική ραδιενέργεια σε μικρά βάθη με την ίδια χαμηλή αβεβαιότητα που επιτυγχάνεται σε άπειρο βάθος. Η εξήγηση βρίσκεται στο σχετικά μεγάλο βήμα βάθους των 5cm που χρησιμοποιήθηκε στις κατά βάθος δειγματοληψίες. Το Σχήμα 4 αποδίδει ποιοτικά το φαινόμενο, δείχνοντας ότι η αβεβαιότητα προσαρμογής μειώνεται σταδιακά με το βάθος δειγματοληψίας.

7. Βιβλιογραφία

Καρφόπουλος, Κ., Παπαδάκος, Γ., Καραγγελοσ, Δ., Ρούνη, Π., Πετρόπουλος, Ν., Αναγνωστάκης, Μ., Χίνης, Ε., Σιμόπουλος, Σ., Έργο "Πυθαγόρας ΙΙ": «Ραδιοπεριβαλλοντική Τεχνολογία», Συνέδριο για την Επιστημονική Έρευνα στο ΕΜΠ, 5-8 Ιουλίου 2007, Πλωμάρι, Λέσβος.

Παπαδάκος Γ., «Στοχαστικές διαδικασίες και συνακόλουθες ποσοτικές και ποιοτικές εκτιμήσεις ραδιοπεριβαλλοντικών επιπτώσεων σε πληθυσμιακές ομάδες στον ελληνικό χώρο», Διδακτορική Διατριβή, 2012, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.

Almgren, S., Isaksson, M., "Vertical migration studies of ¹³⁷Cs from nuclear weapons fallout and the Chernobyl accident", Journal of Environmental Radioactivity, 91, pp. 90-102, 2006.

Antonopoulos-Domis, M., Clouvas, A., Hiladakis, A., Kadi, S., "Radio-caesium distribution in undisturbed soil: measurements and diffusion – advection model", Health Physics 69(6), pp. 949-953, 1995.

Dahm, H., Niemeyer, J., Schröder, D., "Application of the Weibull distribution to describe the vertical distribution of cesium-137 on a slope under permanent pasture in Luxembourg", Journal of Environmental Radioactivity, 63(3), pp. 207-219, 2002.

De Cort, M., Dubois, G., Fridman, S., Germenchuk, M., Izrael, Y., Janssens, A., Jones, A., Kelly, G., Kvasnikova, E., Matveenko, I., Nazarov, I., Pokumeiko, Y., Sitak, V., Stukin, E., Tabachny, L., Tsaturov, Y., Avdyushin, S., "Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident", EC/CIS collaborative programme of research on the consequences of the Chernobyl NPP accident, 1998, Office for official publications of the European Communities.

Ellison, S.L.R., Williams, A. (Eds), "Eurachem/CITAC Guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement", Third edition, ISBN 978-0-948926-30-3, 2012.

BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, "ISO GUM: Guide to the expression of uncertainty in measurement", First edition, ISBN 92-67-10188-9, 1995.

JCGM/WG1, BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, "JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections): Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement", First edition, 2008.

Papadakos, G.N., Karangelos, D.J., Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E., "Caesium-137 vertical migration data and inventory investigation in Greek soil cores", twenty years after the Chernobyl accident (υπό επεξεργασία), 2014.

Petersen, W., Knauth, H.-D., Pepelnik, R., "Vertical distribution of Chernobyl isotopes and their correlation with heavy metals and organic carbon in sediment cores of the Elbe estuary", The Science of the Total Environment, 97/98, 531-547, 1990.

Petropoulos, N., Hinis, E., Simopoulos, S., “*Cs-137 Chernobyl fallout in Greece and its associated radiological impact*”, Environment International 22 Suppl.1, S369-S373, 1996.

Simopoulos, S., “*Soil sampling and 137Cs Analysis of the Chernobyl Fallout in Greece*”, Applied Radiation and Isotopes 40(7), 607-613, 1989.

Szerbin, P., Koblinger-Bokori, E., Koblinger L., Vegvari, I., Urgon, A., “*Caesium-137 migration in Hungarian soils*”, The Science of the Total Environment, 227, 215-227, 1999.