



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

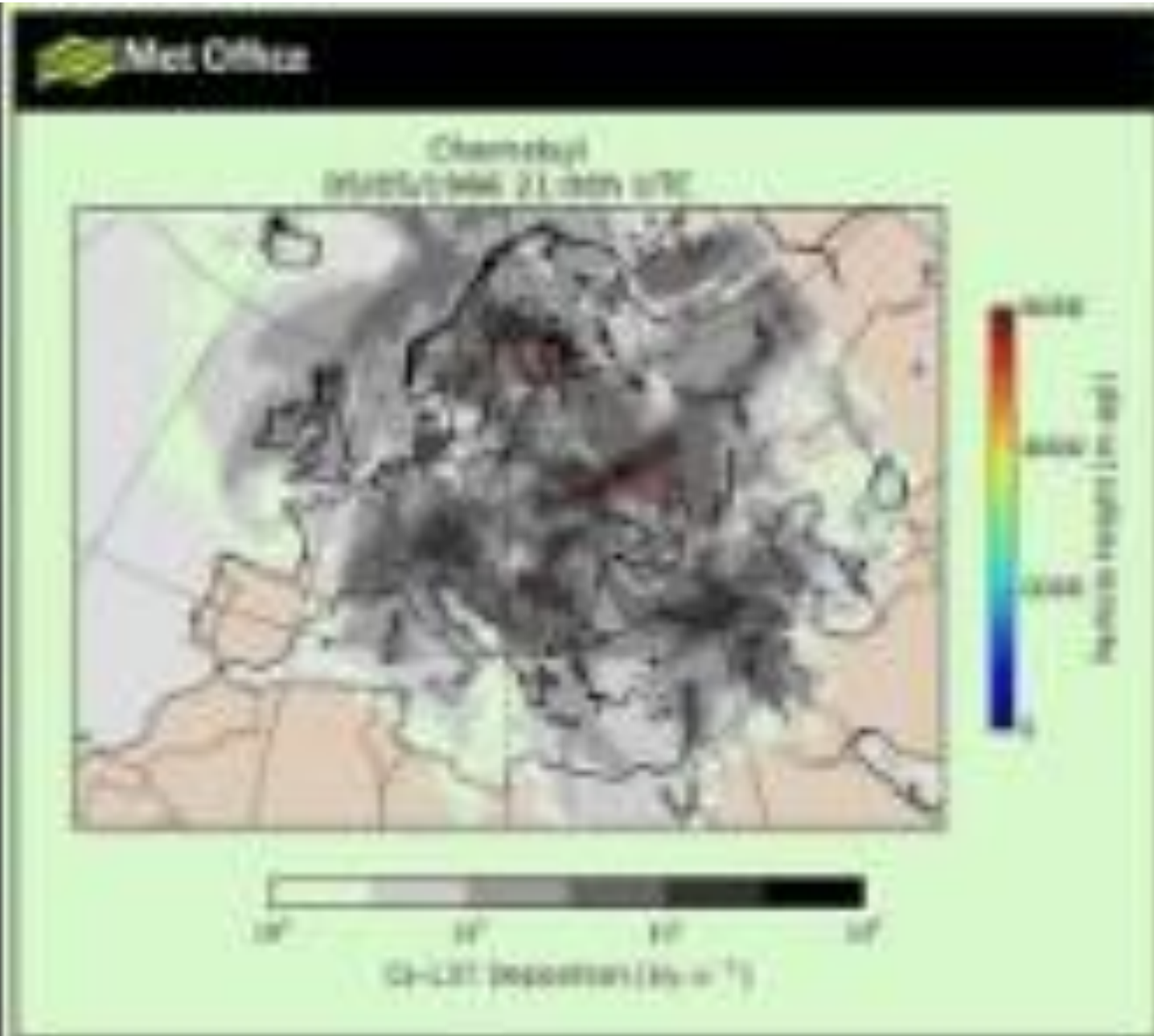
***Συγκριτική Ανάλυση της μετατόπισης του Cs-137 στο χώμα για το
διάστημα 1987-2023:***

Πειραματικές Μετρήσεις vs Προβλέψεις Μοντέλου Διαμερισμάτων

Αλέξανδρος Κλούβας, Ιωάννης Καΐσας, Στέλιος Ξανθός

Εισαγωγή στις Εφαρμογές της Πυρηνικής Τεχνολογίας

Εξάπλωση της Ραδιενέργειας από το ατύχημα του Chernobyl το 1986



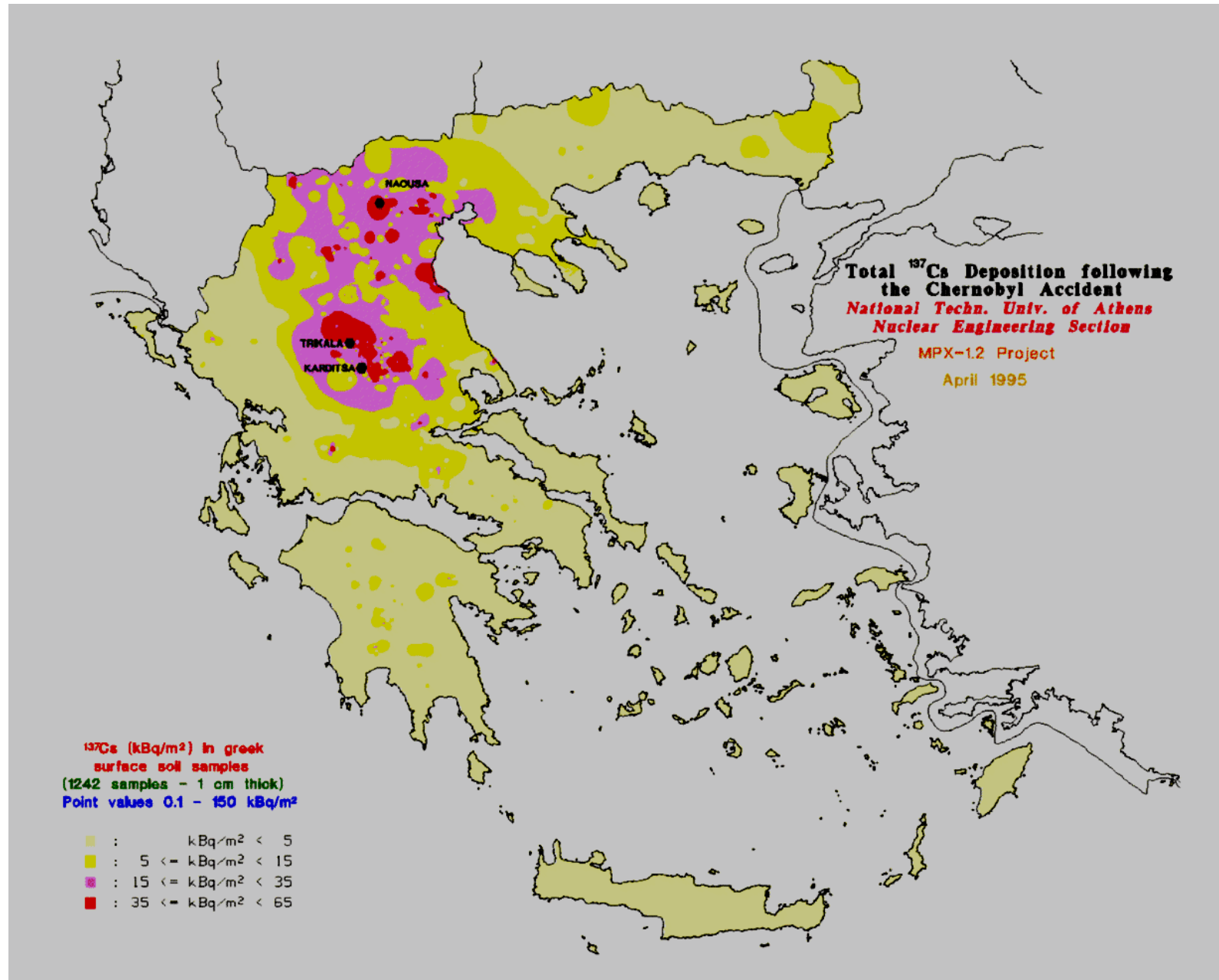
Οι συνολικές ενεργότητες που απελευθερώθηκαν από το ατύχημα*:

- Cs-137 $38 \cdot 10^{15}$ Bq
- Cs-134 $18 \cdot 10^{15}$ Bq
- I-131 $260 \cdot 10^{15}$ Bq
- Sr-90 $8 \cdot 10^{15}$ Bq
- Pu-241 $5 \cdot 10^{15}$ Bq

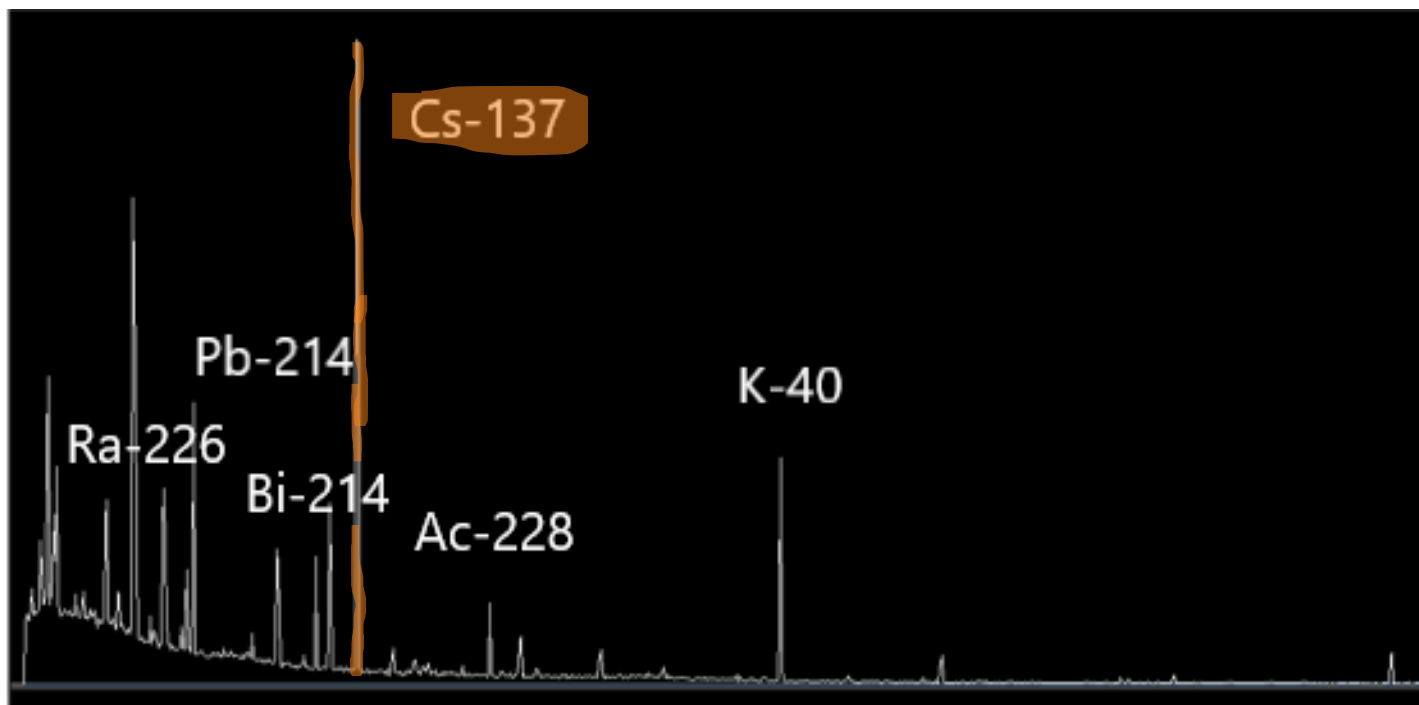
*Σύμφωνα με την κυβέρνηση της πρώην ΕΣΣΔ

PetaBq

Εναπόθεση του Cs-137 στο έδαφος της Ελλάδας



Φάσμα ακτίνων γ με ανιχνευτή υπερκάθαραυ γερμανίου HPGe



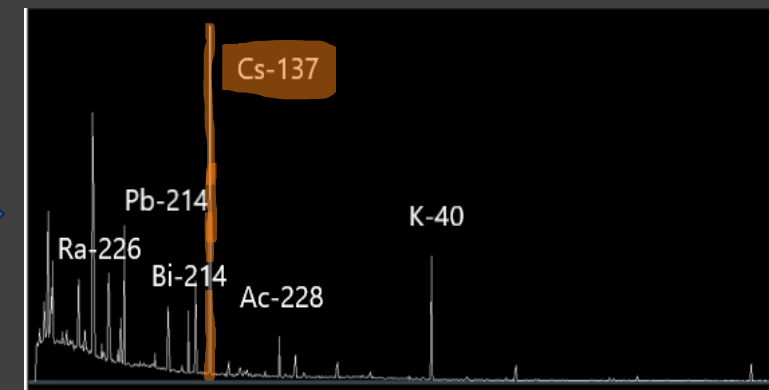
- **Cs-137** με χρόνο ημιζωής $T_{1/2} = 30.2$ έτη
- **Cs-134** με χρόνο ημιζωής $T_{1/2} = 2.7$ έτη
- **I-131** με χρόνο ημιζωής $T_{1/2} = 8.0$ ημέρες

Ο λόγος των συγκεντρώσεων (Bq/kg) **Cs-137** και **Cs-134** (ανηγμένες τον Μάιο του 1986) στο χώμα, τα πρώτα χρόνια μετά το ατύχημα όπου το τελευταίο ήταν ανιχνεύσιμο, βρέθηκε να είναι σχεδόν **2**.

Λαμβάνοντας υπόψη, :

- Ο ίδιος λόγος **2** μετρήθηκε στα φίλτρα αέρα αμέσως μετά την άφιξη του ραδιενεργού νέφους στην Ελλάδα και
- ότι το Cs-134 στο χώμα υπάρχει μόνο λόγω του ατυχήματος του Chernobyl (και όχι από τις δοκιμές πυρηνικών βομβών),

μπορούμε να υποθέσουμε ότι πρακτικά όλο το Cs-137 στο χώμα, υπάρχει εξαιτίας του ατυχήματος του Chernobyl, δηλαδή το **fall-out** στην Ελλάδα από δοκιμές πυρηνικών βομβών είναι αμελητέο.



**In-situ συλλογή
του χώματος**

~

**Προετοιμασία
των δειγμάτων**

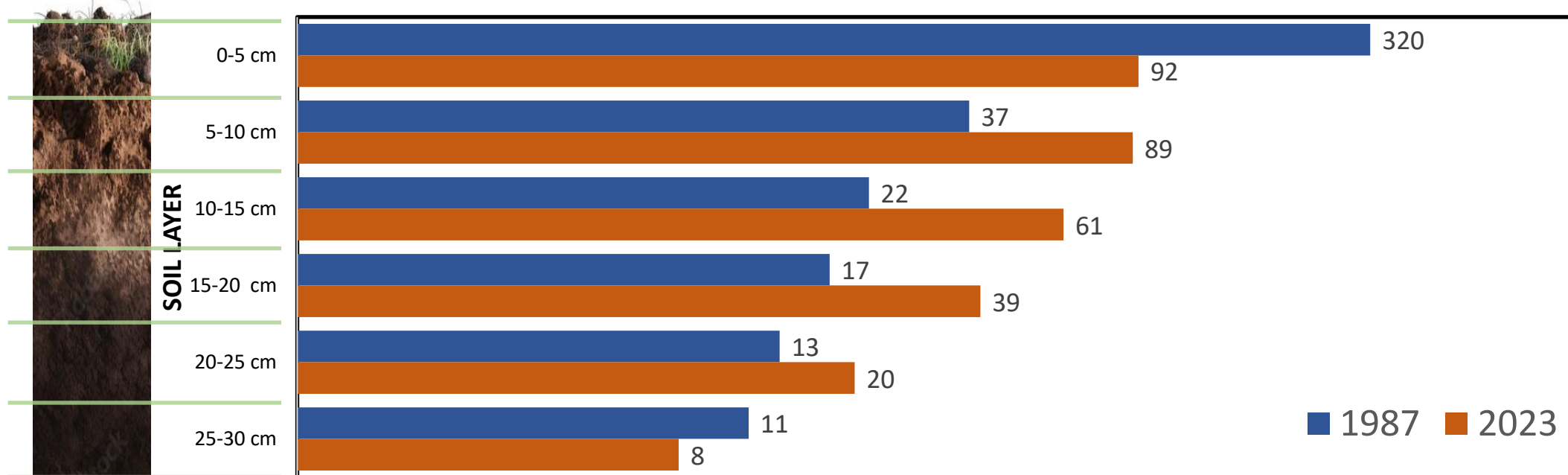
~

**Μετρήσεις με τον
HPGe**

Αποτελέσματα Μετρήσεων – Σύγκριση 1987 και 2023

Συγκέντρωση Cs-137 ανηγμένη την εποχή του ατυχήματος του Chernobyl (Bq/kg)

1 10 100 1000



- Καθώς περνούν τα χρόνια το Cs-137 μετατοπίζεται σε βαθύτερα στρώματα εδάφους
- Στα επόμενα χρόνια, το μέγιστο της συγκέντρωσης θα μετατοπιστεί από το 5 cm στρώμα στο 10 cm στρώμα
 - Σε βαθύτερα στρώματα ο λόγος **R** αυξάνεται καθώς περνούν τα χρόνια

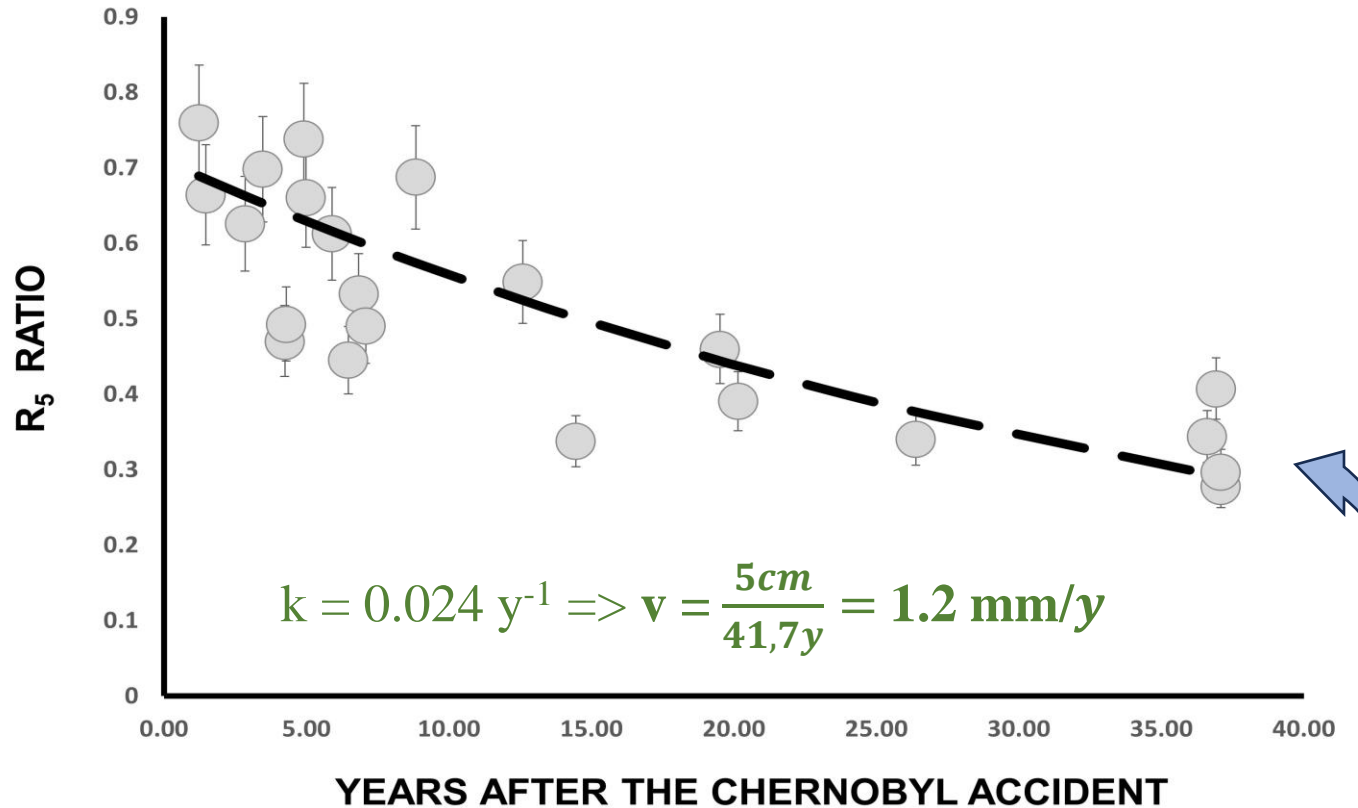
Μοντέλο Διαμερισμάτων συμφωνεί με τις Μετρήσεις

z : το βάθος του στρώματος χώματος (cm)

$T(z)$: ενεργότητα Cs-137 ανά μονάδα επιφάνειας και βάθους (Bq/m^3)

R_z : Ο λόγος του $T(z)$ για ένα συγκεκριμένο στρώμα προς το σύνολο του T όλων των στρωμάτων

$$R_z = \frac{\int_{z-5}^z T(z) dz}{\int_0^{30} T(z) dz}$$



$$\frac{dR_5}{dt} = -kR_5$$



$$R_5(t) = R_5(t=0)e^{-kt}$$

$$\frac{dR_{10}}{dt} = kR_5 - kR_{10}$$



$$R_{10}(t) = [kR_5(t=0)t + R_{10}(t=0)]e^{-kt}$$

$$\frac{dR_{15}}{dt} = kR_{10} - kR_{15}$$

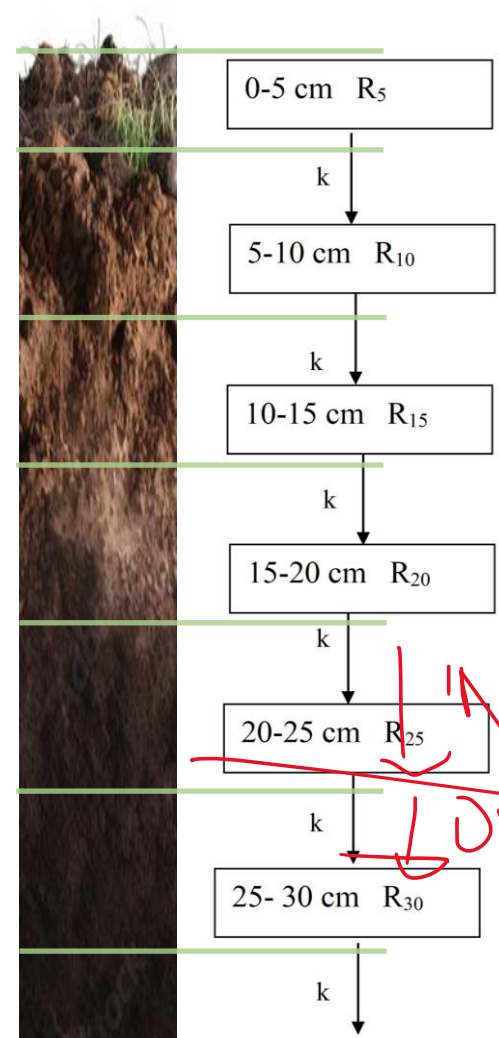


$$R_{15}(t) = \left[\frac{k^2 R_5(t=0)t^2}{2} + kR_{10}(t=0)t + R_{15}(t=0) \right] e^{-kt}$$

$$\frac{dR_{20}}{dt} = kR_{15} - kR_{20} \implies R_{20}(t) = \left[\frac{k^3 R_5(t=0)t^3}{6} + \frac{k^2 R_{10}(t=0)t^2}{2} + kR_{15}(t=0)t + R_{20}(t=0) \right] e^{-kt}$$

$$\frac{dR_{25}}{dt} = kR_{20} - kR_{25} \implies R_{25}(t) = \left[\frac{k^4 R_5(t=0)t^4}{24} + \frac{k^3 R_{10}(t=0)t^3}{6} + \frac{k^2 R_{15}(t=0)t^2}{2} + kR_{20}(t=0)t + R_{25}(t=0) \right] e^{-kt}$$

$$\frac{dR_{30}}{dt} = kR_{25} - kR_{30} \implies R_{30}(t) = \left[\frac{k^5 R_5(t=0)t^5}{120} + \frac{k^4 R_{10}(t=0)t^4}{24} + \frac{k^3 R_{15}(t=0)t^3}{6} + \frac{k^2 R_{20}(t=0)t^2}{2} + kR_{25}(t=0)t + R_{30}(t=0) \right] e^{-kt}$$



Ένα απλό **μοντέλο διαμερισμάτων** προσομοιώνει την κατανομή του Cs-137 στο χόμα συναρτήσει του χρόνου. Κάθε στρώμα εδάφους αντιπροσωπεύεται από ένα διαμέρισμα.

Κάθε διαμέρισμα, δηλαδή κάθε διαφορική εξίσωση θεωρεί μια **είσοδο Cs-137** από το υπερκείμενο στρώμα και μια **έξοδο Cs-137** στο επόμενο βαθύτερο στρώμα.

k είναι ο **λόγος μεταφοράς** μεταξύ των διαμερισμάτων και μετριέται σε **έτη⁻¹**

Η απλότητα του μοντέλου έγκειται στην χρήση του **ίδιου k** για κάθε διαφορετική διαφορική εξίσωση.

Θεωρώντας την **διάχυση** ως τον κύριο μηχανισμό μετατόπισης του Cs-137, το **k** δεν πρέπει να θεωρείται το ίδιο για δύο γειτονικά στρώματα, αλλά να **αυξάνεται με το βάθος, ...**

... με αυτό τον τρόπο το μοντέλο μπορεί να **γενικευτεί σε νέες μετρήσεις**, ακόμα και αν δεν ακολουθεί με λεπτομέρεια τις μετρήσεις.

Handwritten red text: ΠΑΡΑΤ k
ΛΟΥΤΡΑΤ k

Μοντέλο Διαμερισμάτων

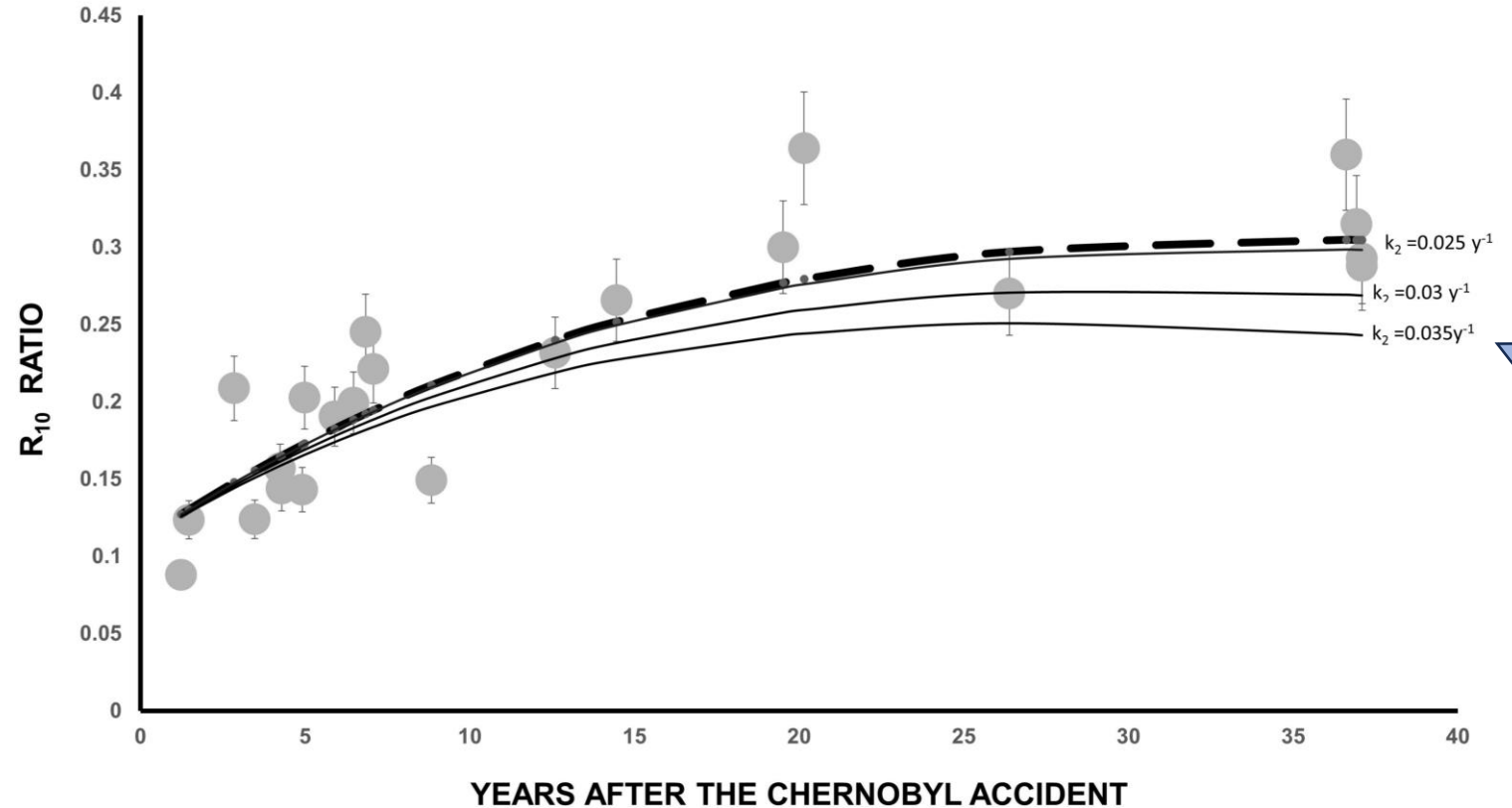
με

k_1, k_2, \dots, k_i

Θεωρώντας τη διάχυση ως τον κύριο μηχανισμό μετατόπισης του Cs-137, ο k αυξάνεται με το βάθος (βλέπε νόμο του Fick).

Ένα τέτοιο μοντέλο παρεκκλίνει από τα παρατηρούμενα αποτελέσματα μετρήσεων.

Αυτό υποδεικνύει ότι η διάχυση μπορεί να μην είναι ο κύριος μηχανισμός μετατόπισης για μεγάλες χρονικές περιόδους. Παράγοντες όπως η οριζόντια μεταφορά (**advection**) ή άλλες διαδικασίες μεταφοράς ενδέχεται να επηρεάζουν περισσότερο τη μεταφορά Cs-137.

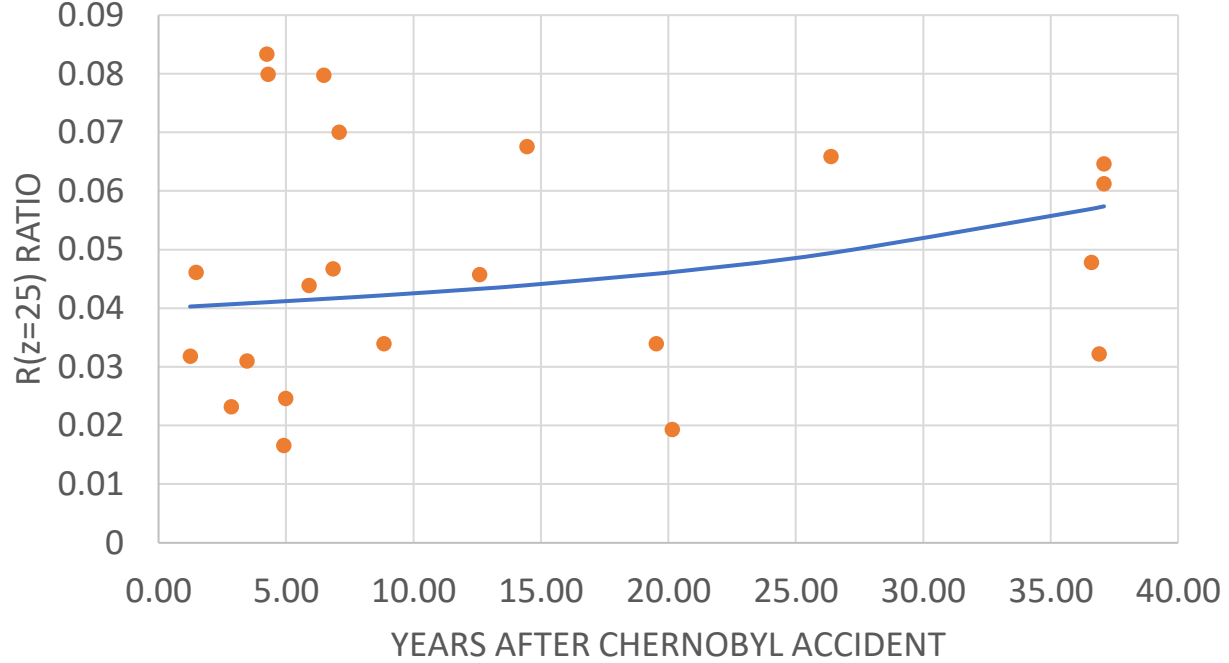
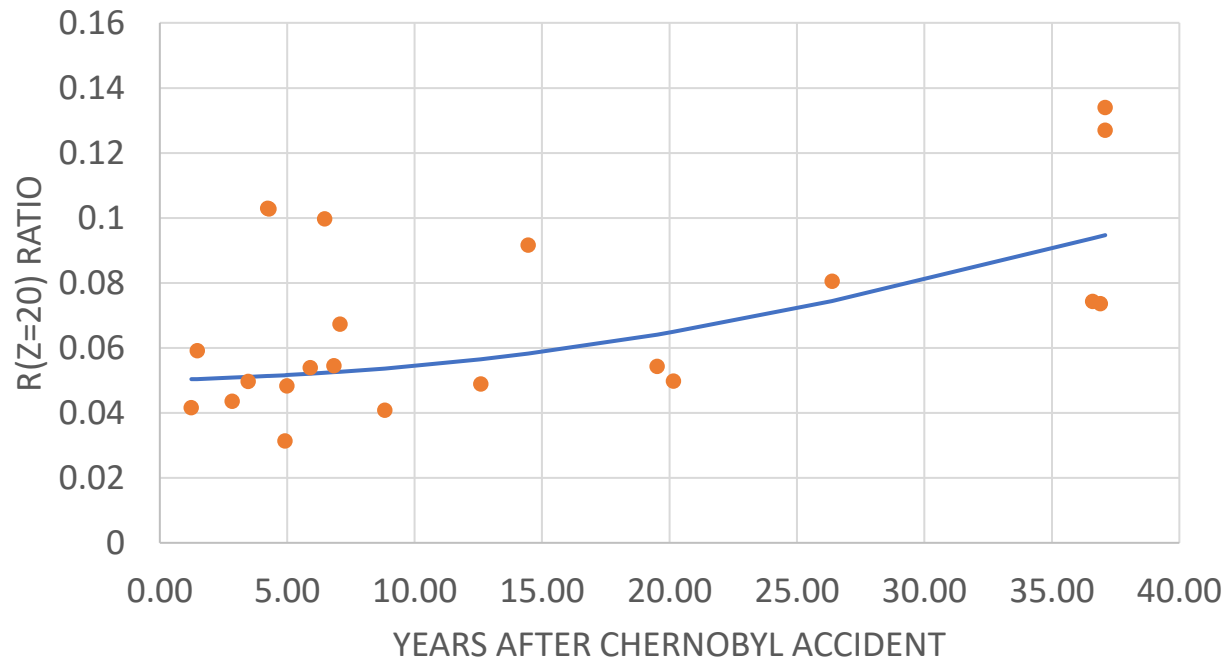
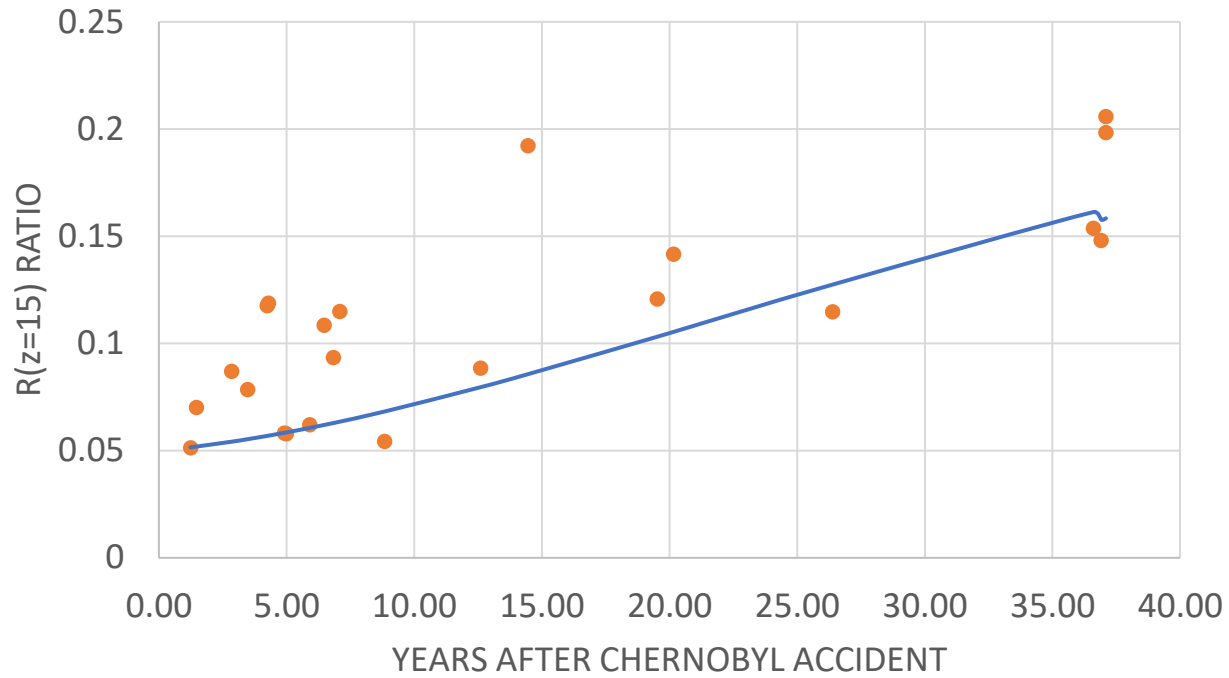
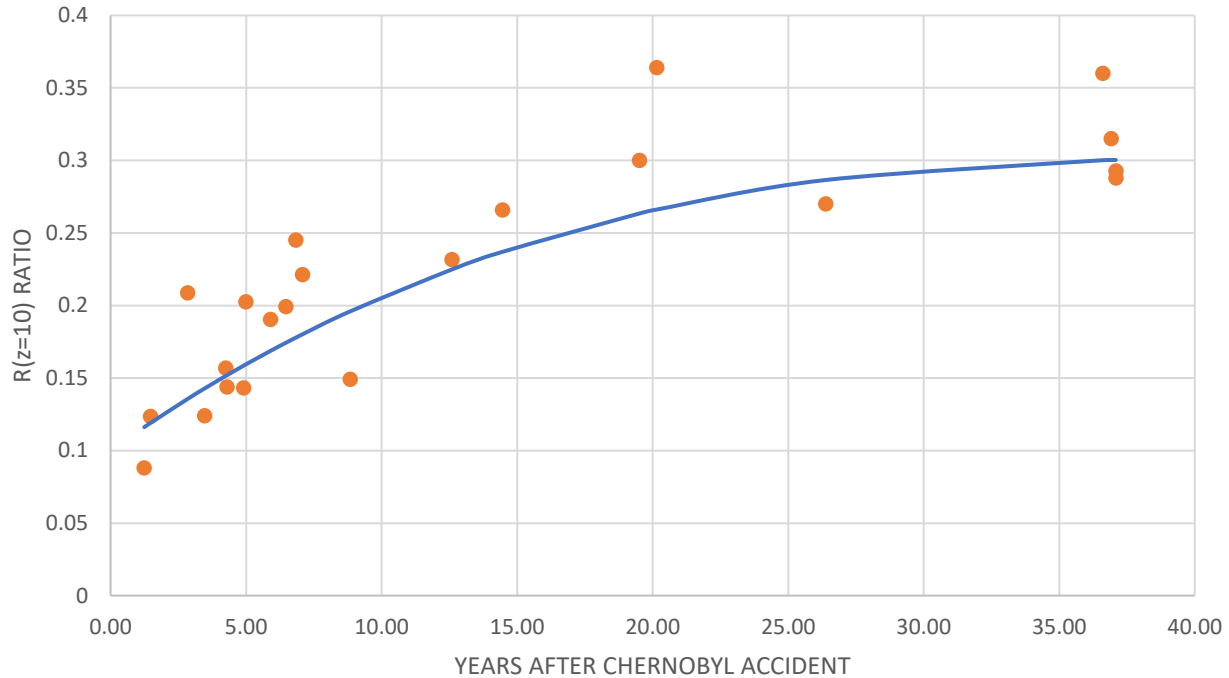


$$\frac{dR_5}{dt} = -k_1 R_5$$

$$\frac{dR_{10}}{dt} = k_1 R_5 - k_2 R_{10}$$

$$R_5(t) = R_5(t=0)e^{-k_1 t}$$

$$R_{10}(t) = \left(\frac{k_1 R_5(t=0)}{k_2 - k_1} \right) (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + R_{10}(t=0) e^{-k_2 t}$$



Εναπόθεση του Cs-137 (Bq/m²) από μετρήσεις του 2023 και 1986

$$A(t=36.6y) = 136 \frac{Bq}{Kg} * 1300 \frac{Kg}{m^3} * 0.05m = 8.8 \frac{kBq}{m^2}$$

Ανάγοντας στην εποχή του ατυχήματος του Chernobyl, δηλαδή στο 1986:

$$A_0 = A(t = 36.6y) * 2^{\frac{36.6}{30.2}} = 20.2 \frac{kBq}{m^2}$$

Αυτή η τιμή είναι, σε ανεκτά επίπεδα, σε συμφωνία με την μετρούμενη εναπόθεση στην περιοχή, η οποία μετρήθηκε ανεξάρτητα κατά την διάρκεια του 1^{ου} έτους από το ατύχημα του Chernobyl και βρέθηκε να είναι **27.3 kBq/m²**

Οι διαστάσεις του κινδύνου από την εναπόθεση του Cs-137

Μετρώντας στα δείγματα χώματος τις σειρές U-238 και Th-232 και K-40 συμπεραίνουμε ότι οι σχετικές συγκεντρώσεις είναι:

$$^{226}\text{Ra} = 13 \text{ Bq/kg}$$

$$^{228}\text{Ac} = 16 \text{ Bq/kg}$$

$$^{40}\text{K} = 228 \text{ Bq/kg}$$

Θεωρώντας ότι έχουν ομοιόμορφη κατανομή στο χώμα και του παράγοντες συσχέτισης της ισοδύναμης δόσης με την ενεργότητα από την μελέτη Lemercier, στο 1m πάνω από το έδαφος η ισοδύναμη δόση είναι:

$$\text{για το } ^{226}\text{Ra} = 7.33 \text{ nSv/h}$$

$$\text{για τη σειρά } ^{232}\text{Th} = 11.98 \text{ nSv/h}$$

Monte-Carlo προσομοιώσεις για της κατανομής ^{40}K και εναπόθεσης Cs-137 δίνουν:

$$\text{Ισοδύναμη δόση στο 1m πάνω από το έδαφος για το } ^{40}\text{K} = 10.23 \text{ nSv/h}$$

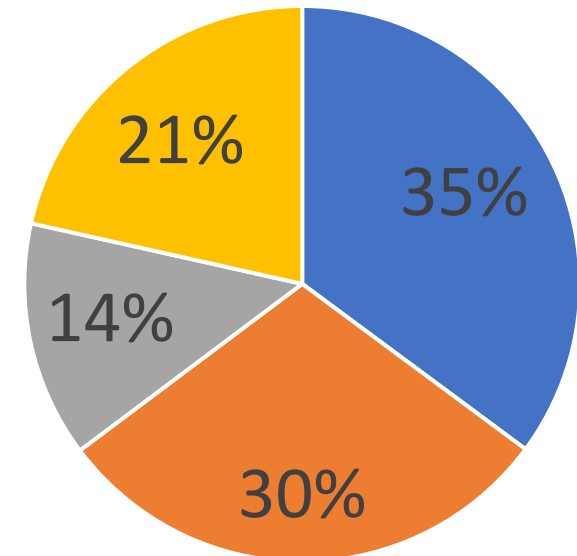
$$\text{Ισοδύναμη δόση στο 1m πάνω από το έδαφος για το Cs-137} = 4.56 \text{ nSv/h}$$

$$\text{Συνολική ισοδύναμη δόση στο 1m πάνω από το έδαφος για το } = 34.1 \text{ nSv/h.}$$


Επί-τόπου μετρήσεις με φορητά δοσίμετρα σπινθηριστών αποκαλύπτουν ισοδύναμη δόση στο 1m πάνω από το έδαφος = 40 έως 45 nSv/h.

Συνεισφορά του Cs-137 και των φυσικών ραδιονουκλιδίων στον Ρυθμό Περιβαλλοντικής Ισοδύναμης Δόσης

■ Σειρά θορίου ■ K-40 ■ Cs-137 ■ Ra-226



Long-term study (1987–2023) on the distribution of ^{137}Cs in soil following the Chernobyl nuclear accident: a comparison of temporal migration measurements and compartment model predictions

Ioannis Kaissas¹, Alexandros Clouvas^{1,*} , Marios Postatzis¹, Stelios Xanthos² and Michalakis Omirou¹

¹Nuclear Technology Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, GR-54124 Thessaloniki, Greece

²Industrial Engineering and Management Department, International Hellenic University, GR-57400 Thessaloniki, Greece

*Corresponding author: clouvas@ece.auth.gr

Abstract

After the Chernobyl accident, a designated area of $\sim 1000\text{ m}^2$ within the University farm of Aristotle University of Thessaloniki in Northern Greece was utilized as a test ground for radioecological measurements. The profile of ^{137}Cs in the soil was monitored from 1987 to 2023, with soil samples collected in 5-cm-thick slices (layers) down to a depth of 30 cm. The mean total deposition of ^{137}Cs in the area, backdated to the time of the Chernobyl accident, was determined to be $18.6 \pm 1.8\text{ kBq m}^{-2}$ based on four follow-up profile measurements of ^{137}Cs in the soil for the years 2022 and 2023. It is noteworthy that this value is similar to the total deposition at the site, which was independently measured to be about 20 kBq m^{-2} during the first year after the Chernobyl accident. The fractional contribution of each soil layer (e.g., 0–5 cm, 5–10 cm, 10–15 cm, etc.) to the total deposition of ^{137}Cs (0–30 cm) is presented and analyzed. A compartment model was utilized to forecast the temporal evolution of fractional contributions of the different soil layers to the total deposition of ^{137}Cs (0–30 cm). In this model, each soil layer is represented as a separate compartment. The model assumes that the transfer rates between adjacent compartments are equal. The agreement between the measured fractional contributions and the model predictions suggests that the compartment model with equal transfer rates can capture the broad patterns of ^{137}Cs migration within the soil layers over the long period of 1987–2023. However, the use of a second compartment model with increasing transfer rates between consecutive soil layers did not align with the observed outcomes. This indicates that diffusion may not be the primary migration mechanism over the 36-y period covered by our study.

Introduction

The long-term external dose resulting from nuclear accidents, such as Chernobyl and Fukushima, primarily arises from the deposition of ^{137}Cs in the environment. Accurate knowledge of the distribution of ^{137}Cs deposited in the soil is crucial for reliable assessments of the external dose^(1, 2) and for understanding the potential uptake of this radionuclide by plants through root systems. Vertical migration of ^{137}Cs in the soil has been a subject of extensive research^(3, 4) because of its importance in assessing environmental impacts and potential risks. The radioecological studies conducted following the Chernobyl accident have provided valuable insights and experience that could aid in the planning and interpretation of similar studies in

Japan following the Fukushima accident. By leveraging the knowledge gained from the Chernobyl studies, researchers could enhance the effectiveness and efficiency of radioecological investigations in Fukushima.

After the Chernobyl accident, a designated area of $\sim 1000\text{ m}^2$ within the University farm of Aristotle University of Thessaloniki in Northern Greece was utilized by the Nuclear Technology Laboratory as a test ground for radioecological measurements^(5, 6, 7). In the present study, follow-up profile measurements of ^{137}Cs in the soil were conducted for the years 2022 and 2023 within the designated area. The measurements of the present study were performed $\sim 10\text{ y}$ after the last measurements⁽⁷⁾ taken at the site, which spanned from 1987 to 2012. To analyze the data, the time evolution

Received: June 28, 2023. Revised: July 31, 2023. Editorial decision: August 7, 2023. Accepted: August 15, 2023
© The Author(s) 2023. Published by Oxford University Press. All rights reserved. For Permissions, please email: journals.permissions@oup.com

14%

