



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Συγκριτική μελέτη ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία σε θαλάσσιους οργανισμούς με τη χρήση συμβατικών εξισώσεων και του υπολογιστικού μοντέλου RESRAD-BIOTA»

**Μαρώση Ναυσικά**

Επιβλέπων Ερευνητής: **Φλώρου Ελένη**

Υπεύθυνος Καθηγητής: **Βλαστού-Ζάννη Ρόζα**

ΑΘΗΝΑ 2014

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα “Συγκριτική μελέτη ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία σε θαλάσσιους οργανισμούς με τη χρήση συμβατικών εξισώσεων και του υπολογιστικού μοντέλου RESRAD-BIOTA” εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος του Ινστιτούτου Πυρηνικής Τεχνολογίας-Ακτινοπροστασίας του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών “Δημόκριτος”, υπό την επίβλεψη της Διευθύντριας Ερευνών Δρ. Ελένης Φλώρου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δρ. Ελένη Φλώρου για την πολύτιμη καθοδήγηση, μέσω επιστημονικών συμβουλών και υποδείξεων. Την ευχαριστώ και για την ηθική υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που υπέδειξε στο πρόσωπο μου πως μπορώ να ανταπεξέλθω στην πραγμάτωση μίας αρκετά απαιτητικής και πολύπλευρης μελέτης, αλλά και για την υπομονή και κατανόησή της.

Ακόμη ένα μεγάλο ευχαριστώ στην υπεύθυνη καθηγήτριά μου κα. Ρόζα Βλαστού-Ζάννη που μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ πιο ενδελεχώς με έναν τομέα της Πυρηνικής Φυσικής που με ενδιέφερε, την Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος, όπως και για την άψογη συνεργασία μας και τις συμβουλές που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες επιθυμώ να δώσω σε όλο το Επιστημονικό Προσωπικό του ΕΡΠ/ΠΡΕΤΕΑ/ΕΚΕΦΕ«ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» για το άψογο κλίμα συνεργασίας και συμπαράστασης, και κυρίως στην Υποψήφια Διδάκτορα Μαρία Σωτηροπούλου για το αμείωτο ενδιαφέρον της να με βοηθήσει σε κάθε μου απορία.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ ανήκει στην οικογένειά μου για την αμέριστη αγάπη, αφοσίωση και υποστήριξη που μου παρέχει σε κάθε βήμα της ζωής μου.

Ναυσικά Ν.Μαρώση

Αθήνα 2014

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Σελίδα

Πρόλογος.....	2
Αντικείμενο-Σκοπός της διπλωματικής.....	9

### **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

<b>Κεφάλαιο 1: Στοιχεία πυρηνικής φυσικής.....</b>	<b>13</b>
1.1) Πυρηνική Αστάθεια.....	14
1.1.1) Ραδιενέργεια.....	14
1.1.2) Χρόνος υποδιπλασιασμού – Μέσος χρόνος ζωής.....	15
1.1.3) Τρόποι Ραδιενεργού Διάσπασης.....	16
1.1.3.1) Η διάσπαση-α.....	16
1.1.3.2) Η διάσπαση-β.....	17
1.1.3.3) Η αποδιέγερση-γ.....	17
1.2) Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας γάμμα με την ύλη.....	19
1.2.1) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Photoelectric effect).....	20
1.2.2) Σκέδαση Compton (Compton scattering).....	21

1.2.3) Δίδυμη Γένεση (Pair Production).....	23
<b>Κεφάλαιο 2: Περί Ιοντίζουσας Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας.....</b>	<b>24</b>
2.1) Εισαγωγικά Στοιχεία.....	25
2.2) Ιοντίζουσα Ακτινοβολία.....	27
2.2.1) Ιστορική Εξέλιξη.....	27
2.2.2) Τι είδους ακτινοβολίες είναι οι ιοντίζουσες?.....	28
2.2.3) Ποσότητες-Μεγέθη ιοντίζουσας ακτινοβολίας.....	28
2.2.4) Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας & ακτινοπροστασίας.....	33
2.2.5) Φορείς εξασφάλισης ραδιολογικής προστασίας.....	34
2.2.6) Αλληλεπίδραση με την βιολογική ύλη.....	35
<b>Κεφάλαιο 3: Ραδιενέργεια και Περιβάλλον.....</b>	<b>38</b>
3.1) Η Ραδιενέργεια στη Φύση.....	39
3.1.1) Εισαγωγικά Στοιχεία.....	39
3.1.2) Πηγές Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος.....	40
3.1.3) Φυσικά Ραδιονουκλίδια.....	47
3.1.3.1) Λιθογενή (terrigenous) Ραδιονουκλίδια.....	47
3.1.3.2) Κοσμογενή (cosmogenic) Ραδιονουκλίδια.....	49
3.1.4) Τεχνητής προέλευσης Ραδιονουκλίδια.....	50
3.2) Ραδιοικολογία (Radioecology).....	53

3.2.1) Εισαγωγικά Στοιχεία.....	53
3.2.2) Συμπεριφορά των Ραδιονουκλιδίων στα Οικοσυστήματα.....	55
3.2.3) Ραδιενέργεια Υγρού-Υδάτινου Περιβάλλοντος (Aquatic Environment).....	56
3.2.4) Ραδιενέργεια Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environment).....	58
3.2.4.1) Αβιοτικά Στοιχεία.....	58
3.2.4.2) Τα Φυσικά Ραδιονουκλίδια στο Θαλάσσιο Περιβάλλον.....	64
3.2.4.3) Το <sup>137</sup> Cs στο Θαλάσσιο Περιβάλλον.....	66
3.2.5) Θαλάσσιοι Οργανισμοί (Ιχθείς).....	73

## **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

<b>Κεφάλαιο 4: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία με τη χρήση συμβατικών εξισώσεων.....</b>	<b>78</b>
4.1) Εισαγωγικά Στοιχεία.....	79
4.2) Ρυθμός εξωτερικής δόσης σε άπειρο (ή ημιάπειρο) ομοιογενή χώρο.....	81
4.2.1) Ομοιογενής ραδιενεργός χώρος γεωμετρίας 4π.....	81
4.2.2) Δύο ημιάπειροι ομοιογενείς χώροι, εκ των οποίων ο ένας ραδιενεργός-Γεωμετρία 2π.....	83
4.2.3) Δύο ημιάπειροι ομοιογενείς ραδιενεργοί χώροι - Γεωμετρία 2π(A)+2π(B).....	84
4.3) Εξισώσεις υπολογισμού ρυθμού δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον.....	85

**Κεφάλαιο 5: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου RESRAD-BIOTA.....88**

5.1) Εισαγωγικά Στοιχεία.....89

5.2) Ο κώδικας RESRAD.....92

5.3) Ο κώδικας RESRAD-BIOTA.....95

5.3.1) Εισαγωγικά Στοιχεία.....95

5.3.2) Μεθοδολογία RESRAD-BIOTA (Για υδάτινους οργανισμούς).....98

5.3.2.1) Συντελεστές ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης (EXTERNAL DOSE CONVERSION FACTORS (DCFs)).....100

5.3.2.2) Οι DCFs εξωτερικής έκθεσης στον RESRAD-BIOTA.....105

5.3.3) Βήμα προς βήμα απεικονιστική παρουσίαση του RESRAD-BIOTA.....107

5.3.3.1) Εισαγωγή δεδομένων και μετρήσεων στο μοντέλο RESRAD-BIOTA.....107

5.3.3.2) Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο μοντέλο RESRAD-BIOTA.....116

**Κεφάλαιο 6 : Βασικές παράμετροι για τον συγκριτικό υπολογισμό του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε  $2\pi(A)+2\pi(B)$  και  $4\pi$  γεωμετρία στο Θαλάσσιο Περιβάλλον με συμβατικές εξισώσεις και το RESRAD-BIOTA.....120**

6.1) Υπολογισμός ενεργειακών αθροισμάτων  $\sum_i I_i E_{v_i}$  .....121

6.2) Συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον.....130

6.2.1) Εισαγωγικά Στοιχεία.....130

6.2.2) Συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιονουκλιδίων στο θαλασσινό νερό.....	131
6.2.3) Συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιονουκλιδίων στο ίζημα .....	134
6.2.4) Συγκεντρώσεις του <sup>137</sup> Cs στο Θαλάσσιο Περιβάλλον.....	137
6.3) Συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον ανάλογα με τους μελετηθέντες οργανισμούς.....	142
<b>Κεφάλαιο 7: Συγκριτικός υπολογισμός ρυθμού εξωτερικής έκθεσης σε 2π(A)+2π(B) και 4π γεωμετρία στο θαλάσσιο περιβάλλον μέσω συμβατικών εξισώσεων και του RESRAD-BIOTA.....</b>	<b>147</b>
7.1) Ρυθμός εξωτερικών δόσεων φυσικής και τεχνητής ραδιενέργειας (Μέσω συμβατικών εξισώσεων).....	148
7.1.1) Για τα φυσικά ραδιονουκλίδια.....	149
7.1.2) Για το <sup>137</sup> Cs.....	151
7.1.3) Παράδειγμα υπολογισμού ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης με τη χρήση συμβατικών εξισώσεων.....	152
7.2) Ρυθμός εξωτερικών δόσεων φυσικής και τεχνητής ραδιενέργειας (Μέσω του κώδικα RESRAD-BIOTA).....	154
7.2.1) Σχέση μήκους θαλάσσιου οργανισμού και υπολογιζόμενου ρυθμού εξωτερικής δόσης από τον RESRAD-BIOTA.....	155
7.2.1.1) Ταξινόμηση διαγραμμάτων γραμμικής παλινδρόμησης ανά ραδιονουκλίδιο.....	157
7.2.1.2) Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης ανά ενδιαίτημα οργανισμού.....	164

7.2.2) Υπολογισμός του μέγιστου και ελάχιστου ρυθμού εξωτερικής δόσης των μελετηθέντων θαλάσσιων οργανισμών μέσω του RESRAD-BIOTA.....	170
7.3) Συγκριτική μελέτη αποτελεσμάτων ρυθμού εξωτερικής δόσης με τη χρήση συμβατικών εξισώσεων και του κώδικα RESRAD-BIOTA.....	176
7.3.1) Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.....	179
7.3.2) Εκτίμηση της ραδιολογικής επιβάρυνσης του θαλάσσιου οικοσυστήματος με βάση την κλίμακα Polikarpon.....	187
7.3.2.1) Εκτίμηση ολικής εξωτερικής δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας.....	187
7.3.2.2) Εκτίμηση εξωτερικής δόσης από το <sup>137</sup> Cs.....	189
7.4) Βασικά συμπεράσματα συγκριτικής μελέτης.....	190
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'.....	193
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>198</b>

## **ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ - ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ**

---

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία που δέχονται θαλάσσιοι οργανισμοί των τριών βασικών ενδαιτημάτων του θαλάσσιου περιβάλλοντος, που ζουν και τρέφονται στο Αιγαίο από τα ραδιονουκλίδια του περιβάλλοντός τους, με πραγματικές τιμές συγκέντρωσης ενεργότητας. Τα ραδιονουκλίδια ενδιαφέροντος είναι από την οικογένεια των φυσικών το  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  και από τα τεχνητής προέλευσης το  $^{137}\text{Cs}$ .

Η υλοποίηση των μετρήσεων γίνεται συγκριτικά, με τη χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων. Η πρώτη αφορά σε συμβατικές εξισώσεις υπολογισμού ρυθμού εξωτερικής δόσης σε άπειρο ομοιογενή ραδιενεργό χώρο γεωμετρίας  $4\pi$  και σε δύο ημιάπειρους ομοιογενείς ραδιενεργούς χώρους γεωμετρίας  $2\pi(A)+2\pi(B)$ . Η δεύτερη γίνεται μέσω του δοσιμετρικού κώδικα υπολογισμού δόσης (εσωτερικής και εξωτερικής) σε χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα, του RESRAD-BIOTA.

Η εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό. Το θεωρητικό μέρος περιλαμβάνει όλα εκείνα τα στοιχεία που θα αποτελέσουν το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση της συγκριτικής μεθόδου που ακολουθεί. Πιο συγκεκριμένα:

- Το 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αποτελεί μία εισαγωγή στην πυρηνική φυσική και πιο συγκεκριμένα στις ιδιότητες των ασταθών πυρήνων και την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας γάμμα με την ύλη.
- Το 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αφορά τις ιδιότητες της ιοντίζουσας ακτινοβολίας και τα βασικά μεγέθη δοσιμετρίας και ακτινοπροστασίας.
- Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική θεωρητική παρουσίαση του τομέα της Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος και πιο συγκεκριμένα της επιστήμης της Ραδιοοικολογίας. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται η συμπεριφορά των ραδιονουκλιδίων στα αβιοτικά και βιοτικά στοιχεία του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Ακόμη γίνεται η κατηγοριοποίηση των

θαλάσσιων οργανισμών ανάλογα με το ενδιαίτημά τους σε βενθικούς, επιβενθικούς και πελαγικούς.

Το πειραματικό μέρος αποτελεί την σταδιακή υλοποίηση της συγκριτικής μελέτης και πιο συγκεκριμένα:

- Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος των εξισώσεων υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε τρεις διαφορετικές γεωμετρίες (  $4\pi$ ,  $2\pi$  &  $2\pi(A)+2\pi(B)$  ), ενώ γίνεται η προσαρμογή τους στις τρεις κατηγορίες διαβίωσης των θαλάσσιων οργανισμών και ανά ραδιονουκλίδιο μελέτης.
- Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του δοσιμετρικού κώδικα RESRAD-BIOTA, με αναλυτική επεξήγηση και παρουσίαση των προκαθορισμένων παραμέτρων του και των βημάτων που υλοποιεί για την τελική εύρεση των ρυθμών των εξωτερικών δόσεων. Ακόμη δίδεται απεικονιστική, βήμα προς βήμα, εισαγωγή των δεδομένων και εξαγωγή των αποτελεσμάτων.
- Μετά την ανάλυση και των δύο μεθόδων, στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράμετροι υπολογισμού και πιο συγκεκριμένα οι πραγματικές συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων μελέτης που είναι κοινές και στις δύο μεθόδους, και οι ενέργειες εκπομπής- $\gamma$  που θα χρησιμοποιηθούν στις συμβατικές εξισώσεις.
- Στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που βρέθηκαν και με τις δύο μεθόδους ξεχωριστά, ενώ γίνεται και η τελική σύγκριση. Ακόμη αξιολογείται και η ραδιοοικολογική επιβάρυνση των αποτελεσμάτων μέσω της μεθόδου Polikarpon, ενώ παρατίθενται και τα τελικά συμπεράσματα της μελέτης.

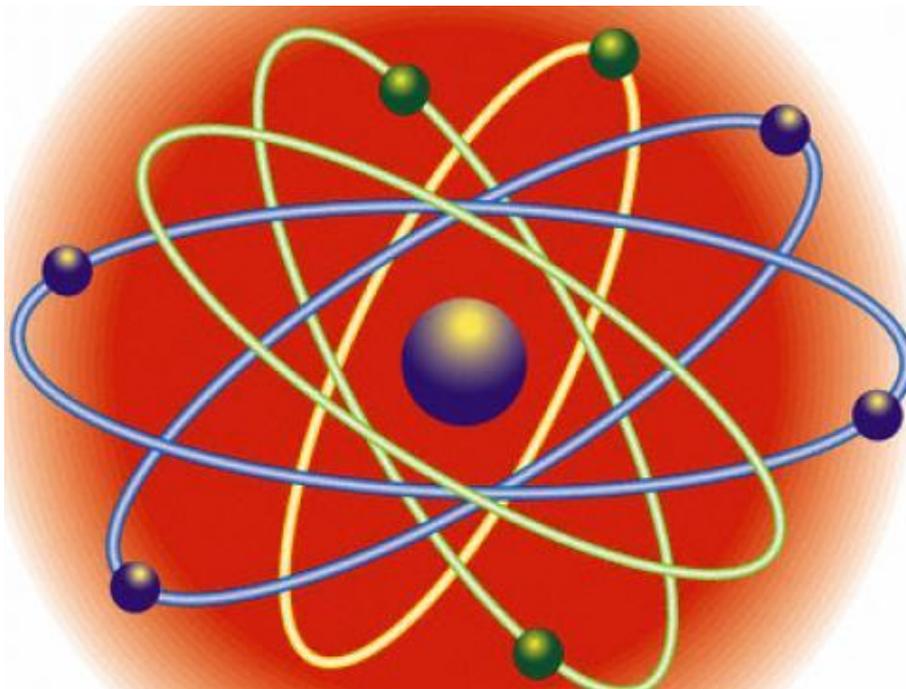
Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση δύο μεθόδων υπολογισμού εξωτερικής δόσης, υπό το καθεστώς των ίδιων περιβαλλοντικών και ραδιολογικών συνθηκών με σκοπό:

- ✓ Την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις αιτιάσεις σε περίπτωση απόκλισης των αποτελεσμάτων του ρυθμού εξωτερικής δόσης μέσω των δύο μεθόδων.
- ✓ Την παρουσίαση και εκμάθηση του τρόπου υπολογισμού δόσεων μέσω του σύγχρονου δοσιμετρικού μοντέλου RESRAD-BIOTA.
- ✓ Την αξιολόγηση του μοντέλου, μέσω των αποτελεσμάτων που εξάγει, αλλά και του τρόπου λειτουργίας του.
- ✓ Την μελέτη της συμπεριφοράς και κατανομής των ραδιονουκλιδίων στα αβιοτικά στοιχεία του θαλάσσιου περιβάλλοντος.
- ✓ Την επιβάρυνση των θαλασσών του Αιγαίου μέσω της ραδιολογικής εκτίμησης των αποτελεσμάτων. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίδεται στο τεχνητό Cs-137 και στην συνεισφορά του στην ολική δόση.

## ***ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ***

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ*

### *Στοιχεία πυρηνικής φυσικής*



## 1.1. ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑ

---

### 1.1.1. Ραδιενέργεια

Όσο αυξάνει ο ατομικός αριθμός, αυξάνεται και ο αριθμός των πρωτονίων στον πυρήνα. Η αύξηση αυτή του  $Z$  προκαλεί αύξηση των απωστικών δυνάμεων Coulomb μεταξύ των πρωτονίων, με αποτέλεσμα να χρειάζονται περισσότερα νετρόνια για να διατηρήσει τη σταθερότητά του ο πυρήνας. Για  $Z > 82$  οι απωστικές δυνάμεις δεν αντισταθμίζονται με την προσθήκη νετρονίων, γι' αυτό και τα στοιχεία με  $Z > 82$  σχηματίζουν ασταθείς πυρήνες. Οι ασταθείς πυρηνικές καταστάσεις στη φύση, αποδιηγείρονται σε σταθερότερα πυρηνικά συστήματα, με την ταυτόχρονη απελευθέρωση ενέργειας. Αυτή η εκπεμπόμενη ενέργεια δύναται να είναι είτε σωματιδιακής είτε ηλεκτρομαγνητικής φύσεως.

**Ραδιενεργός διάσπαση** ονομάζεται η μετατροπή ενός ασταθούς φυσικού πυρήνα σε κάποιο άλλο, χωρίς καμία εξωτερική διέγερση. Η ραδιενεργός διάσπαση συνοδεύεται από ταυτόχρονη εκπομπή σωματιδίων ή και μετάβαση από κάποια στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη με ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίων. Ο ακριβής τύπος της ραδιενεργού διάσπασης, η οποία θα συμβεί, εξαρτάται από τον τύπο της πυρηνικής αστάθειας, δηλαδή από το εάν το ποσοστό των νετρονίων/πρωτονίων είναι πολύ υψηλό ή πολύ χαμηλό.

Αυτή λοιπόν η χαρακτηριστική ιδιότητα των ασταθών πυρήνων να αποβάλλουν ενέργεια και μάζα, μέχρι να προκύψει ένας σταθερής δομής πυρήνας, καλείται **ενεργότητα ή ραδιενέργεια (radioactivity)**. Τα ισότοπα με ασταθείς πυρήνες ονομάζονται **ραδιενεργά ισότοπα ή ραδιοϊσότοπα ή ραδιονουκλίδια**.

Αν μια ποσότητα υλικού περιέχει ένα μόνο είδος ραδιενεργών πυρήνων και  $N(t)$  είναι ο συνολικός αριθμός των πυρήνων αυτών, τότε η ραδιενέργεια  $A(t)$  της ποσότητας είναι:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{σχέση 1.1})$$

όπου:  $A_0=A(0)$  και  $\lambda$  η συνολική σταθερά διάσπασης.

Αν η ποσότητα υλικού περιέχει περισσότερα από ένα είδη ραδιενεργών πυρήνων, η ραδιενέργεια της συγκεκριμένης ποσότητας προκύπτει από το άθροισμα όλων των ραδιενεργών πυρήνων που περιέχονται σε αυτή.

### 1.1.2. Χρόνος υποδιπλασιασμού – Μέσος χρόνος ζωής

Αν σε χρόνο  $t=0$  υπάρχουν  $N_0$  πυρήνες στο ραδιενεργό δείγμα τότε ο συνολικός αριθμός των πυρήνων που παραμένουν μετά από χρόνο  $t$  θα είναι:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{σχέση 1.2})$$

όπου  $\lambda$  η σταθερά διάσπασης.

Ο μέσος χρόνος ζωής ενός ασταθούς πυρήνα ορίζεται ως:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t dN}{\int_0^{\infty} dN} = \frac{\int_0^{\infty} t \frac{dN}{dt} dt}{\int_0^{\infty} \frac{dN}{dt} dt} = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{σχέση 1.3})$$

Συνεπώς η σχέση 1.2 διαμορφώνεται ως:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{σχέση 1.4})$$

Ο χρόνος που απαιτείται για να αποδιεγερθούν οι μισοί από τους πυρήνες στο αρχικό δείγμα, ονομάζεται *χρόνος ημιζωής* ή *χρόνος υποδιπλασιασμού*. Από τη σχέση 1.4 ο χρόνος ημιζωής  $T_{1/2}$  υπολογίζεται ακολούθως:

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\frac{T_{1/2}}{\tau}} \Leftrightarrow T_{1/2} = (\ln 2)\tau = 0,693\tau \quad (\text{σχέση 1.5})$$

Οι μέσοι χρόνοι ζωής που χαρακτηρίζουν ασταθή πυρηνικά συστήματα καλύπτουν πολλές τάξεις μεγέθους.

### 1.1.3. Τρόποι Ραδιενεργού Διάσπασης

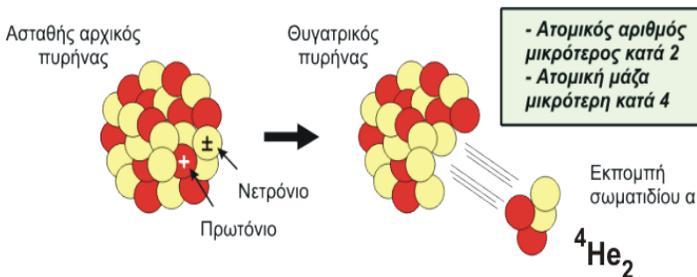
Ορισμένα άτομα είναι ασταθή, δηλαδή οι πυρήνες τους έχουν την τάση να αλλάζουν αυθόρμητα τη δομή τους μέχρι να προκύψει ένας σταθερής δομής πυρήνας. Κατά τη διάρκεια αυτής της αλλαγής εκπέμπουν ακτινοβολία. Οι τρεις συνηθέστεροι τρόποι ραδιενεργού διασπάσεως είναι η διάσπαση-α, από την οποία παράγονται σωματίδια-α (ακτινοβολία-α), η διάσπαση-β (β- ή β+ διάσπαση), από την οποία παράγονται σωματίδια-β (ακτινοβολία-β) και η διάσπαση-γ, όπου παράγονται ακτίνες-γ (ακτινοβολία-γ).

#### 1.1.3.1. Η διάσπαση-α:

Η εκπομπή σωματιδίων άλφα παρατηρείται στην πυρηνική φυσική όταν ένας ασταθής πυρήνας εκπέμπει ένα σωματίδιο άλφα για να οδηγηθεί έτσι σε μεταστοιχείωσή του σε κάποιο ελαφρύτερο (Εικόνα 1.1). Η "επιλογή" της απελευθέρωσης σωματιδίων άλφα και όχι κάποιου

άλλου ελαφρύτερου πυρήνα, οφείλεται στο ότι το σωματίδιο άλφα έχει μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο, σε σύγκριση με τους άλλους ελαφρείς πυρήνες. Έτσι, ο βαρύν πυρήνας για να οδηγηθεί σε σταθερότερη ενεργειακά κατάσταση, αποβάλλει ένα σωματίδιο άλφα και

#### A. ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ α



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση εκπομπής-α [geo.auth web].

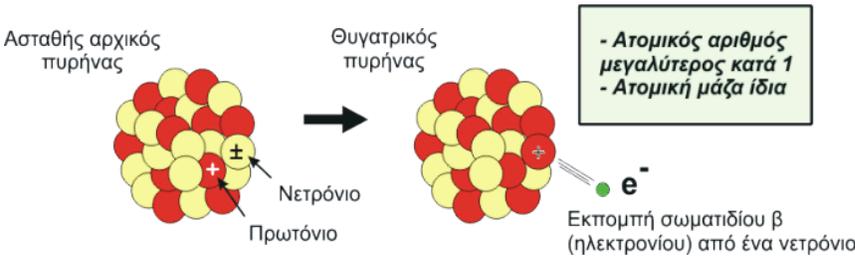
μεταστοιχειώνεται σε ελαφρύτερο και συνεπώς ενεργειακά ευσταθέστερο πυρήνα.

Η ακτινοβολία σωματιδίων άλφα μπορεί να κατευθυνθεί εύκολα εξαιτίας του θετικού ηλεκτρικού φορτίου. Εντούτοις, τα σωματίδια άλφα χαρακτηρίζονται από μικρή διεισδυτικότητα, με μία μέση διαδρομή μόνο μερικά cm στον αέρα μέχρι να ακινητοποιηθούν.

### 1.1.3.2. Η διάσπαση-β:

Η διάσπαση-β (Εικόνα 1.2) είναι η πυρηνική αντίδραση η οποία γίνεται με την ασθενή αλληλεπίδραση και κατά την οποία ο μαζικός αριθμός (A) του νουκλιδίου παραμένει σταθερός, ενώ ο ατομικός αριθμός του (Z) μεταβάλλεται. Εκπομπές σωματιδίων-β επιτυγχάνονται όταν το ποσοστό των νετρονίων-πρωτονίων στον πυρήνα είναι πολύ υψηλό. Η περίσσεια νετρονίων μετασχηματίζεται σε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Το πρωτόνιο παραμένει στον πυρήνα ενώ το ηλεκτρόνιο εκπέμπεται. Αυτή η διαδικασία μειώνει τον αριθμό των νετρονίων και αυξάνει τον αριθμό των πρωτονίων κατά ένα, συνεπώς ο πυρήνας μεταστοιχειώνεται. Αρκετές φορές η εκπομπή-β συνδυάζεται με την εκπομπή γ- ακτινοβολίας, καθώς η περίσσεια ενέργειας στον πυρήνα απελευθερώνεται υπό τη μορφή γ-ακτινοβολίας.

#### Β. ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ β



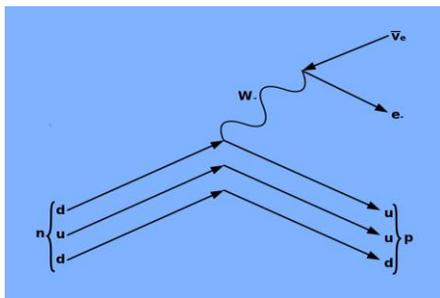
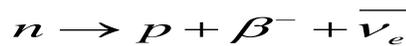
Εικόνα 1.2: Απεικόνιση εκπομπής-β [geo.auth web]

Ορισμένα ραδιονουκλίδια που μας δίνουν διάσπαση-β είναι:  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  κ.α.

Διακρίνονται τρεις τρόποι διάσπασης-β:

➤ **η διάσπαση-β<sup>-</sup>**: κατά την οποία ο μητρικός πυρήνας  $^A_Z\text{X}$  μεταστοιχειώνεται

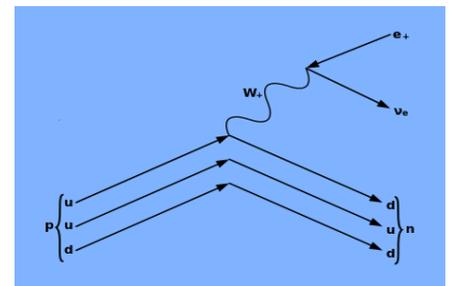
στον θυγατρικό πυρήνα  $^A_{Z+1}\text{Y}$  εκπέμποντας ένα ηλεκτρόνιο  $e^-$  και ένα αντινεutrino (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3: Διάγραμμα Feynman της β<sup>-</sup> διάσπασης [Wikipedia web]

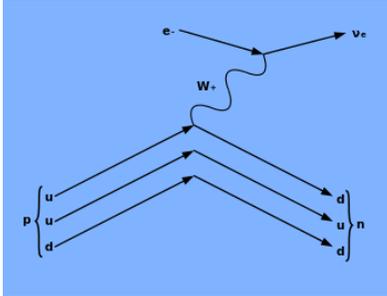
οποία ο μητρικός πυρήνας  $^A_Z\text{X}$  μεταστοιχειώνεται

➤ **η διάσπαση-β<sup>+</sup>**: κατά την



Εικόνα 1.4: Διάγραμμα Feynman της β<sup>+</sup> διάσπασης [Wikipedia web]

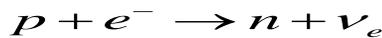
στον θυγατρικό  ${}^A_{Z-1}Y$  εκπέμποντας ένα ποζιτρόνιο  $e^+$  και ένα νεutrίνο (Εικόνα 1.4).



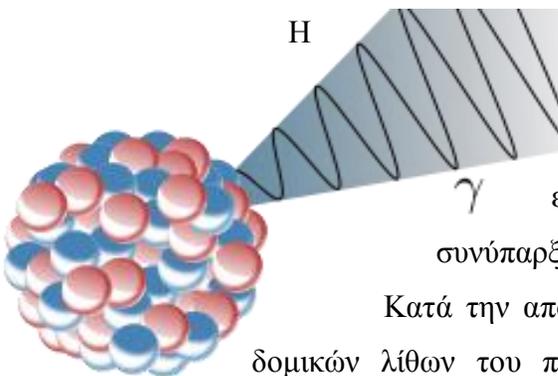
Εικόνα 1.5: Διάγραμμα Feynman της σύλληψης ηλεκτρονίου [Wikipedia web]



➤ **η σύλληψη ηλεκτρονίου:** είναι ένας τρόπος διάσπασης-β κατά τον οποίο ένα ηλεκτρόνιο των ατομικών τροχιακών συλλαμβάνεται από ένα διεγερμένο πυρήνα εκπέμποντας ακτίνες-X ή ηλεκτρόνια Auger και νεutrίνο (Εικόνα 1.5).



### 1.1.3.3. Η αποδιέγερση-γ:



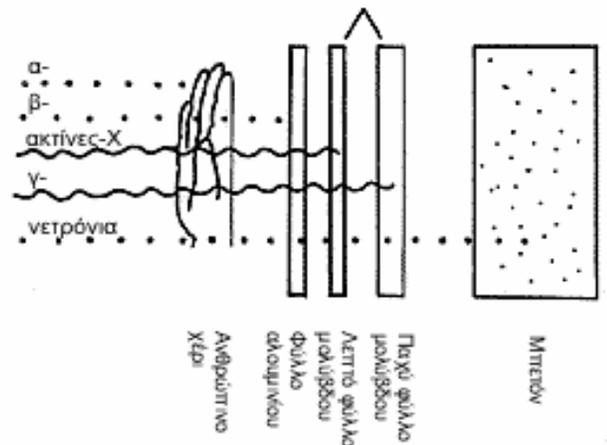
αποδιέγερση-γ (Εικόνα 1.6) αφορά την ηλεκτρομαγνητική αποδιέγερση ενός πυρήνα προς μία κατώτερη ενεργειακή στάθμη, εάν δεν είναι δυνατή η αποβολή ενέργειας με εκπομπή νουκλεονίου ή σωματίου-α. Είναι δυνατή η συνύπαρξη με αποδιέγερση-β.

Κατά την αποδιέγερση-γ το φορτίο, το ρεύμα και μαγνητική ροπή των δομικών λίθων του πυρήνα μπορεί να

Εικόνα 1.6: Απεικόνιση γ- εκπομπής [geo.auth web]

αλληλεπιδράσουν με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μέσω δύο διαφορετικών μηχανισμών. Κατά τον πρώτο, η αποδιέγερση πραγματοποιείται με την άμεση εκπομπή ενός φωτονίου, που μεταφέρει την κατάλληλη ενέργεια, ορμή και στροφορμή που απαιτούν οι κανόνες διατήρησης για τη σύνδεση μεταξύ αρχικής και τελικής κατάστασης. Κατά το

δεύτερο μηχανισμό, η αλληλεπίδραση πραγματοποιείται



Εικόνα 1.7: Διαπερατότητα ραδιενεργών ακτίνων α,β,γ [Wikipedia web]

μέσω του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ενός ηλεκτρονίου στην άμεση γειτονία του πυρήνα, μεταφέροντας την κατάλληλη ενέργεια, ορμή και στροφορμή (εσωτερική μετατροπή).

Τα σωματίδια-γ έχουν περίπου 1000 φορές μεγαλύτερη ενέργεια από τα φωτόνια του ορατού φωτός. Δεν έχουν μάζα ούτε ηλεκτρικό φορτίο. Εξαιτίας της μεγάλης τους ενέργειας κινούνται με την ταχύτητα του φωτός και μπορούν να διανύσουν εκατοντάδες χιλιάδες μέτρα πριν ξοδέψουν την ενέργεια αυτή. Έχουν μεγάλη διεισδυτικότητα, διαπερνώντας πολλά είδη υλικών, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπινου ιστού. Για την θωράκιση από αυτά χρησιμοποιούνται πολύ πυκνά υλικά όπως ο μόλυβδος (Εικόνα 1.7).

## **1.2. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΑΜΜΑ ΜΕ ΤΗΝ ΎΛΗ**

---

Όταν ένα φωτόνιο γ-ακτινοβολίας αλληλεπιδρά με την ύλη δύναται να παρουσιάσει τα ακόλουθα φαινόμενα:

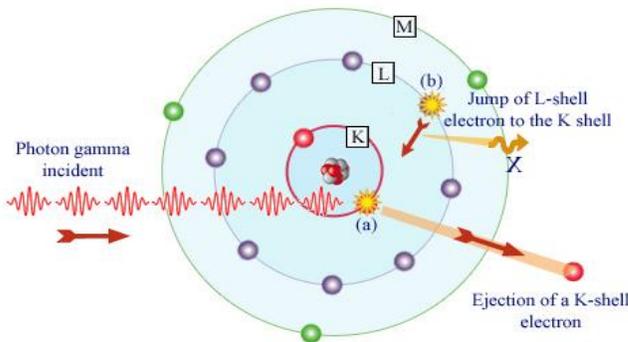
- ✓ να χάσει ένα μέρος της ενέργειάς του
- ✓ να σταματήσει και να απορροφηθεί πλήρως διανύοντας συνολικά μία απόσταση που ονομάζεται διάστημα εμβέλειας (range)
- ✓ να αποκλίνει της αρχικής του διεύθυνσης, χωρίς να αλλάξει η ενέργειά του

Επομένως διακρίνονται δύο μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη, εκείνος της μεταφοράς ενέργειας από το σωματίο στην ύλη και εκείνος της αλλαγής κατεύθυνσης των φωτονίων όταν εισέρχονται σε ένα άτομο και αλληλεπιδρούν με αυτό. Συνοπτικά οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη διαχωρίζονται στην **απορρόφηση** και στη **σκέδαση**. Πρέπει λοιπόν να γίνει κατανοητό πως όταν ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με την ύλη, ένα μέρος της ενέργειάς του απορροφάται και το υπόλοιπο παραμένει ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαμηλότερης ενέργειας, όπου στη συνέχεια μπορεί να σκεδαστεί ή να μεταφέρει και άλλο μέρος της ενέργειάς του μέχρι να σταματήσει τελείως. Συνεπώς το φαινόμενο της **εξασθένισης της δέσμης** είναι μόνιμο στις αλληλεπιδράσεις αυτές. Σε αντίθεση με τα φορτισμένα σωματίδια που λίγο πολύ διαγράφουν καθορισμένες τροχιές μέσα στον απορροφητή, οι ακτίνες-γ δεν έχουν καθορισμένες τροχιές αλλά παρουσιάζουν μια χαρακτηριστική εκθετική απορρόφηση. Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας-γ με την ύλη είναι τελείως διαφορετική από εκείνη των φορτισμένων σωματίων, τα οποία χάνουν την ενέργειά

τους λόγω κυρίως αλληλεπιδράσεων με τα ατομικά ηλεκτρόνια. Η απώλεια ενέργειας των φορτισμένων σωματιών γίνεται σταδιακά, σαν αποτέλεσμα πολλών κρούσεων, που σε κάθε ένα τμήμα της αρχικής ενέργειας απορροφάται. Σε μια δέσμη ακτίνων-γ, κάθε φωτόνιο, τυχαία και ανεξάρτητα, απομακρύνεται από τη δέσμη σαν αποτέλεσμα ενός απλού γεγονότος. Τρεις κυρίως είναι οι μηχανισμοί οι υπεύθυνοι για την απορρόφηση της γ ακτινοβολίας:

### 1.2.1. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Photoelectric effect)

(επικρατεί για ενέργειες-γ από 100 keV έως 500 keV)



Εικόνα 1.8: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (σηματική απεικόνιση) [laradioactive web]

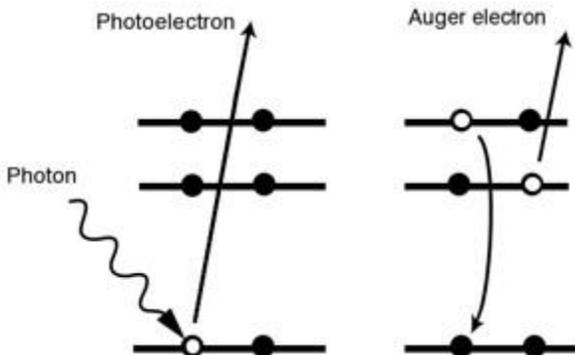
Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αναφέρεται στην ολική μετατροπή της ενέργειας  $E_\gamma$  του φωτονίου με την εκπομπή ενός ατομικού  $e^-$  από τον εσωτερικό φλοιό ενός ατόμου (Εικόνα 1.8).



Το παραγόμενο φωτοηλεκτρόνιο έχει κινητική ενέργεια:

$$K = E_\gamma - \Phi \quad (\text{σχέση 1.6})$$

όπου  $\Phi$  η ενέργεια σύνδεσης, η οποία είναι διαφορετική για την εκάστοτε ατομική στιβάδα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την φωτοηλεκτρική διαδικασία είναι ότι  $E_\gamma \geq \Phi$ ,



Εικόνα 1.9: Σηματική απεικόνιση εκπομπής ηλεκτρονίου Auger. [desy.cfel web]

δημιουργώντας τα λεγόμενα βυθίσματα απορρόφησης. Αυτά ερμηνεύτηκαν ποσοτικά από τον James το 1967 με την εισαγωγή της έννοιας της «ισχύος του ταλαντωτή», που εξαρτάται από την ενέργεια  $E_\gamma$  και τον ατομικό αριθμό  $Z$  και εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$\tau \propto Z^\alpha E_\gamma^{-\beta} \quad (\text{σχέση 1.7})$$

όπου η τιμή του  $\alpha$  βρίσκεται μεταξύ των τιμών 4 και 5, ενώ η τιμή του  $\beta$  είναι περίπου 3. Παρατηρείται η έντονη

εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης  $\tau$  από τον ατομικό αριθμό  $Z$  του υλικού και αντίστροφη εξάρτηση της ενέργειας του φωτονίου. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το

φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι σημαντικό για χαμηλές ενέργειες (μικρό  $E$ ) και βαριά στοιχεία (μεγάλο  $Z$ ).

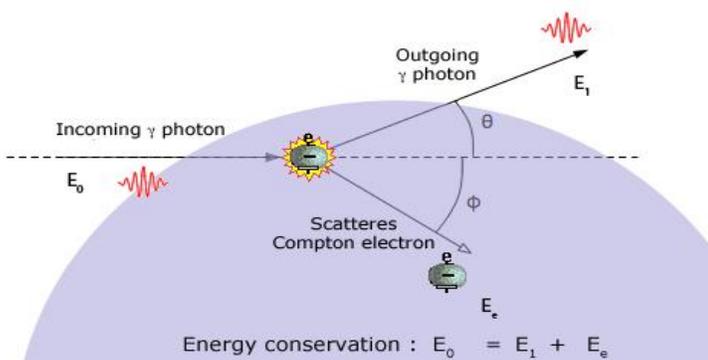
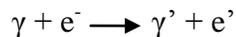
Το κενό που δημιουργείται μετά την εκπομπή του φωτοηλεκτρονίου καλύπτεται από άλλο ηλεκτρόνιο προερχόμενο από ανώτερο ατομικό φλοιό, οδηγώντας σε δύο εναλλασσόμενους μηχανισμούς:

- ✓ *Φθορισμός ακτίνων - X* : παράγονται δευτερεύουσες ακτίνες-X και το φορτίο του εναπομείναντος ιόντος παραμένει αμετάβλητο.
- ✓ *Φαινόμενο Auger (Εικόνα 1.9)* : το φωτόνιο που εκπέμπεται από την αντικατάσταση του κενού που είχε δημιουργηθεί από το φωτοηλεκτρόνιο μπορεί να απορροφηθεί από κάποιο άλλο ηλεκτρόνιο του ίδιου ατόμου με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα νέο φωτοηλεκτρόνιο (ηλεκτρόνιο Auger), αφήνοντας ένα νέο κενό. Δηλαδή το αρχικό κενό αντικαθίσταται από δύο κενά. Τα νέα κενά καλύπτονται από μεταπτώσεις ηλεκτρονίων από μεγαλύτερους φλοιούς μέχρι το ιονισμένο άτομο να βρεθεί στην κατάσταση όπου δεν μπορούν να συμβούν άλλες μεταπτώσεις.

### 1.2.2. Σκέδαση Compton (Compton scattering)

(επικρατεί για ενέργειες των  $\gamma$  από 100 keV έως 1,0 MeV)

Το φαινόμενο Compton (Εικόνα 1.10) περιγράφει τη σκέδαση ενός φωτονίου από ένα ελεύθερο ατομικό ηλεκτρόνιο.



Το φωτόνιο μετά τη σκέδαση δεν εξαφανίζεται, αλλά αλλάζει κατεύθυνση και ενέργεια. Μάλιστα μέρος της ενέργειάς του μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο, το οποίο μετά τη σκέδαση ονομάζεται «ανακλώμενο ηλεκτρόνιο» (recoil).

Εικόνα 1.10: Φωτόνιο μήκους κύματος  $\lambda$  έρχεται από αριστερά, σκεδάζεται στον εν ηρεμία ηλεκτρόνιο-στόχο και ένα νέο φωτόνιο μήκους κύματος  $\lambda'$  φεύγει υπό γωνία  $\theta$  προς την ευθεία που ορίζει η αρχική διεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης [radioactivite web].

electron).

Για εισερχόμενο φωτόνιο ενέργειας  $E_\gamma$ , η ενέργεια του σκεδαζόμενου φωτονίου συναρτήσει της γωνίας σκέδασης  $\theta$  είναι η ακόλουθη:

$$E_\gamma' = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}} (1 - \cos \theta) \quad (\text{σχέση 1.8})$$

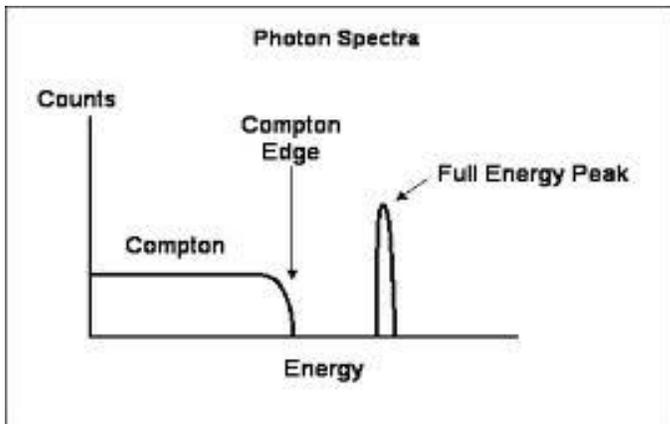
Η κινητική ενέργεια του ανακλώμενου ηλεκτρονίου θα είναι :

$$T = E_\gamma - E_\gamma' \quad (\text{σχέση 1.9})$$

Ο συντελεστής απορρόφησης Compton δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma \sim \rho \frac{N_A}{A} Z f(E_\gamma) \sim \rho \frac{N_A}{A} \left(\frac{A}{2}\right) f(E_\gamma) \sim \rho \frac{N_A}{2} f(E_\gamma) \quad (\text{σχέση 1.10})$$

όπου  $A \sim 2Z$



Εικόνα 1.11: Φάσμα φωτονίων σκέδασης Compton [tarleton.edu web]

Ισχύει ότι:

- 1) Η  $T$  είναι μέγιστη όταν η  $E_\gamma'$  είναι ελάχιστη (δηλ.  $\theta=180^\circ$ )  $\rightarrow$  Compton Edge
- 2) Η  $T$  είναι ελάχιστη όταν η  $E_\gamma'$  είναι μέγιστη (δηλ.  $\theta=0^\circ$ )
- 3) Εάν το φωτόνιο διαφύγει χωρίς ενεργειακές απώλειες προκύπτει συνεχές ενεργειακό φάσμα  $\rightarrow$  Compton Plateau
- 4) Εάν το φωτόνιο υποστεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο έχουμε ολική ενεργειακή εναπόθεση  $\rightarrow$  Full Energy Peak

Από τη σχέση 1.10 συμπεραίνεται ότι η πιθανότητα να συμβεί το φαινόμενο Compton είναι ανεξάρτητη από τον ατομικό αριθμό του υλικού. Οι υποθέσεις που εισήχθησαν στην θεωρητική εξαγωγή της σκέδασης Compton ήταν:

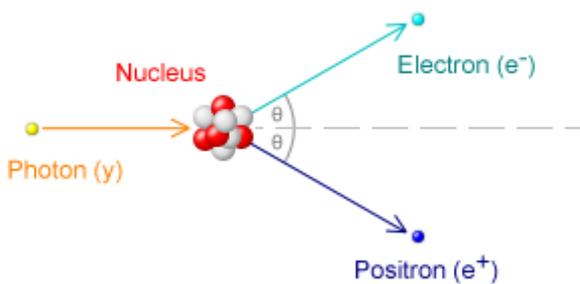
1. Η προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια που δίνεται από τον τύπο του Planck ( $E=h\nu$ ).
2. Τα φωτόνια, όντας σωματίδια, σκεδαζονται από ελαφρώς δέσμια ατομικά ηλεκτρόνια.

3. Τα ηλεκτρόνια κινούνται με σχετικιστικές ταχύτητες.
4. Η ενέργεια και η ορμή πριν και μετά την σκέδαση είναι διατηρούμενες ποσότητες.

### 1.2.3. Δίδυμη Γένεση (Pair Production)

(επικρατεί για ενέργειες-  $\gamma \geq 2m_0c^2 = 1,022MeV$ )

Η δίδυμη γένεση είναι το φαινόμενο της μετατροπής ενός φωτονίου σε ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου, όταν αυτό διέρχεται μέσα από ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο όπως είναι αυτό που σχηματίζεται κοντά στον πυρήνα ενός ατόμου (Εικόνα 1.12). Είναι δηλαδή η διαδικασία όπου:



Εικόνα 1.12: Δημιουργία ζεύγους  $e^+e^-$   
[science.wiki web]

Για να γίνει η παραγωγή του ζεύγους πρέπει η ενέργεια του φωτονίου να είναι τουλάχιστον ίση με την ολική μάζα ηρεμίας των δύο σωματιδίων ( $2 \times 511 \text{ keV}$  στην περίπτωση του ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου), και ότι η κατάσταση επιτρέπει και στην ενέργεια και στην ορμή να διατηρηθούν. Το εκπεμπόμενο ποζιτρόνιο χάνει την ενέργειά του και έλκει ένα ηλεκτρόνιο και εξαϋλώνεται σε δύο φωτόνια με ενέργεια  $511 \text{ keV}$  έκαστο.

Η πιθανότητα (ανά μονάδα μήκους)  $\kappa$  να συμβεί η δίδυμη γένεση ονομάζεται συντελεστής παραγωγής ζεύγους (pair production coefficient) και δίνεται ως συνάρτηση της ενέργειας  $E_\gamma$  και του ατομικού αριθμού  $Z$  υπό τη μορφή:

$$\kappa(m^{-1}) = NZ^2 f(E_\gamma, Z) \quad (\text{σχέση 1.11})$$

Η συνάρτηση  $f$  μεταβάλλεται με την ενέργεια του φωτονίου και αρκετά λιγότερο με τον ατομικό αριθμό. Ακόμη παρατηρείται ότι η  $\kappa$  αυξάνει με την ενέργεια και τον ατομικό αριθμό, έχοντας ως κατώφλι τα  $1022 \text{ keV}$ .

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ*

### *Περί ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας*



## 2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

---

Η ακτινοβολία ως φυσικό φαινόμενο είναι η μετάδοση ενέργειας με εκπομπή. Βασικά μεγέθη για τον χαρακτηρισμό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι η συχνότητα  $\nu$  (σε Hertz), το μήκος κύματος (σε μέτρα) και η ενέργεια φωτονίων  $E$  (σε Joule ή σε ηλεκτρονιοβόλτ, eV). Τα μεγέθη αυτά συνδέονται μεταξύ τους με τις σχέσεις  $c=\lambda\nu$  και  $E=h\nu$ , όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός και  $h$  η σταθερά του Planck.

Όλο το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας χωρίζεται σε δύο περιοχές, την ιοντίζουσα και μη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (Εικόνα 2.1) . Βασικό στοιχείο διαχωρισμού είναι η ικανότητα που έχουν τα φωτόνια της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, όταν απορροφηθούν από την ύλη να προκαλούν ρήξη των χημικών δεσμών στα μόρια και να δημιουργούν ιόντα.

Στην ιατρική φυσική ως όριο μεταξύ της ιοντίζουσας και μη ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας θεωρείται η ενέργεια των φωτονίων που είναι ικανή να ιοντίσει τα άτομα του μορίου του νερού ( $1,978 \cdot 10^{-18}$  Joules ή 12,4eV). Στο πλήρες φάσμα η ενέργεια αυτή βρίσκεται στην υπεριώδη περιοχή του φωτός (UV) με μήκος κύματος 100nm. Η μη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αναφέρεται σε συχνότητες φάσματος μέχρι  $10^{15}$  Hz. Αυτό πρακτικά καλύπτει την περιοχή του φάσματος έως και την υπεριώδη ακτινοβολία. Ένα μέρος όμως της υπεριώδους ακτινοβολίας δεν συμπεριλαμβάνεται στη μη ιοντίζουσα ακτινοβολία, καθώς ακτινοβολίες με μήκος κύματος μικρότερου των 295nm απορροφώνται έντονα από την ατμόσφαιρα χωρίς να παρουσιάζουν μέχρι τώρα ιδιαίτερο βιολογικό ενδιαφέρον, ενώ λίγες είναι και οι πηγές που χρησιμοποιούν τις συχνότητες αυτές (ορισμένα LASER).[Ψαρράκος,10]

Στην συγκεκριμένη εργασία θα μελετηθεί μόνο το κομμάτι που σχετίζεται με την ιοντίζουσα ακτινοβολία.



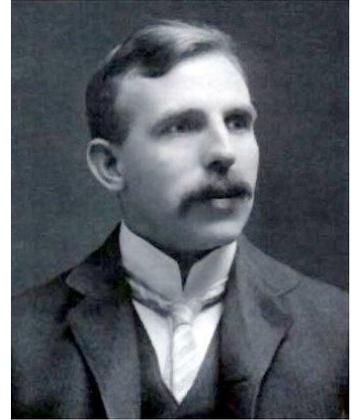
## 2.2. ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### 2.2.1. Ιστορική εξέλιξη



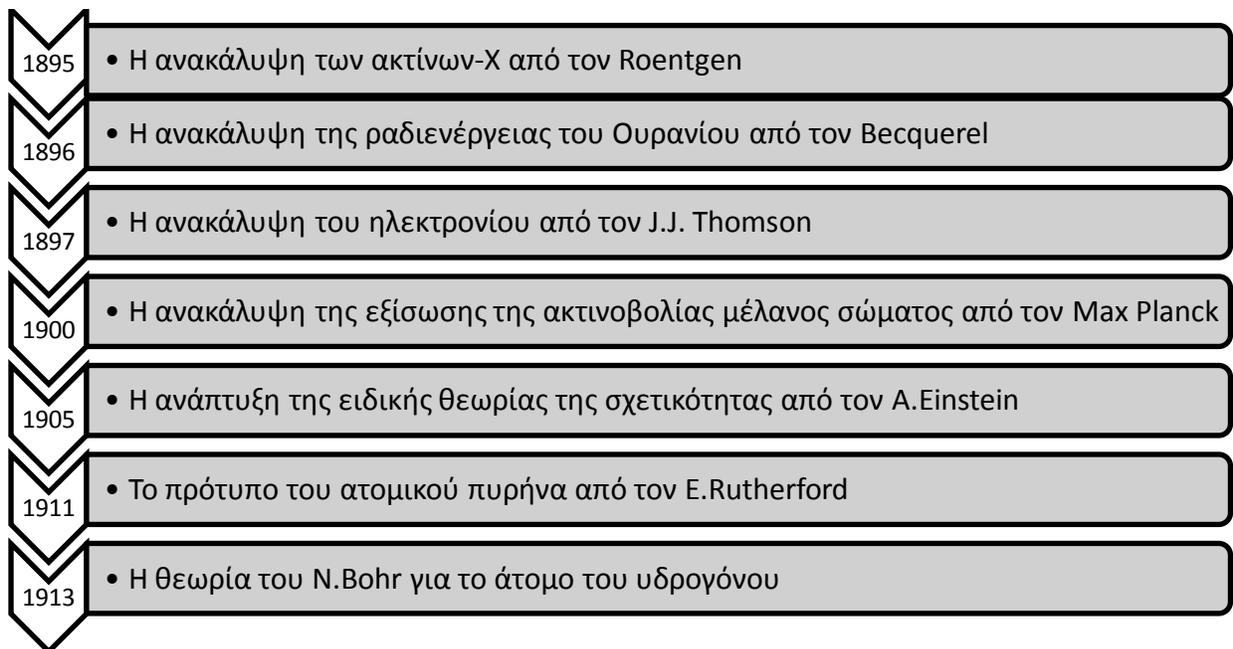
Εικόνα 2.2: Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923)

Το 1930 δημοσιεύεται η κλασική εργασία *Ακτινοβολίες από ραδιενεργά υλικά* των Rutherford, Chadwick και Ellis, όπου αναφέρονται τρεις σημαντικές ανακαλύψεις, σηματοδοτώντας μία νέα εποχή στην επίλυση θεμελιωδών προβλημάτων της φυσικής, σχετικά με τη φύση του ηλεκτρισμού, τη σύσταση και τη συσχέτιση μεταξύ των ατόμων των διαφόρων στοιχείων.



Εικόνα 2.3: Lord Rutherford of Nelson (1871-1937)

Παρακάτω παρουσιάζονται κατά χρονολογική αύξουσα σειρά θεμελιώδη ιστορικά γεγονότα-σταθμοί της σωματιδιακής φυσικής [Γαζής.99]:



### 2.2.2. Τι είδους ακτινοβολίες είναι οι ιοντίζουσες?

Ως ιοντίζουσες, ορίζονται οι ακτινοβολίες που όταν αλληλεπιδράσουν με την ύλη προκαλούν ιοντισμούς. Στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες περιλαμβάνονται οι ακτίνες X, η ακτινοβολία γ, οι σωματιδιακές ακτινοβολίες α (πυρήνες He), β (ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια), τα νετρόνια, τα πρωτόνια, στοιχειώδη σωματίδια που παράγονται στις διαφόρου τύπου πυρηνικές αντιδράσεις, σωματίδια που ανευρίσκονται στην κοσμική ακτινοβολία και προϊόντα πυρηνικής σχάσης. Μπορούν να παραχθούν τεχνητά από τον άνθρωπο, σε ειδικές συσκευές όπως οι σωλήνες X-ακτινοβολίας ή από τις διασπάσεις ραδιενεργών νουκλιδίων. [Βεργαν.89]

Τα *ραδιονουκλίδια* μπορεί να προέρχονται τόσο από τη φύση (φυσικά υλικά του φλοιού της γης, πηγές κοσμικής ακτινοβολίας), όσο και από την ανθρώπινη δραστηριότητα στους τομείς της ατομικής και πυρηνικής ενέργειας.

### 2.2.3. Ποσότητες-Μεγέθη Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας

Για τη μέτρηση των επιπτώσεων της ακτινοβολίας και την προστασία του πληθυσμού και του περιβάλλοντος από την υπέρμετρη ακτινοβόληση, έχει δημιουργηθεί ένας ιδιαίτερος επιστημονικός κλάδος με την ονομασία ακτινοπροστασία. Ένα από τα κύρια αντικείμενα της ακτινοπροστασίας είναι η *δοσιμετρία*, δηλαδή η ποσοτική συσχέτιση των μετρήσεων ενός πεδίου ακτινοβολίας με τις χημικές ή βιολογικές επιπτώσεις σε ζώντες οργανισμούς και ιδιαίτερα στον άνθρωπο.

Οι φυσικές διαστάσεις μίας ραδιενεργού πηγής εξαρτώνται από το μέσο χρόνο ζωής της μετάπτωσης που την προκαλεί. Η έννοια της ειδικής ραδιενέργειας μίας πηγής μάζας  $m$ , υποδηλώνει τη ραδιενέργεια ανά γραμμάριο υλικού της πηγής και δίνεται από η σχέση [Ασημακ.02]:

$$r = \frac{\lambda N}{m} = \frac{1}{\tau} \frac{A_0}{A} \quad (\text{σχέση 2.1})$$

όπου  $\lambda N$ ,  $\tau$  και  $A$  είναι η ολική ραδιενέργεια, ο μέσος χρόνος ζωής και ο μαζικός αριθμός του ραδιοϊσοτόπου αντίστοιχα, ενώ το  $A_0$  ο μαζικός αριθμός του Avogardo.

Τα δυο βασικά μεγέθη για την εκτίμηση των επιπέδων ακτινοβολίας και των αποτελεσμάτων της είναι η *ενεργότητα* (activity) του ραδιενεργού υλικού και η *δόση ακτινοβολίας* (radiation dose). Η ενεργότητα είναι ο αριθμός των διασπάσεων ανά μονάδα χρόνου. Η δόση ακτινοβολίας χρησιμοποιείται με διάφορες επί μέρους έννοιες όπως απορροφούμενη δόση (absorbed dose), ισοδύναμος δόση (dose equivalent), ενεργός ισοδύναμος δόση (effective dose equivalent).

### <sup>1</sup>Απορροφούμενη δόση

(**absorbed dose**) ακτινοβολίας είναι η ενέργεια που μεταδίδεται ανά μονάδα μάζας του απορροφούμενου υλικού. Οι διάφοροι τύποι ακτινοβολίας παρουσιάζουν όμως διαφορετική «σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα» (Relative Biological

Type of radiation, R	Energy range	Quality or weighting factor, $w_R$
Photons, electrons	All energies	1
Neutrons	<10 keV	5
	10–100 keV	10
	100 keV–2 MeV	20
	2–20 MeV	10
	>20 MeV	5
Protons	<20 MeV	5
Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei		20

Πίνακας 2.1: Παράγοντες βάρους ιονίζουσας ακτινοβολίας [nucl.wiki web].

Effectiveness - RBE). Είναι βέβαιο ότι ορισμένα είδη ακτινοβολίας προκαλούν μεγαλύτερη βλάβη

στον βιολογικό ιστό ενός οργανισμού απ'ότι άλλα. Η ICRP θέσπισε ορισμένες τιμές για τον παράγοντα RBE με τις οποίες πολλαπλασιάζονταν οι απορροφούμενες δόσεις για να δώσουν σταθμισμένες δόσεις.[Φλώρου.01]

Η *ισοδύναμη δόση* είχε εισαχθεί για την εκτίμηση των διαφορετικών βιολογικών φαινομένων της ίδιας φυσικής δόσης αριθμητικά από διαφορετικές πηγές-τύπους ακτινοβολιών. Η ισοδύναμη δόση είναι το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης και του παράγοντα ακτινοβολίας  $Q$  σε ένα σημείο του ιστού. Η ICRP (International Commission on Radiological Protection) και η ICRU (International Commission on Radiological Units)

<sup>1</sup> Η διεθνής πρακτική σχετικά με τις ακτινοβολίες είναι η πληροφόρηση σχετικά με την διακινδύνευση του πληθυσμού. Με αυτό ως γνώμονα, η αναφορά στην απορροφούμενη δόση δεν είναι επαρκής. Η ισοδύναμος δόση μας δίνει καλύτερη προσέγγιση.[Φλώρου.01]

διατύπωσαν την άποψη ότι η πιθανότητα να συμβεί ένα μακροπρόθεσμο φαινόμενο (stochastic effect), όπως ο καρκίνος, σχετίζεται όχι μόνο με την απορροφηθείσα δόση, αλλά και την ποιότητα (είδος και ενέργεια) της ακτινοβολίας και το όργανο ή ιστό που ακτινοβολήθηκε.[Παπαστ.10]

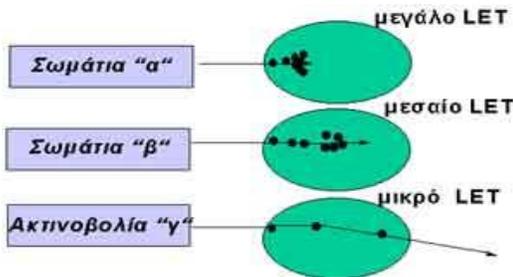
Η **ισοδύναμη δόση (effective dose)**  $H_{T,R}$  σε έναν ιστό T, που οφείλεται σε ένα είδος ακτινοβολίας R, ορίζεται ως η μέση απορροφούμενη δόση  $D_{T,R}$  στον συγκεκριμένο ιστό από τη συγκεκριμένη ακτινοβολία, πολλαπλασιασμένη με τον παράγοντα βάρους της ακτινοβολίας (radiation weighting factor)  $w_R$  (Πίνακας 2.1), που αντικατέστησε τον παράγοντα ποιότητας της ακτινοβολίας (quality factor) Q: [Ασημακ.02, ΕΕΑΕ.11]

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R} \quad (\text{σχέση 2.2})$$

Αν η ακτινοβολία που προσβάλλει το όργανο T περιέχει περισσότερες από μία συνιστώσες (ακτίνες X, ηλεκτρόνια κ.λ.π) με διαφορετικούς ποιοτικούς συντελεστές επικινδυνότητας, η ισοδύναμη δόση δίνεται από το άθροισμα των επιμέρους συνεισφορών.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (\text{σχέση 2.3})$$

Η **Γραμμικά εναποτιθέμενη ενέργεια (linear energy transfer-LET)** καθορίζει την εναπόθεση της ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής της ακτινοβολίας εντός της ύλης..



Η διεισδυτικότητα ενός είδους ακτινοβολίας μέσα σε δεδομένο υλικό είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η μάζα και το φορτίο της ακτινοβολίας. Ειδικότερα και όσον αφορά τη βλαπτικότητα μιας ακτινοβολίας όταν αυτή προσβάλλει ανά

Εικόνα 2.4: Γραμμικά εναποτιθέμενη ενέργεια [Αναγν.11]

ζωντανό κύτταρο, εξαρτάται τόσο από το ποσό της εναποτιθέμενης στο προσβαλλόμενο κύτταρο ενέργειας όσο

και από τον τρόπο εναπόθεσής της σ'αυτόν [ΕΕΑΕ.11]. Έτσι, ακτινοβολίες με μικρή εμβέλεια (διεισδυτικότητα) στους ιστούς, εναποθέτουν όλη την ενέργειά τους στο μικρό μήκος διαδρομής τους και δημιουργούν μεγάλη βλάβη στα προσβαλλόμενα κύτταρα λόγω της μεγάλης χωρικής πυκνότητας των αλληλεπιδράσεων (π.χ σωματίδια α). Αντίθετα, διεισδυτικές ακτινοβολίες με μεγάλη εμβέλεια στους ιστούς, κατανέμουν την ενέργειά τους σε μεγαλύτερο μήκος διαδρομής, κατά την οποία η τοπική πυκνότητα των αλληλεπιδράσεων είναι μικρή και έτσι η βλάβη των

προσβαλλόμενων κυττάρων είναι σχετικά μικρότερη (Εικόνα 2.4). Συνεπώς η φυσική σημασία της LET είναι ότι αποτελεί το μέτρο βλαπτικότητας μίας ακτινοβολίας. Ακτινοβολίες με μεγάλο LET είναι βλαπτικότερες από αντίστοιχες με μικρό LET.[UNSCEAR.02]

Η επίδραση ενός συγκεκριμένου τύπου ακτινοβολίας εξαρτάται από την ραδιοευαισθησία του εκάστοτε ιστού ή οργάνου του σώματος στην ακτινοβολία αυτή. Συνεπώς από το 1977 η ICRP εισήγαγε ποιοτικούς συντελεστές  $w_T$  που ανατακλούν την ευαισθησία ενός συγκεκριμένου ιστού ή οργάνου ως προς την έκθεση σε ακτινοβολία. Με τον τρόπο αυτό η ισοδύναμη δόση  $H_T$  πολλαπλασιασμένη με τον αντίστοιχο ποιοτικό συντελεστή  $w_T$  (Πίνακας 2.2), συνδέεται άμεσα με τον πιθανό κίνδυνο που διατρέχει ένα άτομο από έκθεση σε ακτινοβολία, ανεξάρτητα από το όργανο  $T$  που ακτινοβολείται. Με σκοπό την εκτίμηση του ολικού κινδύνου που διατρέχει ο

Tissue	Weighting factors, $w_T$
Gonads	0.20
Red bone marrow	0.12
Colon	0.12
Lung	0.12
Stomach	0.12
Bladder	0.05
Breast	0.05
Liver	0.05
Oesophagus	0.05
Thyroid	0.05
Skin	0.01
Bone surface	0.01
Remainder	0.05

οργανισμός από την έκθεση διαφόρων οργάνων σε ακτινοβολία, ορίζεται ένα νέο μέγεθος, το

Πίνακας 2.2: Ποιοτικοί συντελεστές επικινδυνότητας ως προς την ακτινοβολία συγκεκριμένων οργάνων του σώματος. [nucl.wiki web]

**ενεργό ισοδύναμο δόσης (effective dose equivalent) (ή ενεργό δόσης)** που αφορά στο άθροισμα των επί μέρους σταθμισμένων ισοδύναμων δόσεων:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (\text{σχέση 2.4})$$

Το ενεργό ισοδύναμο δόσης που λαμβάνει κάποιος ιστός, όργανο ή τμήμα του σώματος είναι αυτή η ολόσωμη δόση, η οποία θα είχε το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα (κίνδυνος εμφάνισης καρκίνου). Για παράδειγμα, εάν ακτινοβολήσουμε τον θυρεοειδή με ισοδύναμη δόση  $X$ , το αποτέλεσμα θα είναι λιγότερο επικίνδυνο σε σχέση με το αποτέλεσμα από την ακτινοβολία με ισοδύναμο δόσης όλου του σώματος. Το ενεργό ισοδύναμο δόσης θα προκύψει

εάν πολλαπλασιάσουμε τη δόση του θυρεοειδούς με τον συντελεστή  $K$  (όπου  $K = \frac{\text{ρίσκο δόσης } X \text{ θυρεοειδούς}}{\text{ρίσκο δόσης } X \text{ σώματος}}$ ).

Με τον όρο **έκθεση σε ακτινοβολία** περιγράφεται το ολικό φορτίο ιόντων ενός σήματος, παραγόμενο στον αέρα από ηλεκτρόνια, που απελευθερώνονται με  $X$  ή  $\gamma$  ακτινοβολία ανά μονάδα μάζας του ακτινοβολουμένου αέρα. Ακόμη η έκθεση χρησιμοποιείται και με την κοινή της έννοια, δηλαδή την έκθεση σε ραδιενεργό υλικό. Με την κοινή της έννοια, η έκθεση διακρίνεται σε **εξωτερική έκθεση** (οφείλεται σε πηγές που βρίσκονται εκτός του σώματος) και **εσωτερική έκθεση** (οφείλεται σε πηγές που έχουν εισέλθει στον οργανισμό μέσω της αναπνευστικής και πεπτικής οδού). Το άθροισμα της εξωτερικής και εσωτερικής έκθεσης αποτελεί την ολική έκθεση [Φλώρου.01]. Ανάλογα με τη φύση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας και τον τρόπο έκθεσης κατατάσσουμε την επικινδυνότητα (κατά φθίνουσα σειρά) ως εξής:

- *Εξωτερική ακτινοβολήση*: Φωτόνια, ηλεκτρόνια, σωματίδια-α

Τα φωτόνια λόγω της μεγάλης διεισδυτικότητας τους μπορούν να φτάσουν σε μεγάλο βάθος μέσα στο σώμα, να εναποθέσουν την ενέργεια τους και να προκαλέσουν πλήθος ιοντισμών. Τα ηλεκτρόνια έχουν μικρότερο βάθος διείσδυσης και μπορούν να προκαλέσουν βλάβες επιφανειακά. Τα σωματίδια-α έχουν πολύ μικρή διεισδυτική ικανότητα και απορροφούνται ακόμα και από τα ρούχα μας.

- *Εσωτερική ακτινοβολήση*: Σωματίδια-α, ηλεκτρόνια, φωτόνια

Στην περίπτωση της εσωτερικής ακτινοβολήσης τα πράγματα αντιστρέφονται. Τα σωματίδια-α και τα ηλεκτρόνια λόγω της μικρής διεισδυτικότητας τους απορροφούνται τοπικά μέσα στα όργανα και δύνανται να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες. Αντίθετα, μεγάλο ποσοστό των φωτονίων μπορεί να διαφύγει από το σώμα χωρίς καν να αλληλεπιδράσει έστω μια φορά με αυτό.

## 2.2.4. Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας & ακτινοπροστασίας

- ✓ **Ενεργότητα:** η ενεργότητα μιας ραδιενεργού πηγής ορίζεται από τον αριθμό των αποδιεγέρσεων (διασπάσεων) ανά δευτερόλεπτο με μονάδες:

$$\text{(Becquerel)} \ 1\text{Bq} = 1\text{διάσπαση/s (1dps)} = 2,70 \cdot 10^{-11}\text{Ci}$$

$$\text{(Curie)} \ 1\text{Ci} = 3,70 \cdot 10^{10}\text{dps (ενεργότητα 1gr } ^{226}\text{Ra)}$$

- ✓ **Απορροφούμενη δόση (D):**  $1\text{rad} = 1\text{erg/gr}$

$$1\text{Gray} = 1\text{ J/kg} = 100\text{ rad}$$

- ✓ **Ισοδύναμη δόση (D<sub>q</sub>):** η μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης δόσης είναι το rem (roentgen equivalent mass), ενώ πρόσφατα καθιερώθηκε στο S.I και το Sv (Sievert) ως μονάδα ισοδύναμης δόσης

$$1\text{rem} = 1\text{rad} \times {}^2Q$$

$$1\text{Sv} = 100\text{ rem}$$

- ✓ **Έκθεση:**  $1\text{R} (^3\text{Roentgen}) = 2,58 \cdot 10^{-4}\text{ Cb/kg}$

- ✓ **Συγκέντρωση ραδιονουκλιδίων:** η <sup>4</sup>συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων εκφράζεται ως Bq ανά μονάδα μέτρησης του υλικού.

---

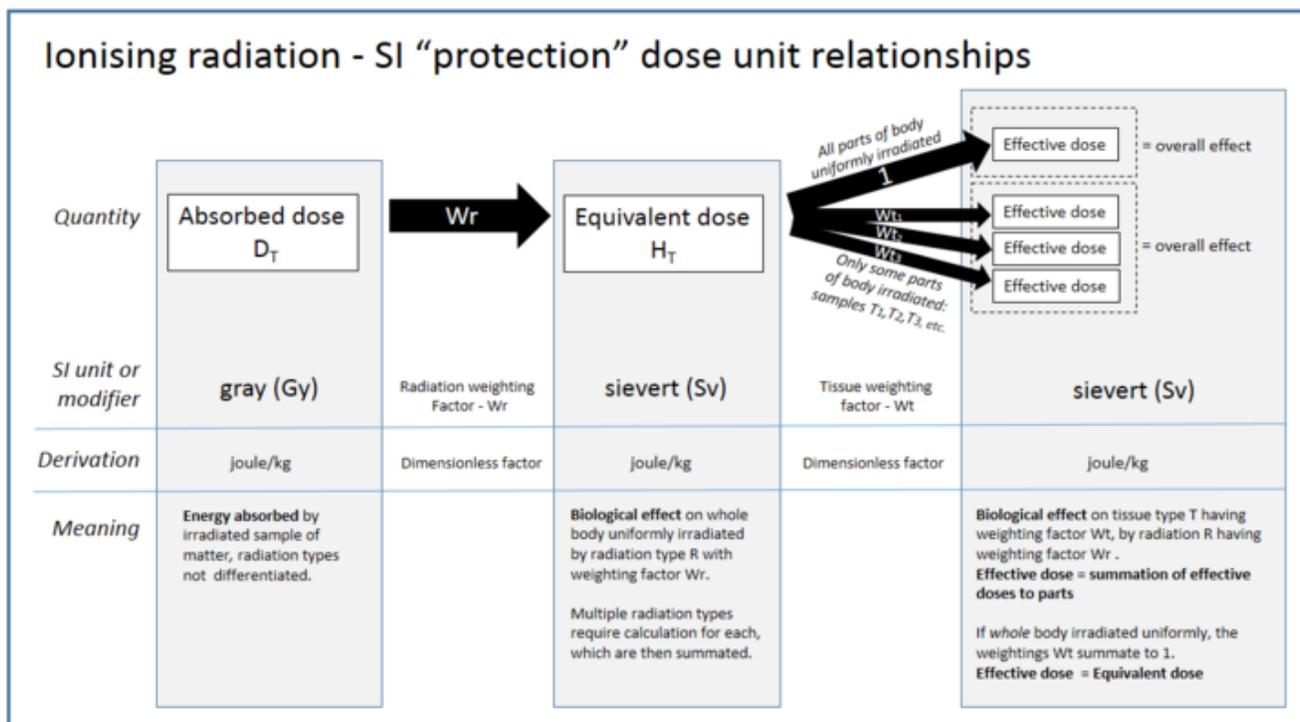
<sup>2</sup> Όπου: Q=1 για γ, β, X & Q=20 για α, νετρόνια, βαριά σωματίδια

<sup>3</sup> Έκθεση σε 1roentgen οδηγεί στη δημιουργία  $2,08 \cdot 10^9$  ζευγών ιόντων-ηλεκτρονίων ή σε μεταφορά στον ατμοσφαιρικό αέρα ενέργειας 88 erg/gr.

<sup>4</sup> Για ακτινοβολία μετρηθείσα σε υγρά χρησιμοποιείται το

$$1\text{pCi/l} = 37\text{Bq/m}^3$$

Τα σημερινά ανώτατα όρια έκθεσης σε ακτινοβολία που έχουν θεσπιστεί με νόμο για όλα τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης ορίζουν ανώτατη ενεργή δόση **1mSv ετησίως** για τον γενικό πληθυσμό και **50mSv ετησίως** για τους εργαζομένους, με ανώτατο όμως όριο συνολικά 100mSv σε μία πενταετία [Τσιπολίτης.09]. Τα όρια αυτά για το γενικό πληθυσμό βρίσκονται στα επίπεδα της ενεργού δόσης που δέχεται αναπόφευκτα ο άνθρωπος από τις φυσικές πηγές ακτινοβολίας.



Εικόνα 2.5: Γράφημα που μας δείχνει την σχέση μεταξύ των μονάδων μέτρησης δόσεων ακτινοβολίας. [Wikipedia web]

### 2.2.5. Φορείς Εξασφάλισης Ραδιολογικής Προστασίας

Με την αποκτώμενη εμπειρία και την αναγνώριση ότι οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες έχουν δυσμενή αποτελέσματα για την υγεία, άρχισε η οργάνωση της επιστημονικής κοινότητας για τη θέσπιση ορίων ακτινοπροστασίας. Σημαντικός σταθμός στην εξέλιξη της ακτινοπροστασίας υπήρξε η δημιουργία της Διεθνούς Επιτροπής Ραδιολογικής Προστασίας (International Commission on Radiological Protection-ICRP) το 1928 από το 2<sup>ο</sup> διεθνές συνέδριο ραδιολογίας (ICR). Από την ίδρυσή της είναι το μόνο διεθνές σώμα υπεύθυνο

να προτείνει τιμές για τη μέγιστη επιτρεπτή έκθεση σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Έκτοτε και άλλοι διεθνείς και τοπικοί φορείς και οργανισμοί υψηλού κύρους ασχολούνται με την προστασία από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Αυτοί οι οργανισμοί είναι η Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών επί των Αποτελεσμάτων των Ατομικών Ακτινοβολιών (UNSCEAR), η Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (IAEE), ο Διεθνής Οργανισμός Υγείας (WHO) υπό την αιγίδα των Ηνωμένων Εθνών, η Εθνική Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας των ΗΠΑ (NCRP) και το όργανο της ΕΟΚ για θέματα εφαρμογών της πυρηνικής ενέργειας Euratom. Η ICRP από το 1990 εισηγήθηκε σημαντικές αλλαγές, τις οποίες συμπεριέλαβε η Ευρωπαϊκή Ένωση στην οδηγία της 96/29/EURATOM 31-5-96 [Ψαρράκος.10].

Η ICRP διακρίνει δύο είδη αποτελεσμάτων που μπορεί να προκληθούν από ιοντίζουσες ακτινοβολίες, τα στοχαστικά και τα μη στοχαστικά [Γαζής.99]. Τα *στοχαστικά αποτελέσματα* είναι εκείνα για τα οποία η πιθανότητα εμφάνισής τους και όχι η σοβαρότητά τους είναι συνάρτηση της δόσης χωρίς την ύπαρξη κατώφλιου (π.χ. η εμφάνιση καρκίνου). Τα *μη στοχαστικά αποτελέσματα* είναι εκείνα για τα οποία η σοβαρότητά τους είναι συνάρτηση της δόσης και για τα οποία συνεπώς υπάρχει κάποιο κατώφλι (π.χ. ο καταρράκτης των ματιών, βλάβες στα αιμοσφαίρια, βλάβες στη γονιμοποίηση)

Στην Ελλάδα ό,τι έχει σχέση με την ακτινοπροστασία είναι θεσμοθετημένο μέσω των Κανονισμών Ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 216 Β' 6-3-2001).

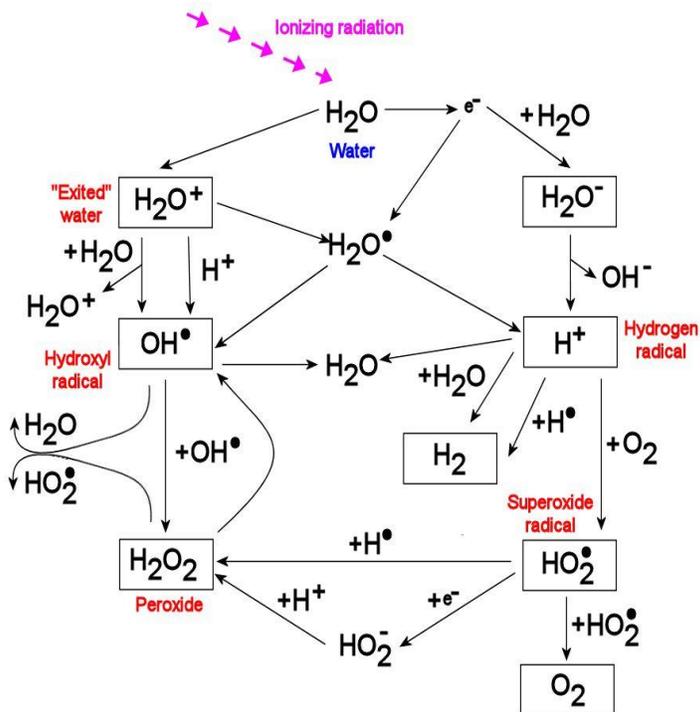
#### **2.2.6. Αλληλεπίδραση με την βιολογική ύλη**

Η ακτινοβόληση οποιουδήποτε βιολογικού υλικού προκαλεί μια αλληλουχία διαδικασιών με μεγάλες διαφορές στην κλίμακα του χρόνου εμφανίσεών τους. Γενικά όμως η αλληλουχία αυτή των διαδικασιών χωρίζεται σε τρία στάδια: το φυσικό, το χημικό και το βιολογικό [Ψαρράκος.10, ΕΕΑΕ.11].

- ✓ **Φυσικό στάδιο:** Η ιοντίζουσα ακτινοβολία κατά τη διέλευσή της από την ύλη, με φυσικούς μηχανισμούς αλληλεπιδράσεων, αποδίδει ενέργεια σε αυτή, μέσω ιοντισμών και διεγέρσεων. Αυτή η μεταφορά ενέργειας πραγματοποιείται σε χρόνο μικρότερο των  $10^{-18}$  sec και η κατανομή της στο χώρο, σε μη συνεχή μορφή, εξαρτάται από το είδος και

την ενέργεια της. Αν η τιμή της LET είναι χαμηλή (π.χ X, γ) η ακτινοβολία προκαλεί μικρό αριθμό ιοντισμών και διεγέρσεων ανά μm της διαδρομής της. Στον αντίποδα, ακτινοβολίες όπως τα σωματίδια α, τα πρωτόνια ή τα βαρέα ιόντα, με υψηλή LET, προκαλούν πυκνούς ιοντισμούς ανά μm διαδρομής. Η ενέργεια που μεταφέρεται σε ένα μικρού όγκου βιολογικό υλικό παρουσιάζει μία μέση τιμή (απορροφούμενη δόση) και μία κατανομή πέριξ αυτής.

- ✓ **Χημικό στάδιο:** Τα άτομα του βιολογικού υλικού που ακτινοβολήθηκαν κατά το φυσικό στάδιο, αντιδρούν με άλλα συστατικά των κυττάρων με ταχείες χημικές αντιδράσεις. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ιοντισμοί και οι διεγέρσεις προκαλούν ρήξη χημικών δεσμών και δημιουργία ελευθέρων ριζών.



Εικόνα 2.6: Σχηματική απεικόνιση της ραδιόλυσης του  $H_2O$  [Carr.12]

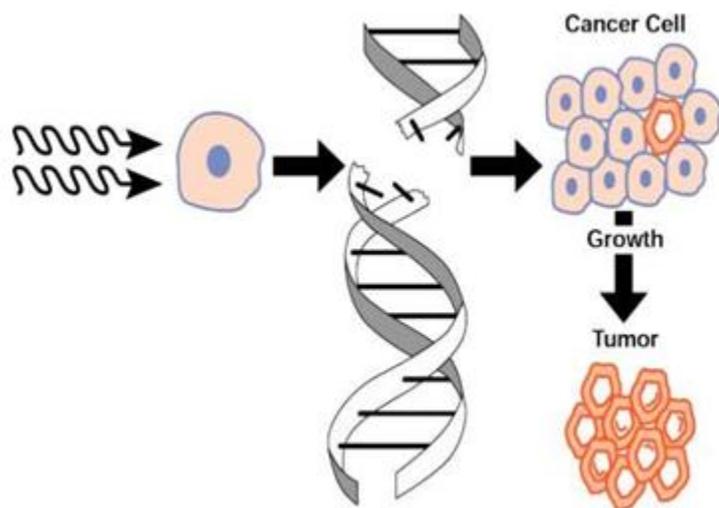
Επειδή τα βιολογικά συστήματα αποτελούνται κυρίως από νερό, ο μεγαλύτερος αριθμός των ιοντισμών συμβαίνει στα μόριά του (Εικόνα 2.6). Πιο συγκεκριμένα, τα αρνητικά φορτισμένα ελεύθερα ηλεκτρόνια ( $e^-$ ) που παράγονται κατά τους ιοντισμούς, συνδέονται με πολικά μόρια νερού. Το σύμπλεγμα αυτό ονομάζεται υδρογονωμένο ηλεκτρόνιο ( $e^-_{aq}$ ) και παρουσιάζει ελαττωμένη κινητικότητα και χρόνο ζωής λίγα μόλις χιλιοστά του δευτερολέπτου. Το μόριο του νερού που έχασε το ηλεκτρόνιο αποτελεί θετικά φορτισμένο ιόν, το οποίο διασπάται σε ένα ιόν υδρογόνου ( $H^+$ ) και σε μία ηλεκτρικά ουδέτερη ρίζα  $OH^\bullet$ . Η ρίζα  $OH^\bullet$  έχει ίσο αριθμό πρωτονίων

και ηλεκτρονίων, αλλά ένα ηλεκτρόνιό της είναι ασύζευκτο, με αποτέλεσμα να είναι σημαντικά χημικά δραστική. Όμοια και η ρίζα  $H^\bullet$  αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο αλλά χημικά είναι εξίσου δραστική αφού η σταθερή μορφή του υδρογόνου είναι  $H_2$ . [Τσιπολίτης.09]

Περίπου σε  $10^{-10}$ sec μετά την ακτινοβόληση, τα τρία βασικά προϊόντα ραδιόλυσης του νερού ( $e^-_{aq}$ ,  $OH^*$ ,  $H^*$ ) προκαλούν περαιτέρω αντιδράσεις. Οι βλάβες των κυττάρων από τις ελεύθερες ρίζες αναφέρονται ως *έμμεση δράση* της ακτινοβολίας, ενώ οι βλάβες από τον απευθείας ιοντισμό των ατόμων αναφέρονται ως *άμεση δράση* της ακτινοβολίας.

- ✓ **Βιολογικό στάδιο:** Το βιολογικό στάδιο ακολουθεί αμέσως μετά το χημικό. Αρχίζει με την εμφάνιση ενζυμικών μηχανισμών που δρουν επιδιορθωτικά στους μοριακούς σχηματισμούς, που υπέστησαν βλάβη κατά το χημικό στάδιο. Η διάρκεια της επιδιόρθωσης είναι στο κύριο μέρος της της τάξης των 15min-1h, ενώ σε περίπου 4h έχει ολοκληρωθεί. Το μεγαλύτερο μέρος των βλαβών που υφίστανται τα βιολογικά μόρια αποκαθίστανται στο ανωτέρω χρονικό διάστημα.

Ορισμένες όμως βλάβες δεν επιδιορθώνονται οδηγώντας στο θάνατο των



κυττάρων (Εικόνα 2.7). Στο επίπεδο οργανισμού θηλαστικών και σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας, τα βιολογικά αποτελέσματα οφείλονται στη θανάτωση αρχέγονων κυττάρων που καταλήγουν σε βλάβες ιστών και οργάνων μέσα στις πρώτες βδομάδες μετά την ακτινοβόληση. Αυτά τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται ως *πρώιμα*.

Εικόνα 2.7: Βλάβη στο DNA. Διπλή θραύση των ελίκων με αποτέλεσμα τη δημιουργία καρκινικών κυττάρων. [Wikipedia web]

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ*

### *Ραδιενέργεια & Περιβάλλον*



### 3.1. Η ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗ ΦΥΣΗ

---

#### 3.1.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Το φυσικό περιβάλλον του ανθρώπου ήταν ανέκαθεν και εξακολουθεί να είναι περιβάλλον ραδιενεργού ακτινοβολίας. Όλοι οι ζώντες οργανισμοί, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου, αναπτύχθηκαν και εξελίχθηκαν στη σημερινή τους μορφή μέσα σε αυτό το περιβάλλον της φυσικής ραδιενέργειας. Σήμερα στο περιβάλλον ανιχνεύονται ανάμικτα φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα και αυτό που ενδιαφέρει είναι να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις τους και οι ισοτοπικές αναλογίες τους, που καθορίζουν τόσο την περίοδο γένεσης-παραγωγής τους, όσο και την εκάστοτε παρουσία τους και την πορεία τους στο περιβάλλον. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι ο τρόπος μεταφοράς των ραδιενεργών ισωτόπων στο περιβάλλον και ο τρόπος με τον οποίο ορισμένα ραδιοϊσότοπα εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα, το πόσιμο νερό και τον αέρα της αναπνοής.

Η *ραδιενέργεια περιβάλλοντος* διακρίνεται [Παπαστ.10]:

- Σε *ραδιενέργεια της ατμόσφαιρας* ή του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος (atmospheric environment), τροποσφαιρικής ή στρατοσφαιρικής προέλευσης.
- Σε *ραδιενέργεια του υγρού ή υδάτινου περιβάλλοντος* (aquatic environment), ήτοι των ποταμών, των λιμνών και των θαλασσών (marine environment).
- Σε *ραδιενέργεια του χερσαίου περιβάλλοντος* (terrestrial environment), ήτοι του στερεού φλοιού της γης.

Στην εργασία αυτή, η μελέτη της ραδιενέργειας επικεντρώνεται στο υδάτινο περιβάλλον και πιο συγκεκριμένα στο θαλάσσιο οικοσύστημα.

### 3.1.2. Πηγές Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος

Η ζωή αναπτύχθηκε στη γη σε συνθήκες συνεχούς έκθεσης χαμηλού επιπέδου ιοντίζουσας ακτινοβολίας, της φυσικής ακτινοβολίας (γήινης και κοσμικής προέλευσης).

Οι φυσικές πηγές της ιοντίζουσας ακτινοβολίας είναι οι ακόλουθες:

- **Κοσμική ακτινοβολία:** η σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας είναι πρωτόνια, ελαφροί πυρήνες και ηλεκτρόνια, τα οποία κατά την αλληλεπίδρασή τους με την ατμόσφαιρα προκαλούν τη γένεση δευτερογενούς ακτινοβολίας, αποτελούμενης από σωματίδια συμπεριλαμβανομένων και των βραχύβιων π-μεσονίων και μ-λεπτονίων. Βέβαια η πιο έντονη πηγή ακτινοβολίας κοντά στη γη είναι ο ήλιος. Από την επιφάνεια του ήλιου εκπέμπεται η ορατή ακτινοβολία, ενώ από το εσωτερικό του ακτινοβολία των νετρίνων λόγω αντιδράσεων πυρηνικής σύντηξης. Ακόμη υπάρχουν και εκπομπές σωματιδίων, κυρίως πρωτονίων και ηλεκτρονίων προερχόμενα από τις ηλιακές εκρήξεις και ηλιακές κηλίδες που συμβαίνουν στην επιφάνειά του. [Γαζής.99]
- **Ακτινοβολία από πηγές εδάφους:** τα πετρώματα και το έδαφος της γης περιέχουν μικρές ποσότητες των ραδιενεργών στοιχείων Ουράνιο και Θόριο μαζί με τα παράγωγά τους. Η συγκέντρωση των στοιχείων στο έδαφος ποικίλλει ανάλογα με το είδος του πετρώματος. Για παράδειγμα, στον ασβεστόλιθο και τον ψαμμίτη η συγκέντρωση είναι πολύ πιο μικρή απ'ότι στον γρανίτη. Άλλα μακρόβια ισότοπα όπως το  $^{48}\text{Ca}$  ή το  $^{50}\text{V}$  δεν συμβάλλουν στη μέτρηση της ραδιενεργού δόσης καθώς υπάρχουν σε πολύ μικρές ποσότητες στη φύση.[Bowen.79]
- **Ραδιενέργεια στο ανθρώπινο σώμα:** το σώμα του ανθρώπου περιέχει πολύ μικρές ποσότητες των ραδιενεργών ισωτόπων Άνθρακα-14 ( $^{14}\text{C}$ ) και Κάλιο-40 ( $^{40}\text{K}$ ). Ο  $^{14}\text{C}$  προέρχεται από την ατμόσφαιρα ενώ το  $^{40}\text{K}$  εμφανίζεται φυσικά στο σώμα ως φυσικό ισότοπο του καλίου.

Συγκεντρωτικά, από τα πλέον 100 στοιχεία που υπάρχουν γνωστά στο φυσικό περιβάλλον, περίπου το 30% είναι ραδιενεργά. Τα όρια της πυρηνικής σταθερότητας εξαντλούνται με τον  $^{208}\text{Pb}$  που αποτελεί το βαρύτερο σταθερό πυρηνικό σύστημα στη φύση. Για

$Z > 82$  οι πυρηνικές δυνάμεις, λόγω του φαινομένου κορεσμού, δεν διαθέτουν την ισχύ και το βεληνεκές ώστε να υπερνικήσουν τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις που δημιουργούνται μεταξύ των πρωτονίων και το σύστημα διασπάται σε ελαφρύτερους πυρήνες ή μεταπίπτει σε σταθερότερα συστήματα με εκπομπή ακτινοβολίας  $\alpha$  ή  $\beta$ . Όλα τα ισότοπα των στοιχείων με ατομικό αριθμό  $Z > 82$  που έχουν βρεθεί στον πλανήτη μας εκπέμπουν αυθόρμητα ακτινοβολία  $\alpha$  ή  $\beta$  και με σταδιακές μεταπτώσεις καταλήγουν σε σταθερούς πυρήνες με  $Z \leq 82$ . [Ασημακ.02]

Το πρώτο ερώτημα που γεννιέται είναι πώς βρέθηκαν αυτοί οι ασταθείς πυρήνες στη φύση. Από όσα γνωρίζουμε σήμερα, κατά τη χρονική περίοδο αμέσως μετά τη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) σχηματίστηκαν, μέσω διαδοχικών συνενώσεων πρωτονίων και μεταπτώσεων  $\beta$ , οι πυρήνες μέχρι το Li. Οι υπόλοιποι πυρήνες σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια εκρηκτικών διαδικασιών, όπως εκρήξεις σουπερνόβα κ.λ.π. Κατά τη μακρινή εκείνη κοσμολογία δημιουργήθηκαν φυσικά και ασταθή πυρηνικά συστήματα που με την πάροδο του χρόνου μετέπεσαν με μία ή περισσότερες αποδιεγέρσεις σε σταθερότερες καταστάσεις. Αναμένεται συνεπώς τα ορυκτά που εμφανίζουν σήμερα φυσική ραδιενέργεια να περιέχουν ασταθείς πυρήνες, κατάλοιπα της αρχικής πυρηνοσύνθεσης, που δεν έχουν προλάβει ακόμα να αποδιεγερθούν, ήτοι πυρήνες με μέσο χρόνο ζωής συγκρίσιμο ή μεγαλύτερο από την ηλικία του σύμπαντος ( $15 \cdot 10^9$  y).

Τα πιο σημαντικά στοιχεία, <sup>5</sup>φυσικής προέλευσης, ως προς την αφθονία τους και τη σχέση τους με τους οργανισμούς είναι το κάλιο-40, τα ισότοπα του ραδίου (ράδιο-226 & ράδιο-228) και τα ισότοπα του θορίου (θόριο-232 & θόριο-228). Ακόμα αξίζει να αναφερθούν και άλλα στοιχεία διασκορπισμένα στο περιοδικό σύστημα (π.χ τρίτιο, άνθρακας-14, κάλιο-40, ρουβίδιο-87), ακόμη το τεχνήτιο (τεχνήτιο-97 και τεχνήτιο-98) που δεν υπάρχει στην επιφάνεια της γης, αλλά είναι κοινό στοιχείο στις αστρικές ατμόσφαιρες και το αστάτιο-85 που

---

<sup>5</sup> Η φυσική ραδιενέργεια ενδέχεται να αποτελεί σημαντικό παράγοντα ραδιορύπανσης των οικοσυστημάτων λόγω αυξημένων συγκεντρώσεων φυσικών ραδιοϊσοτόπων από τεχνολογικές εφαρμογές (NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials)/TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials)) οι οποίες είναι:

Ορυχεία ουρανίου και επεξεργασία ορυκτού. Ηλεκτρικοί σταθμοί λιγνίτη. Επαναχρησιμοποίηση υλικών NORM για την παραγωγή οικοδομικών υλικών (π.χ. τσιμέντο, τούβλα, κεραμίδια), ως εδαφοβελτιωτικά (π.χ. φωσφογύψος, λυματολάσπη), σε οικοδομικές κατασκευές και στην οδοποιία. Ανακύκλωση μετάλλων με αυξημένες συγκεντρώσεις NORM. Ραδόνιο εσωτερικών χώρων (κύριος παράγοντας έκθεσης του πληθυσμού). Ραδονιούχα ιαματικά λουτρά.

δημιουργείται κατά τον βομβαρδισμό του βισμούθιου με α-σωματίδια, και όλα τα ισότοπά του. [Οικονόμου.89]

Τις τελευταίες δεκαετίες μεγάλη είναι η συνεισφορά των τεχνητών πηγών παραγωγής ακτινοβολιών, από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας για ειρηνικούς και μη σκοπούς, επιβαρύνοντας τόσο το φυσικό περιβάλλον όσο και την υγεία του ίδιου του ανθρώπου.

Αυτές οι **τεχνητές πηγές** είναι:

- **Τα ραδιενεργά απόβλητα:** Υπάρχουν διάφορα είδη ραδιενεργών αποβλήτων που ταξινομούνται σύμφωνα με τις φυσικές και χημικές ιδιότητές τους καθώς και από την πηγή προέλευσής τους. Μεταξύ των φυσικών ιδιοτήτων που επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο διαχειρίζονται τα ραδιενεργά απόβλητα είναι ο χρόνος ημιζωής των ραδιοϊσοτόπων και η χημική μορφή με την οποία υφίστανται. [Παπαστ.10]
  - A. **Ραδιενεργά απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας (low-level wastes):** τα ραδιενεργά απόβλητα χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας συνίστανται από υπολείμματα της πυρηνικής βιομηχανίας, εργαστηρίων έρευνας, βιομηχανικών δραστηριοτήτων και της ιατρικής. Η φυσική μορφή των αποβλήτων χαμηλής ραδιενέργειας περιλαμβάνει τον μολυσμένο ιματισμό ραδιοπροστασίας, χαρτί, γυαλί, πλαστικές ύλες, βιολογικά υλικά, παλιοσίδερα, ακόμα και οικοδομικά υλικά.
  - B. **Εξαντλημένο πυρηνικό καύσιμο (spent nuclear fuel):** είναι το πυρηνικό καύσιμο το οποίο έχει αποσυρθεί από έναν αντιδραστήρα και δεν έχει χημικώς διαχωριστεί στα συστατικά του στοιχεία με χημική διεργασία (reprocessing). Το εξαντλημένο πυρηνικό καύσιμο περιλαμβάνει όλα τα ραδιενεργά υλικά που σχετίζονται με τα υλικά στήριξης (assemblies) του πυρηνικού καυσίμου.
  - C. **Ραδιενεργά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας (high-level wastes):** είναι τα απόβλητα προϊόντα επεξεργασίας (reprocessing) που περιλαμβάνουν υγρά απόβλητα που παράγονται απ'ευθείας από την επεξεργασία των αποβλήτων αλλά και κάθε στερεό υλικό που περιέχει προϊόντα σχάσης σε σημαντικές συγκεντρώσεις.

- D. **Ραδιενεργά απόβλητα με υπερουράνια στοιχεία (transuranic wastes):** είναι κυρίως υπολείμματα εκπομπής α-ακτινοβολίας από στρατιωτικές βιομηχανίες. Τα κυριότερα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν είναι το πλουτόνιο  $^{239}\text{Pu}$  και το αμερίκιο  $^{241}\text{Am}$ .
- **Η ραδιενεργός σκόνη από πυρηνικές δοκιμές:** κάποια από τα ισότοπα που παράγονται σε μία πυρηνική δοκιμή διαχέονται στην τροπόσφαιρα (12-20km) και μεταφέρονται γύρω από τη γη αρκετές φορές. Σε περίοδο λίγων ετών επιστρέφουν σταδιακά στη γη, επιβαρύνοντας τη συνολική λαμβανόμενη δόση ακτινοβολίας του πληθυσμού. Τα δύο σημαντικότερα ισότοπα που παράγονται σε μία πυρηνική δοκιμή σε σχέση με την ραδιοτοξικότητά τους αλλά και την βιοσυσσωρεύσή τους από τους οργανισμούς είναι το Στρόντιο-90 ( $^{90}\text{Sr}$ ) και το Καίσιιο-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), με χρόνους ημιζωής 28,5 και 30,17 χρόνια αντίστοιχα. [Φλώρου.01]
  - **Πυρηνικά ατυχήματα σε αντιδραστήρες παραγωγής ενέργειας:** στην ιστορία της πυρηνικής ενέργειας έχουν σημειωθεί τέτοια ατυχήματα τόσο σε αντιδραστήρες παραγωγής ενέργειας (όπως τα πυρηνικά ατυχήματα στο Three Mile Island το 1979 και του Chernobyl το 1986) όσο και στους αντιδραστήρες των πυρηνοκίνητων πλοίων που όχι μόνο ρυπαίνουν το περιβάλλον, αλλά αποτελούν και μόνιμη πηγή ραδιενεργού ρύπανσης στην περίπτωση ναυαγίων. Μάλιστα στον ελλαδικό χώρο, το πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl είχε σαν αποτέλεσμα την προσθήκη στο περιβάλλον ενός νέου επιβαρυντικού φορτίου τεχνητών ραδιονουκλιδίων του ραδιενεργού νέφους που δημιουργήθηκε από την έκρηξη του αντιδραστήρα, όπως  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  κ.α. [Simop.89]
  - **Ορυχεία ουρανίου (uranium mines):** η εξόρυξη ουρανίου (uranium mining) γίνεται σε υπόγεια με στοές και σε ανοιχτά ορυχεία. Αυτή γίνεται με την μέθοδο της διάλυσης (solution mining) η οποία περιλαμβάνει το εν διαλύσει ουράνιο με άντληση νερού, στο οποίο προστίθενται οξειδωτικές και σύνθετες ουσίες σε ένα ορυκτό σώμα και στη συνέχεια άντληση του διαλύματος μέχρι την επιφάνεια του εδάφους για περαιτέρω επεξεργασία. Το ραδόνιο και τα προϊόντα διάσπασής του είναι οι μόνοι σημαντικοί

αέριοι ραδιενεργοί ρυπαντές που αποβάλλονται από τα ορυχεία ουρανίου. Η απαιτούμενη συχνότητα εξαερισμού στα ορυχεία ποικίλλει από 1000cfm (cubic feet per minute) έως πέρα από 200000cfm. Ο αέρας που αποβάλλεται περιέχει ραδόνιο σε συγκεντρώσεις από (0,65 - 26) kBq/m<sup>3</sup> που δεν υπερβαίνουν τη συνήθη ροή ραδονίου από επιφάνεια εδάφους της γης περίπου 1km<sup>2</sup> [Παπαστ.10]. Ο κίνδυνος στο γενικό πληθυσμό από τα ορυχεία ουρανίου, αλλά και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, είναι ελάχιστες. Υπάρχει όμως κίνδυνος ραδιομόλυνσης των υπόγειων υδάτων.

- **Η ραδιενέργεια από πυρηνικές εκρήξεις:** πυρηνική ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί

από ένα πυρηνικό όπλο ή μια βόμβα, είτε με τη μέθοδο της σχάσης ή της σύντηξης. Η βόμβα της καθαρής πυρηνικής σχάσης (Εικόνα 3.1) παράγει ενέργεια είτε από το <sup>235</sup>U είτε από το πλουτόνιο <sup>239</sup>Pu. Προσεγγιστικά, το 50% της ενέργειας από πυρηνική έκρηξη απελευθερώνεται υπό τη μορφή εκρηκτικού κύματος αερίων (blast), 35% ως θερμική ακτινοβολία και το υπόλοιπο 15% ως ιοντίζουσα ακτινοβολία. Από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες, το 1/3 είναι σύγχρονη ακτινοβολία παραγόμενη σε λίγα



Εικόνα 3.1: Η θερμοπυρηνική βόμβα των ΗΠΑ που έπεσε στο ατύχημα του Πάλομαρ της Ισπανίας (μετά τον εντοπισμό της). [Wikipedia web]

δευτερόλεπτα μετά την έκρηξη και τα 2/3 είναι με τη μορφή καθυστερημένης ιοντίζουσας ακτινοβολίας που παράγεται με τη ραδιενεργό διάσπαση των επαγόμενων ραδιοϊσοτόπων, προϊόντων της σχάσης.

Η θερμοπυρηνική βόμβα χρησιμοποιεί τις αντιδράσεις σύντηξης ελαφρών πυρήνων, όπως το δευτέριο (<sup>2</sup>H), το τρίτιο (<sup>3</sup>H) ή το λίθιο (<sup>3</sup>Li). Όλες οι αντιδράσεις που μπορούν να συμβούν απαιτούν οι πυρήνες να έχουν τέτοιες ενέργειες ώστε να πραγματοποιούνται μόνο με τη βοήθεια θερμοκρασιών εκατομμυρίων βαθμών. Η θερμότητα αυτή μπορεί να παραχθεί σε βόμβα σχάσης. Μια τέτοια συσκευή χρησιμοποιείται ως τρίγгер-σκανδάλη για θερμοπυρηνική έκρηξη. Οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις είναι πηγές ταχέων νετρονίων που προκαλούν σχάση του <sup>238</sup>U και έτσι μπορούν να χρησιμεύσουν στην αύξηση των εκρηκτικών προϊόντων μίας βόμβας, περιβάλλοντας το όπλο σύντηξης με φυσικό ουράνιο.

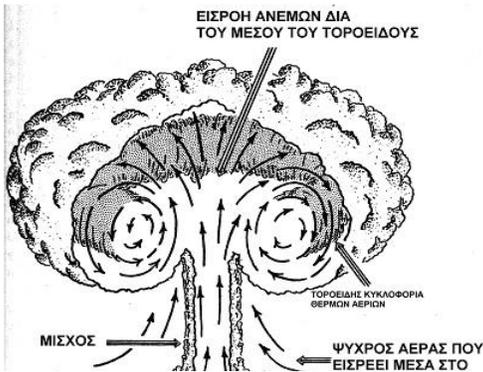
Η έκρηξη ενός θερμοπυρηνικού όπλου παράγει νέφος (Εικόνα 3.3) πυρακτωμένου, φωτεινού και λαμπερού αερίου και ατμών που καλείται «φλεγόμενη μπάλα» (Εικόνα 3.2), βολίδα (fireball), η οποία είναι πολλές φορές πιο λαμπερή από τον ήλιο του μεσημεριού (!). Αν και η λαμπρότητα αρχίζει να μειώνεται μετά από 1msec, η φλεγόμενη μπάλα συνεχίζει να αυξάνει κατά το μέγεθος, με τελική διάμετρο [Παπαστ.10]:

$$D = 180W^{0.4} \quad (\text{σχέση 3.1})$$

όπου D σε feet (πόδια) και W είναι η ενέργεια σε kilotons (χιλιοτόνους). Σε περίπου 1sec, όταν η φλεγόμενη μπάλα από μία έκρηξη 20kilotons έχει φτάσει στο μέγιστο μέγεθός της, θα έχει περίπου διάμετρο 440m. Σε 1min η φλεγόμενη μπάλα θα έχει ψυχθεί επαρκώς ώστε να μην πυρακτώνεται άλλο. Από εκείνη τη στιγμή θα έχει ανυψωθεί σε ύψος περίπου 11km.



Εικόνα 3.2: Έκρηξη πυρηνικού όπλου που δείχνει το δακτυλιοειδές-σπειροειδές σχήμα της φλεγόμενης μπάλας, το λεγόμενο «μανιτάρι».



Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση του ραδιενεργού νέφους. Μάλιστα περίπου το 90% της ραδιενέργειας που παράγεται σε μία έκρηξη βρίσκεται στην κεφαλή του νέφους που έχει το σχήμα του μανιταριού, που παράγεται από τη φλεγόμενη μπάλα καθώς ψύχεται. Το υπόλοιπο 10% περιέχεται στον κορμό, το σώμα του νέφους. [Αντωνοπ.05]

Τα ραδιενεργά συντρίμια-απόβλητα από μία πυρηνική έκρηξη δημιουργούνται με διάφορους τρόπους. Η κυριότερη πηγή είναι η παραγωγή των προϊόντων σχάσης. Το αρχικό μείγμα των προϊόντων σχάσης περιέχει περισσότερα από 200 ισότοπα 35 στοιχείων. Τα περισσότερα ισότοπα είναι ραδιενεργά και πολλά από αυτά έχουν μικρούς χρόνους ημιζωής, είναι δηλαδή βραχύβια, ώστε η μείωση της ραδιενέργειας να είναι ταχεία μετά τη σχάση.

Η ραδιενέργεια A σε κάθε χρονική στιγμή t μετά την πυρηνική έκρηξη μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$A = A_0 t^{-1/2} \quad (\text{σχέση 3.2})$$

όπου  $A_0$  η ραδιενέργεια στη μονάδα του χρόνου. Η εξίσωση αυτή έχει ισχύ για την εκτίμηση της ραδιενέργειας για χρονική περίοδο μικρότερη των 6 μηνών.

Το μέγεθος των σωματιδίων των συντριμμίων εξαρτάται από τον τύπο της έκρηξης. Εκρήξεις πλησίον της επιφάνειας του εδάφους θα παράγουν μεγάλες στιλπνές μάζες, πολύ ραδιενεργές. Εκρήξεις που λαμβάνουν χώρα ψηλά στην ατμόσφαιρα παράγουν σωματίδια όμοια με τα σωματίδια του καπνού, τα οποία παραμένουν

αιωρούμενα για αρκετά μεγάλα χρονικά διαστήματα. Έχει αποδειχθεί ότι σωματίδια από εκρήξεις στον αέρα δεν αυξάνονται πάνω από 0,3μm με συμπύκνωση και ότι τα μεγαλύτερα σωματίδια είναι πιθανώς αποτέλεσμα συγκόλλησης μικρότερων σωματιδίων ή συμπύκνωσης ραδιενεργών ατμών στις επιφάνειες των μεγαλύτερων σωματιδίων.

- **Η διαγνωστική και θεραπευτική ακτινολογία:** έχει υπολογιστεί ότι το 75-90% της ολικής έκθεσης του πληθυσμού σε ιατρικές ακτινοβολίες προέρχεται από τη διαγνωστική χρήση των ακτίνων-X, ενώ η μέση δόση στον πληθυσμό από τη θεραπευτική ακτινολογία είναι πολύ μικρότερη. [Γαζής.99]
- **Η χρήση των ραδιοϊσοτόπων στην ιατρική:** Αυτή η διερεύνηση είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας νέας ειδικότητας, της Πυρηνικής Ιατρικής που έχει σαν σκοπό την εφαρμογή των ιδιοτήτων των ραδιοϊσοτόπων στη διάγνωση και την θεραπεία των ανθρώπινων ασθενειών. Η πρώτη χρήση ραδιοϊσοτόπου για ιατρικούς σκοπούς ήταν το 1930 όπου χρησιμοποιήθηκε  $^{131}\text{I}$  για τη μελέτη θυρεοειδή.

### 3.1.3. Φυσικά Ραδιονουκλίδια

Διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες φυσικών ραδιονουκλιδίων, βάσει της φυσικής τους προέλευσης:

#### 3.1.3.1. Λιθογενή (*terrigenous*) Ραδιονουκλίδια

##### 1) Πρωταρχικά (*primordial*) ραδιονουκλίδια συνυπάρχοντα με τα σταθερά ανάλογά τους

Σε αυτή την κατηγορία υπάρχουν τουλάχιστον 14 φυσικά ραδιονουκλίδια διασκορπισμένα στο περιοδικό σύστημα. Κάποια χαρακτηριστικά τους είναι τα ακόλουθα:

- Έχουν μεγάλο χρόνο ημιζωής που κυμαίνεται ( $10^7 - 10^{15}$ )y.
- Οι χημικές τους ιδιότητες ποικίλλουν ευρέως.
- Εφ'όσον αντικαθίστανται από τα ομόλογά τους σταθερά, η περιβαλλοντική τους συμπεριφορά είναι όμοια με αυτή των ομολόγών τους σταθερών.

Πρωταρχικά ραδιονουκλίδια της ομάδας αυτής είναι το  $^{40}\text{K}$  και το  $^{87}\text{Rb}$ , στοιχεία που ανήκουν στην ομάδα των αλκαλίων και είναι ευρέως διαδεδομένα σε όλα τα περιβαλλοντικά στοιχεία και ειδικά στην υδρόσφαιρα. Η συνολική ενεργότητα του  $^{40}\text{K}$  αποτελεί το 90% της ενεργότητας του θαλασσινού νερού, ενώ αυτή του  $^{87}\text{Rb}$  μόλις το 1%. [Φλώρου.92]

Σε κλειστό σύστημα, η διάσπαση του  $^{40}\text{K}$  και του  $^{87}\text{Rb}$  σε  $^{40}\text{Ar}$  και  $^{87}\text{Sr}$  αντίστοιχα, αποτελούν τη βάση της πιο δημοφιλούς μεθόδου γεωχρονολόγησης.

##### 2) Ραδιενεργές σειρές των Ακτινίδων:

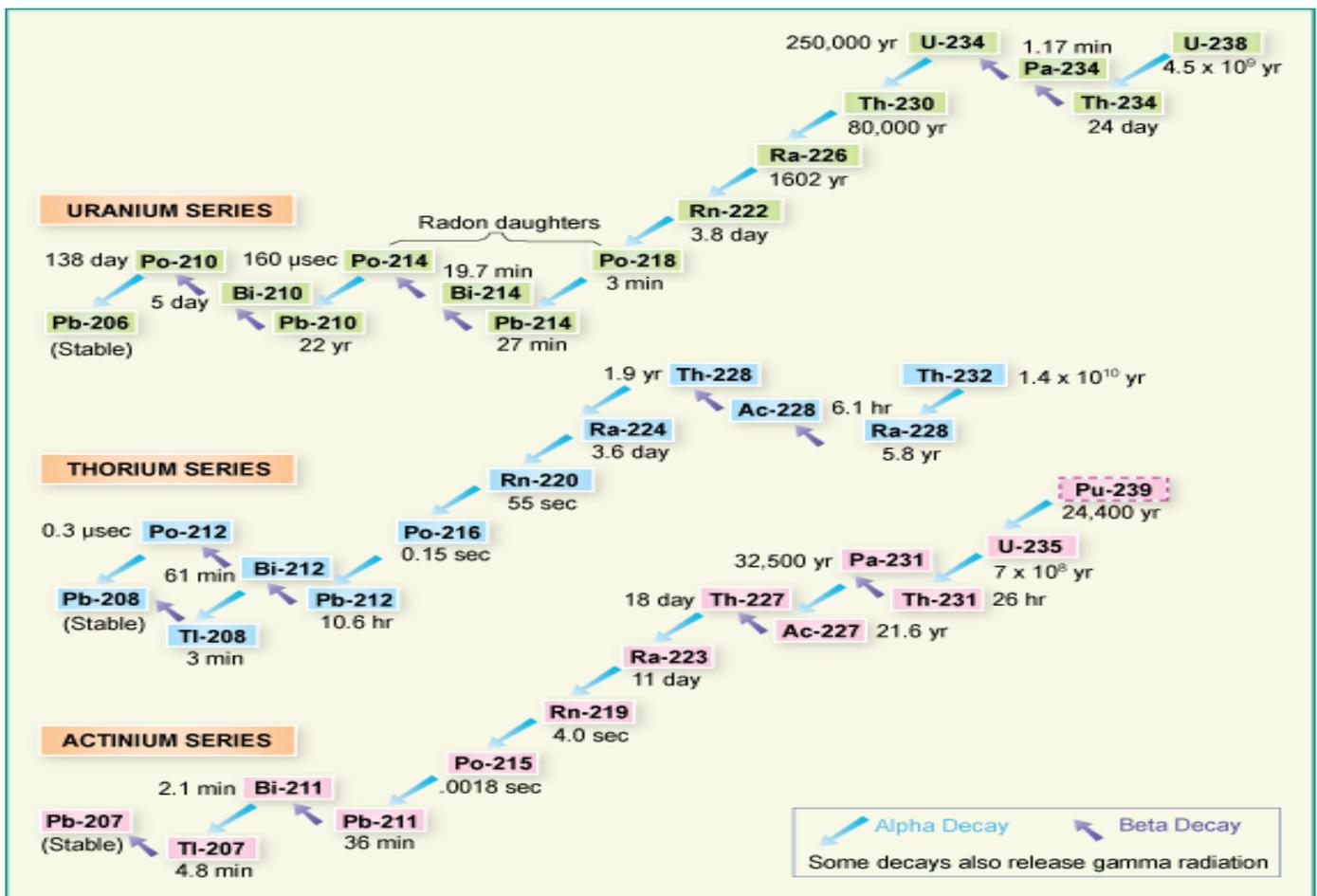
Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει τα τρία πρωταρχικά μητρικά ραδιονουκλίδια των ακτινίδων, τα  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  και  $^{238}\text{U}$ , όπως και τα αντίστοιχα θυγατρικά τους νουκλίδια (Εικόνα 3.4). Οι τρεις αυτές ομάδες έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: [Ασημακ.02]

- Κάθε ομάδα χαρακτηρίζεται αντίστοιχα από τη συναρτησιακή μορφή του μαζικού αριθμού  $A$  των πυρήνων που περιέχει σύμφωνα με τις ακολουθίες:

$$4n, 4n + 2, 4n + 3$$

όπου  $n$  ακέραιος αριθμός.

- Τα μέλη κάθε ομάδας συνδέονται μεταξύ τους σε μία συνεχή ακολουθία αποδιεγέρσεων  $\alpha$ - και  $\beta$ -.
- Κάθε σειρά αρχίζει με ένα μακρόβιο ισότοπο με μέσο χρόνο ζωής συγκρίσιμο προς την ηλικία του σύμπαντος.
- Κάθε σειρά καταλήγει σε έναν σταθερό πυρήνα.



Εικόνα 3.4: Ραδιενεργές σειρές θορίου και ουρανίου [WNA web]

### 3.1.3.2. Κοσμογενή (cosmogenic) Ραδιονουκλίδια

Υπάρχουν τουλάχιστον 14 γνωστά ραδιονουκλίδια που παράγονται στην ατμόσφαιρα της γης από πυρηνικές αντιδράσεις μεταξύ των ατόμων αερίων του στερεού φλοιού της γης και των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας όπως π.χ τα πρωτόνια υψηλής ενέργειας κλπ.

Τα σημαντικότερα ραδιονουκλίδια, με γεωχημική σημασία, αυτής της κατηγορίας παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3.1: Κοσμογενή ραδιονουκλίδια με τους αντίστοιχους χρόνους ημιζωής τους [chem.. web].

Ραδιονουκλίδιο	Χρόνος Ημιζωής
$^3\text{H}$ (παράγεται και τεχνητά)	12,3y
$^7\text{Be}$	53d
$^{10}\text{Be}$	$2,5 \cdot 10^6\text{y}$
$^{14}\text{C}$ (παράγεται και τεχνητά)	5730y
$^{26}\text{Al}$	$7,4 \cdot 10^5\text{y}$
$^{32}\text{Si}$	700y

Μεταξύ αυτών των ραδιονουκλιδίων, σημαντικές ποσότητες των  $^3\text{H}$  και  $^{14}\text{C}$  έχουν παραχθεί τεχνητά, από πυρηνικές εκρήξεις και έχουν προστεθεί στο περιβάλλον.

Τα κοσμογενή ραδιονουκλίδια λόγω της αρκούντως σταθερής ταχύτητας παραγωγής τους και ανάλογα με τους χρόνους ημιζωής τους χρησιμοποιούνται ευρέως στη μελέτη των διαφόρων οικολογικών πορειών και διεργασιών. Παραδείγματα αποτελούν το βραχύβιο  $^7\text{Be}$  που χρησιμοποιείται σαν ιχνηθέτης στη μελέτη της ταχύτητας της ραδιενεργού επίπτωσης (fallout), το  $^3\text{H}$  στη μελέτη των ανταλλαγών των υδάτινων μαζών μεταξύ της ενδιάμεσου και της βαθιάς στειβάδας στο θαλάσσιο περιβάλλον, ενώ οι μακράς κλίμακας οικολογικές πορείες όπως η κυκλοφορία των βαθέων υδάτων και οι πορείες ιζηματογένεσης έχουν μελετηθεί με τη χρήση του μακρόβιου  $^{14}\text{C}$  [Φλώρου.01].

### 3.1.4. Τεχνητής προέλευσης ραδιονουκλίδια

Τα τεχνητής προέλευσης ραδιονουκλίδια προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες στον τομέα χρήσης της πυρηνικής ενέργειας για ειρηνικούς και πολεμικούς σκοπούς. Μόλυνση του περιβάλλοντος με ραδιενέργεια έχει γίνει σε διάφορες χώρες ως αποτέλεσμα πυρηνικών ατυχημάτων ή από συνήθεις δραστηριότητες με χρήση ραδιενεργών ισοτόπων από βιομηχανίες, νοσοκομεία, ερευνητικά εργαστήρια και κέντρα. Η παραγωγή των πυρηνικών όπλων από διάφορες χώρες αποκτά επίσης ενδιαφέρον στην περιβαλλοντική μόλυνση όπως και η επεξεργασία του ραδίου και των άλλων ραδιενεργών ουσιών.

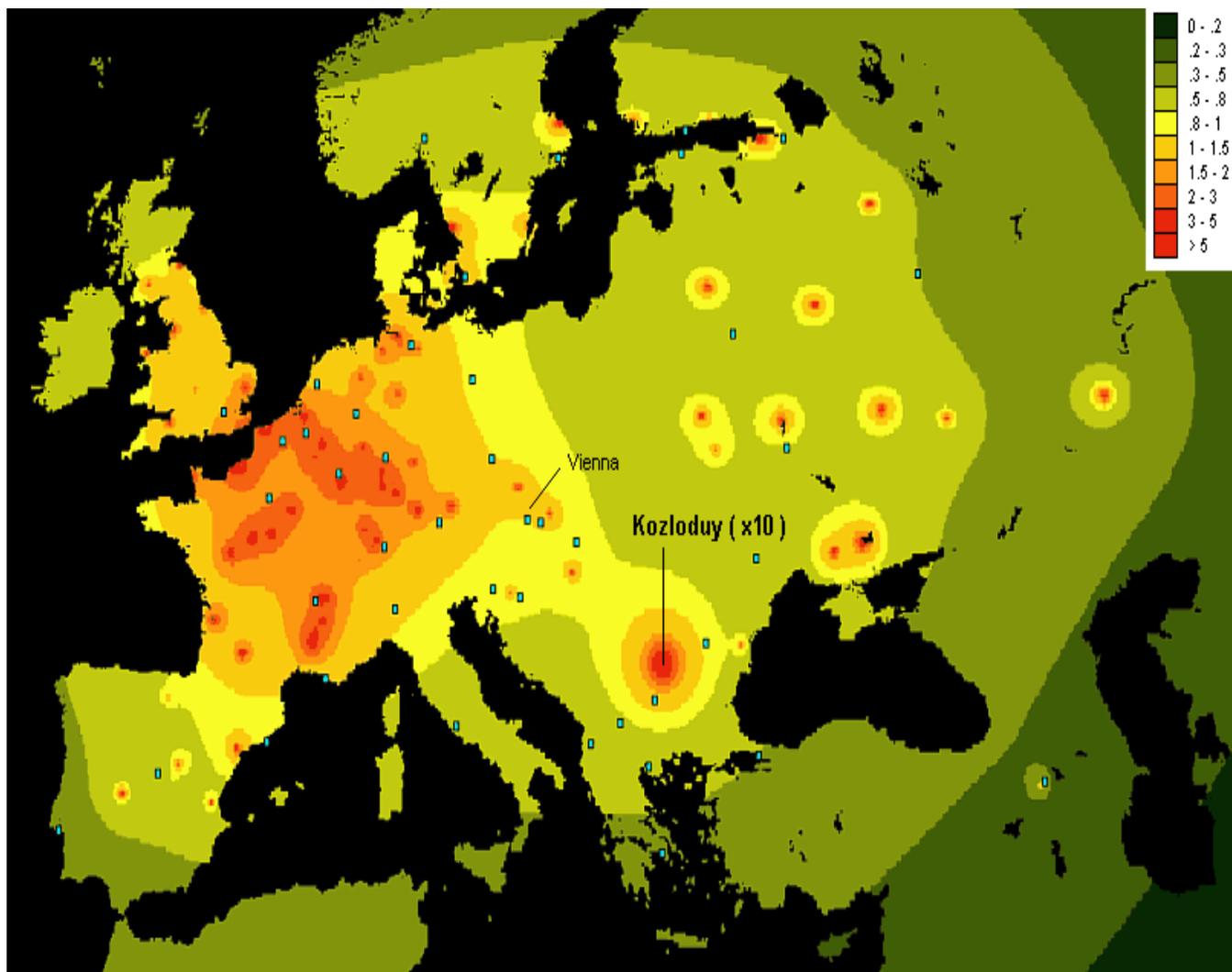
Όπως έχει αναφερθεί, οι κυριότερες πηγές παραγωγής τεχνητών ραδιονουκλιδίων είναι επιγραμματικά οι ακόλουθες:

- **Παγκόσμια Ραδιενεργός Επίπτωση (global fallout):** με τον όρο fallout θεωρείται η ραδιενέργεια περιβάλλοντος σε οιασδήποτε μορφής πυρηνικές εκρήξεις, π.χ από πυρηνικές δοκιμές (έναρξη των επίγειων πυρηνικών δοκιμών στην ατμόσφαιρα το 1945) ή από πυρηνικά ατυχήματα (Three-mile Island, Chernobil, Δορυφόρος Transit 5BN-3, Fukushima Daiichi). Αφορά κατά κύριο λόγο την μόλυνση από  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{90}\text{Sr}$ .
- **Λειτουργία πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος (Εικόνα3.5):**
  - ◆ Εκλύσεις την ατμόσφαιρα:
    - Ευγενή αέρια από τη σχάση
    - Αέρια από ενεργοποίηση
    - Τρίτιο
    - Ανθρακας-14
    - Ιώδιο
    - Αερομεταφερόμενα σωματίδια
  - ◆ Εκλύσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον:
    - Τρίτιο
    - Προϊόντα σχάσης
    - Ενεργοποιημένα προϊόντα διάβρωσης
  - ◆ Πυρηνικά απόβλητα.

❖ **Πυρηνοκίνητα πλοία** (Οι εν δυνάμει πηγές ρύπανσης): Ως πυρηνοκίνητο πλοίο (nuclear ship) (NS) χαρακτηρίζεται το πλοίο εκείνο που χρησιμοποιεί ως μέσον για την κίνησή του την πυρηνική ενέργεια και αποτελεί την τελευταία εξέλιξη μέσου πρόωσης των μηχανοκινήτων πλοίων. Το NS Savannah, ήταν το πρώτο πυρηνοκίνητο φορτηγό πλοίο που ναυπηγήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1950.



Εικόνα 3.5: Παγκόσμιος χάρτης πυρηνικών μονάδων [IENE web].



Εικόνα 3.6 : Ευρωπαϊκός χάρτης επικινδυνότητας πιθανού πυρηνικού ατυχήματος. Στην Ελληνική επικράτεια το ρίσκο κομμάινεται μεταξύ του 0,3 έως 0,7 [ERL web].

### 3.2. ΡΑΔΙΟΟΙΚΟΛΟΓΙΑ (RADIOECOLOGY)

---

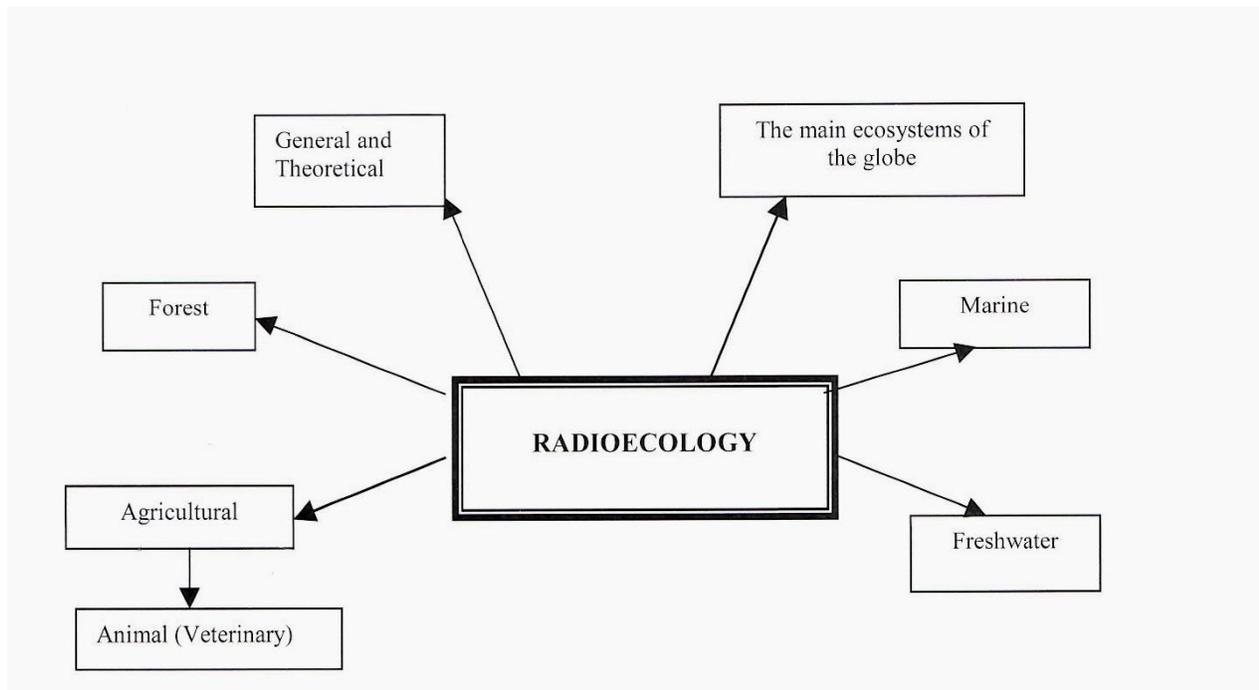
#### 3.2.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Ο όρος ραδιοοικολογία χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή των ερευνητικών δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την συμπεριφορά της ραδιενέργειας στο περιβάλλον (Εικόνα 3.7). Σαν όρος πρωτοεμφανίστηκε ταυτόχρονα το 1956 στην αγγλική και τη ρώσικη λογοτεχνία: Odum(1956), Kuzin(1956).

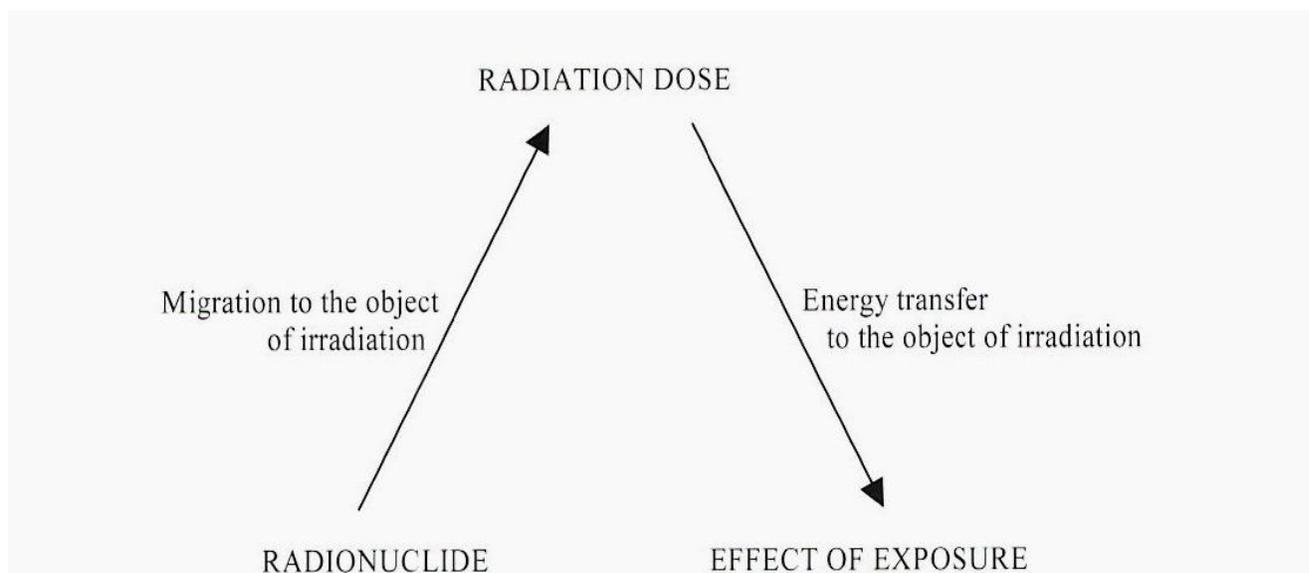
Η ραδιοοικολογία αναπτύχθηκε σαν συνεργατική επιστήμη των τομέων της βιολογίας, οικολογίας, φυσικής, χημείας, μαθηματικών και του εφαρμοσμένου τομέα της ραδιοπροστασίας, συμβαδίζοντας με τις ερευνητικές καινοτομίες της εποχής και διευρύνοντας την περιβαλλοντική επιστημονική έρευνα.

Μία πρώτη απόπειρα προσδιορισμού του αντικειμένου της ραδιοοικολογίας πραγματοποιήθηκε στο 9<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο στην Ραδιολογική Έρευνα στο Τορόντο (11 Ιουλίου 1991) από τον Ward Whicker, ο οποίος όρισε την ραδιοοικολογία ως επιστήμη όπου [Stricht.01]:

- Προσπαθεί να κατανοήσει και να προβλέψει την μεταφορά των ραδιονουκλιδίων μέσω των φυσικών και αγροτικών οικοσυστημάτων στους πιθανούς υποδοχείς δηλαδή τα φυτά, τα ζώα και τον άνθρωπο (Εικόνα 3.8).
- Μελετά τις επιπτώσεις της ραδιενέργειας περιβάλλοντος στα φυτά και τα ζώα, ιδίως σε επίπεδα βιοκοινότητας (Εικόνα 3.8).
- Χρησιμοποιεί τα ραδιοϊσότοπα ως μέσο έρευνας και κατανόησης των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο κάθε οικοσύστημα.



Εικόνα 3.7: Οι επιστημονικοί κλάδοι έρευνας της Ραδιοικολογίας. [Stricht.01]



Εικόνα 3.8: Σχεδιαγραμματική απεικόνιση του βασικού σκοπού της επιστήμης της Ραδιοικολογίας. [Stricht.01]

### 3.2.2. Συμπεριφορά των Ραδιονουκλιδίων στα Οικοσυστήματα

Τα ραδιονουκλίδια όταν εισάγονται στον αέρα, το νερό ή το έδαφος διασπείρονται, διαλύονται, ανακατανέμονται στο χώρο και τελικά συσσωρεύονται σε ορισμένα στοιχεία του περιβάλλοντος. Η τύχη του εκάστοτε ραδιονουκλιδίου καθορίζεται από διάφορους βιολογικούς, φυσικούς και χημικούς παράγοντες. Το ενδιαφέρον για την περιβαλλοντική συμπεριφορά των ραδιονουκλιδίων προκύπτει είτε από τα βιολογικά αποτελέσματα της επίδρασής τους, είτε από την επιθυμία κατανόησης των γεωχημικών και οικολογικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη μεταφορά τους.

Τα βιολογικά αποτελέσματα αφορούν:

1. Την κίνηση και τη συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου στο υπό μελέτη σύστημα.
2. Την ακτινοβολία και τη χημική τοξικότητα των συγκεντρώσεων στα βιολογικά συστατικά του συστήματος.

Η πειραματική έρευνα είναι απαραίτητη στη διαμόρφωση προγνωστικών μοντέλων της συμπεριφοράς και των αποτελεσμάτων των ραδιενεργών υλικών. Πιο σημαντική είναι η «in situ» έρευνα της συμπεριφοράς των ραδιοϊσοτόπων στα φυσικά οικοσυστήματα, αφού οι περιβαλλοντικές παράμετροι είναι αδύνατο να αναπαραχθούν πιστά στο εργαστήριο. Ακόμη, στο περιβάλλον, οι συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων δεν είναι αρκετά αυξημένες ώστε να μας δίνουν άμεσα αποτελέσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό, οι μέχρι τώρα περιβαλλοντικές μελέτες βασίζονται σε γεγονότα ευρείας περιβαλλοντικής ρύπανσης ή γενικότερων καταστροφών-ατυχημάτων.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου σε ένα συγκεκριμένο οικοσύστημα θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι ακόλουθες προσεγγίσεις [Φλώρου.92]:

- Οι σχετικές συγκεντρώσεις ενός ραδιονουκλιδίου που ανιχνεύουμε στα στοιχεία του συστήματος μετά από ένα επεισόδιο πρόκλησης ρύπανσης (fallout)
- Η ελεγχόμενη εισαγωγή των ραδιονουκλιδίων κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε ένα σύστημα, από τον ερευνητή, ο οποίος θα παρακολουθεί τη συμπεριφορά του υλικού σε σχέση με το χρόνο.

- Η μοντελοποίηση του συστήματος και η εφαρμογή στο θεωρητικό μοντέλο των ταχυτήτων μεταφοράς και άλλων δεδομένων, ώστε να προβλεφθούν οι συγκεντρώσεις.

Για την επίτευξη της μέγιστης αξιοπιστίας ενός προγνωστικού μοντέλου, οι ραδιοοικολόγοι χρησιμοποιούν όλες τις παραπάνω προσεγγίσεις μεμονωμένα ή και συνδυαστικά. Σε κάθε περίπτωση, η βέλτιστη κατανόηση και πρόβλεψη των οικολογικών μηχανισμών απαιτεί συνδυασμό των θεωρητικών και πειραματικών προσεγγίσεων.

Η παρατηρούμενη συμπεριφορά των ραδιονουκλιδίων που εμπλέκονται σε ένα οικοσύστημα, μπορεί να δώσει βασικές πληροφορίες για αυτό. Για παράδειγμα, ένα βασικό τμήμα της επιστημονικής γνώσης των ατμοσφαιρικών κινήσεων, των ρευμάτων των ωκεανών και της μεταφοράς των ορυκτών, έχει αναπτυχθεί βάσει των μετρήσεων των ραδιενεργών τους ρυπαντών. Τα αποτελέσματα της ραδιενεργούς επίπτωσης (fallout) εισήγαγαν στο περιβάλλον έναν ιχνηθέτη, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μελέτη των κινήσεων των περιβαλλοντικών υλικών.

### **3.2.3. Ραδιενέργεια Υγρού-Υδάτινου Περιβάλλοντος (Aquatic Environment)**

Η μεταφορά της ραδιενέργειας στο υδάτινο οικοσύστημα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:

- Το μέγεθος, το σχήμα και το βάθος, τα γεωμετρικά δηλαδή μεγέθη του συστήματος.
- Το θερμοκρασιακό προφίλ του συστήματος (θερμοβαθμίδα).  
Η θερμοκρασία είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες και επιδρά σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, επηρεάζοντας την επιβίωση, την αναπαραγωγή, την ανάπτυξη, την αύξηση, τη μετανάστευση κ.λ.π. των οργανισμών.
- Η επίδραση των υπόγειων υδάτων (underground waters).
- Η αλατότητα (salinity), παράγοντας που επηρεάζει κυρίως την ποικιλία των οργανισμών που ζουν σε ένα βιότοπο.
- Η επίδραση του καιρού.

Πιο συγκεκριμένα, οι άνεμοι μπορεί να επιφέρουν σημαντική επιφανειακή μείξη. Οι έντονες βροχοπτώσεις προκαλούν αραίωση των υδάτων με αποτέλεσμα να μειώνεται η αλατότητα και γενικά όλη η συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών στο νερό. Αντίθετα, η παρατεταμένη έλλειψη βροχοπτώσεων, σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες, μπορεί να μειώσει σημαντικά το ύψος της υδάτινης στήλης, αυξάνοντας κατά πολύ τη συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών. Τέλος οι πάγοι τον χειμώνα στις λίμνες και τα ποτάμια επηρεάζουν σημαντικά τη μεταφορά και τη διασπορά της ραδιενέργειας.

- Οι παλίρροιες (tides) και τα ρεύματα.
- Η συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου (pH).

Η συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου στο νερό επηρεάζει τον μεταβολισμό ζώων και φυτών, αλλά είναι δύσκολος ο λεπτομερής καθορισμός των επιδράσεων αυτών. Οι διαφορές των τιμών του pH μεταξύ των διαφόρων περιοχών είναι ασήμαντες, ενώ οι εποχιακές μεταβολές μικρές. Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται το χειμώνα και οι υψηλότερες την άνοιξη και το καλοκαίρι. Στο θαλασσινό νερό παρατηρείται μία σχετική σταθερότητα στην τιμή του pH, οφειλόμενη κυρίως στη φύση του θαλασσινού νερού, και κυμαίνεται στην αλκαλική περιοχή (>8).

- Το διαλυμένο οξυγόνο (DO).

Η ύπαρξη του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό είναι ζωτικής σημασίας για τους υδρόβιους οργανισμούς και τα ψάρια. Η περιεκτικότητα του νερού σε διαλυμένο οξυγόνο εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η θερμοκρασία (με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται μείωση της διαλυτότητας του οξυγόνου στο νερό), η ποσότητα των ιζημάτων, η ποσότητα που καταναλώνεται από τους υδρόβιους οργανισμούς, η ποσότητα που προκύπτει από τη φωτοσύνθεση, ο κυματισμός και η αλατότητα. Η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου μετράται σε mg/l ή σε ppm.

- Εάν το νερό είναι έγκλειστο ή ρέει ελεύθερα.

Η εξάτμιση του νερού από τις θάλασσες, τις λίμνες, τα ποτάμια και τα επιφανειακά ύδατα ακολουθεί έναν υδρογεωλογικό κύκλο της γης (Εικόνα 3.9). Ο χρόνος ενός κύκλου επαναφοράς του νερού στα υδάτινα οικοσυστήματα ποικίλλει από κάποιες ώρες μέχρι πολλά χρόνια. Υπάρχουν όμως και νερά με τη μορφή αιωνίων χιονιών και

παγετώνων σε πολύ ψηλά βουνά, ή τα νερά που είναι βαθιά σε λίμνες ή στο έδαφος (υπόγεια νερά), τα οποία δεν επιστρέφουν στις θάλασσες για εκατομμύρια χρόνια.

### 3.2.4. Ραδιενέργεια Θαλάσσιου περιβάλλοντος (Marine environment)

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η παρούσα μελέτη θέτει ως βασικό γνώμονα την συμπεριφορά και διασπορά των ραδιονουκλιδίων (φυσικών και τεχνητών) αποκλειστικά και μόνο στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η ραδιολογική μελέτη περιλαμβάνει τα αβιοτικά στοιχεία του θαλάσσιου περιβάλλοντος (θαλασσινό νερό - ίζημα) και τους οργανισμούς που ζουν σε αυτό και πιο συγκεκριμένα τα ψάρια.

Είναι προφανές πως η ραδιενέργεια στο θαλάσσιο περιβάλλον πάντα χάνεται, λόγω της ραδιενεργού διάσπασης. Η ραδιενέργεια από το υδάτινο οικοσύστημα μεταφέρεται στον άνθρωπο μέσω της κατάποσης, της αναπνοής ή και έμμεσα μέσω της τροφής. Δεδομένου λοιπόν ότι ο άνθρωπος είναι ο τελικός αποδέκτης των κάθε λογής τεχνητών και φυσικών ραδιονουκλιδίων που προέρχονται από τη θάλασσα, γίνεται αντιληπτή η αναγκαιότητα μελέτης των μηχανισμών διασποράς τους στο θαλάσσιο περιβάλλον. Στη συγκεκριμένη έρευνα τα ραδιονουκλίδια που θα εξεταστούν από την οικογένεια των φυσικών, το  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  και από τα τεχνητά το  $^{137}\text{Cs}$ . Η επιλογή των συγκεκριμένων στοιχείων της φυσικής ραδιενέργειας έγινε με γνώμονα την σημαντικότητά τους, ως προς την αφθονία τους στο περιβάλλον και τη σχέση τους με τους οργανισμούς. Από την άλλη, το  $^{137}\text{Cs}$  αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο τεχνητής προέλευσης, ως αποτέλεσμα της ραδιενεργού επίπτωσης, λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής και της ραδιοτοξικότητάς του για τους οργανισμούς.

#### 3.2.4.1. Αβιοτικά Στοιχεία

##### ο Θαλασσινό Νερό

Το νερό των ωκεανών είναι ένα πολύπλοκο διάλυμα το οποίο περιέχει, έστω και σε ίχνη, όλα τα στοιχεία που συναντώνται στη γη. Παρόλα αυτά μόνο έξι συνιστούν το 99% όλων των διαλυμένων ουσιών (το χλώριο, το νάτριο, το θείο, το μαγνήσιο, το ασβέστιο και το κάλιο). Το θαλασσινό νερό αποτελείται κατά 96,7% από καθαρό νερό. Το υπόλοιπο 3,3%

συντίθεται κατά βάση από χλωριούχο νάτριο ( $\text{NaCl}$ , το γνωστό μας αλάτι), και από μέταλλα και ιχνοστοιχεία που, αν και σε μικρότερες ποσότητες, είναι πολύ σημαντικά.

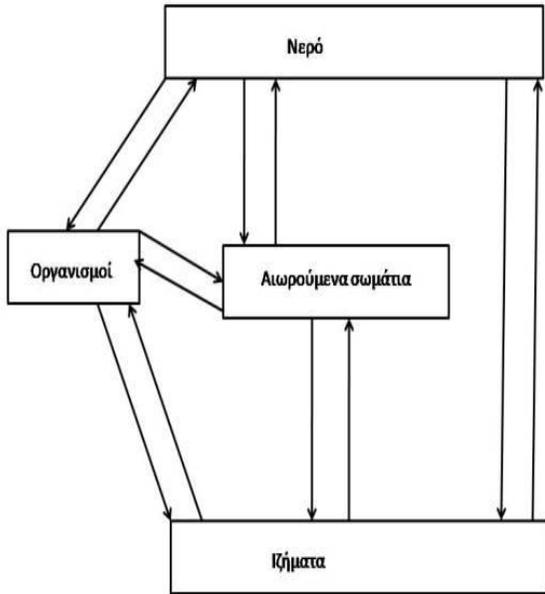


Εικόνα 3.9: Ο Υδρολογικός Κύκλος του νερού [USGS web].

Το περιβάλλον των ανοικτών ωκεανών παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα για τα υδρόβια οικοσυστήματα και την ανάπτυξή τους, σε σχέση με τις παράκτιες περιοχές θαλασσών και ποταμών, τις λίμνες καθώς και τις κλειστές θάλασσες (όπως είναι η Μεσόγειος). Γεγονός που είναι κατανοητό, καθώς στα πιο κλειστά οικοσυστήματα καθίστανται πιο εύκολα δυνατές οι αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών, επηρεάζοντας άμεσα και τη βιομάζα. Στην ίδια λογική, στα ανοικτά θαλάσσια οικοσυστήματα δεν παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις ραδιενεργών ρυπαντών, λόγω των μετακινήσεων των θαλάσσιων μαζών, σε αντίθεση με τα κλειστά θαλάσσια οικοσυστήματα, στα οποία η ανανέωση των υδάτων είναι πολύ αργή.

Η κατανομή και η συμπεριφορά των ραδιονουκλιδίων στο θαλασσινό νερό των παράκτιων οικοσυστημάτων είναι άμεσα εξαρτώμενη από τους τοπογραφικούς και τους γεωφυσικούς παράγοντες που τα αφορούν (Κεφ. 3.2.3). Τα ραδιονουκλίδια στο θαλάσσιο περιβάλλον διασπείρονται σε τρεις μορφές: σε ιοντική μορφή, σε κolloειδή μορφή ή σε σωματιδιακή μορφή. Ο χρόνος παραμονής των ραδιονουκλιδίων στη στήλη του νερού,

εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την φυσικοχημική κατάσταση στην οποία βρίσκονται στο νερό[Φλώρου.92].



Εικόνα 3.10: Μεταφορά ραδιενέργειας στις συνιστώσες των υδάτινων οικοσυστημάτων. [EcoDo-net web]

Ο διαχωρισμός των ραδιονουκλιδίων σε διαλυτά και στερεά (αιωρούμενα) έχει πολύ μεγάλη σημασία στην μακροπρόθεσμη και βραχυπρόθεσμη μεταφορά τους στο θαλάσσιο περιβάλλον (Εικόνα 3.10). Όταν τα ραδιονουκλίδια που εισάγονται στο θαλάσσιο περιβάλλον παραμένουν σε διαλυτή μορφή (conservative), μεταφέρονται μέσω της υδραυλικής ροής των υδάτων, από το σημείο εισόδου, σε μεγάλες αποστάσεις, και κατανέμονται στην υδάτινη στήλη. Αντίθετα, τα ραδιονουκλίδια που βρίσκονται προσροφημένα στα αιωρούμενα σωματίδια (non-conservative) απομακρύνονται εντελώς από την

υδάτινη στήλη και καταλήγουν στα ιζήματα.[Ευαγγελίου.09]

Η κατακόρυφη μείξη του θαλασσινού νερού περιλαμβάνει τρία διακριτά στρώματα [Παπαστ.10]:

1. *Το επιφανειακό στρώμα*, που εκτείνεται μερικές εκατοντάδες μέτρα (το μέσο βάθος είναι περίπου 75m) και το οποίο είναι διαπερατό από το ηλιακό φως. Είναι το στρώμα το οποίο υφίσταται το μεγαλύτερο ποσοστό της ζωής του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Μάλιστα το επιφανειακό στρώμα χαρακτηρίζεται με τη μεγαλύτερη κινητικότητα και μείξη από παλίρροιες και ρεύματα, που οφείλονται κατά κύριο λόγο στη δράση του ανέμου.
2. *Το ενδιάμεσο στρώμα*, που είναι ένα στρώμα πάχους περίπου 1000m. Σε αυτό η θερμοκρασία μειώνεται και η πυκνότητα αυξάνεται ταχύτατα με το βάθος. Υπάρχει κινητικότητα και μείξη σε μικρό βαθμό, αν και υπάρχουν ρεύματα που κινούνται οριζόντια λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Η χρήση ραδιοϊχνηθετών (radiotracers) απέδειξε την επιρροή μόνο της οριζόντιας κίνησης παρά της κατακόρυφης.

3. Τα βάθη των ωκεανών, στα οποία η οριζόντια διάλυση είναι πάρα πολύ μικρή, όπως και η κινητικότητα (ταχύτητα κίνησης της τάξης του 1mm/sec). Η κατακόρυφη διάχυση είναι ακόμα μικρότερη (της τάξης του 1m/year).

ο **Ίζημα**

Τα θαλάσσια ιζήματα αποτελούν μέρος του θαλάσσιου συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει το υδατικό στοιχείο, τον πυθμένα και κάτω από αυτόν, και το σύνολο των οργανισμών που ζουν, τρέφονται και αναπτύσσονται σε αυτό. Τα ιζήματα είναι διαφόρων μεγεθών ανόργανοι και οργανικοί κόκκοι οι οποίοι καθιζάνουν, διαμέσου της υδάτινης στήλης, και εναποτίθενται στον πυθμένα σχηματίζοντας, στο πέρασμα του γεωλογικού χρόνου, ένα κάλυμμα. Τα κατατάσσουμε σε διάφορες κατηγορίες με κριτήρια το μέγεθος των κόκκων, τη σύστασή τους και το περιβάλλον απόθεσής τους. Η διασπορά των ρύπων στο ίζημα και η επίδρασή τους στο οικοσύστημα ποικίλλει, εξαρτώμενη άμεσα από τα τρία παραπάνω κριτήρια.

Τα θαλάσσια ιζήματα προέρχονται:

- από την αποσάθρωση και τη διάβρωση των πετρωμάτων της χέρσου
- από τη δραστηριότητα των θαλάσσιων οργανισμών
- από τις χημικές διεργασίες που αναπτύσσονται στο περιβάλλον των ωκεανών
- από τις ηφαιστειακές εκρήξεις
- από το διάστημα

Πίνακας 3.2: Κατάταξη ιζημάτων βάσει του μεγέθους των κόκκων [Ζαχαρίας,04]

Κοκκομετρική Τάξη	Κοκκομετρική κλάση	Διάμετρος Κόκκων (mm)
Ογκόλιθοι (boulders)	Ψηφίτες (gravel)	256-1024
Κροκάλες (cobbles)	Ψηφίτες (gravel)	64-256
Βότσαλα (peddles)	Ψηφίτες (gravel)	4-64
Ψηφίδες (granules)	Ψηφίτες (gravel)	2-4
Άμμος (sand)	Άμμος (sand)	0,062-2
Πηλός (silt)	Ιλύς (mud)	0,004-0,062
Άργιλος (clay)	Ιλύς (mud)	<0,004

Γενικά τα θαλάσσια ιζήματα παραμένουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα στο χώρο απόθεσής τους, γι' αυτό μας δίνουν αρκετές πληροφορίες για το χώρο προέλευσής τους αλλά και για τον χρόνο απόθεσής τους. Αποτελούν συνεπώς ένα καλό δείκτη της ρύπανσης σε μία περιοχή, αλλά και της εξέλιξής της. Ακόμη το ίζημα είναι και ο τελικός αποδέκτης των ρυπογόνων στοιχείων στη θάλασσα, αποτελώντας σημαντική παράμετρο αξιολόγησης της οικολογικής κατάστασης μιας περιοχής. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως η μελέτη των ραδιενεργών ρυπαντών στα ιζήματα συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση της περιβαλλοντικής διασποράς και συμπεριφοράς των ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Τα ραδιονουκλίδια που καταλήγουν στο θαλάσσιο περιβάλλον συγκρατούνται από τα ιζήματα σύμφωνα με τις παρακάτω διαδικασίες: [Γκαραγκ.05]

- Δέσμευση στα αιωρούμενα σωματίδια και ιζηματογένεση.
- Άμεση καθίζηση σε κολλοειδή μορφή.
- Άμεση δέσμευση από απορρόφηση.
- Απόθεση οργανικών αποβλήτων που έχουν ήδη συγκρατήσει ραδιονουκλίδια.

Η συγκέντρωση των ραδιοϊσοτόπων εξαρτάται από την απόσταση τους από την ακτή, το βάθος της υδάτινης στήλης, την εισαγωγή λεπτομερούς υλικού μέσω αέρα ή ποταμών, την υποθαλάσσια μορφολογία και τη γεωχημική σύσταση των ιζημάτων. Η διασπορά και η κατανομή τους στα ιζήματα ποικίλλουν ανάλογα με τις οικολογικές διεργασίες της εκάστοτε περιοχής αλλά και από τις συνθήκες του υδάτινου περιβάλλοντος που αναλύσαμε πιο πάνω (αλατότητα, pH, χλωριότητα κ.α). Η συμπεριφορά των ραδιονουκλιδίων στο ίζημα είναι άμεσα εξαρτώμενη με τις βιογεωχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτό, αλλά επηρεάζονται σημαντικά και από τις δραστηριότητες των ζωντανών οργανισμών, καθώς μπορεί να επιφέρουν αναταραχές επιφανειακά στο ίζημα.

Η καθίζηση-εναπόθεση των ραδιονουκλιδίων στο ίζημα εξαρτάται από τη διαλυτότητα ή μη των ραδιονουκλιδίων στο θαλασσινό νερό. Τα ραδιονουκλίδια ανάλογα με την χημεία τους ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες. Στα υψηλής διαλυτότητας στοιχεία (π.χ τα ισότοπα του καισίου, στροντίου, ιωδίου) και τα στοιχεία ενεργού αντίδρασης με τα σωματίδια του νερού (particle reactive isotopes) (π.χ τα ισότοπα του ρουθηνίου, τα υπερουράνια στοιχεία

κ.α). Τα αδιάλυτα στοιχεία παρουσιάζουν μικρότερο χρόνο διείσδυσης στην υδάτινη στήλη σε σχέση με τα διαλυτά.

Όπως έχει αναφερθεί, τα μη διαλυτά ραδιονουκλίδια έχουν την τάση να συνδέονται με αιωρούμενα σωματίδια, με αποτέλεσμα να απομακρύνονται από την υδάτινη στήλη με φυσικούς μηχανισμούς, και να οδηγούμαστε σταδιακά στην ιζηματογένεση. Ραδιονουκλίδια προσροφημένα σε κολλοειδή συστατικά ή σε πολύ λεπτόκοκκα στερεά, μεταφέρονται από τη ροή των ρευμάτων, με τον ίδιο περίπου τρόπο μεταφοράς των διαλελυμένων ραδιονουκλιδίων. Αντίθετα, ραδιονουκλίδια συνδεδεμένα με χονδρόκοκκα σωματίδια απορρίπτονται από την υδάτινη στήλη και διασπείρονται με διεργασίες μεταφοράς ιζημάτων. Η ταχύτητα καθίζησης και εναπόθεσης ενός ραδιονουκλιδίου στο υπόστρωμα εξαρτάται από τη διαλυτότητά του στο θαλασσινό νερό και από το πόσο εύκολα ενσωματώνεται στα αιωρούμενα σωματίδια. Τέλος, μπορούμε να συμπεράνουμε πως κυρίαρχη σημασία στην συγκέντρωση, κατανομή, διασπορά του ραδιονουκλιδίου στο ίζημα παίζει η κοκκομετρία του ιζήματος.

### 3.2.4.2. Τα Φυσικά Ραδιονουκλίδια στο Θαλάσσιο Περιβάλλον

Η μελέτη των συγκεντρώσεων των φυσικών ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον συμβάλλει στην χαρτογράφηση της φυσικής ραδιενέργειας στη θάλασσα αλλά και στην εκτίμηση των δόσεων που λαμβάνονται από τους οργανισμούς και στον υπολογισμό των παραγόντων συγκέντρωσης, προσρόφησης και βιοσυσώρευσης των ραδιονουκλιδίων από αυτούς. Ακόμη τα φυσικά ραδιονουκλίδια μας δίνουν πληροφορίες για τη σύσταση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, και οι συγκεντρώσεις τους στα ιζήματα αξιοποιούνται για την επαλήθευση των μηχανισμών <sup>6</sup>ιζηματογένεσης.

Στην παρούσα εργασία τα φυσικά ραδιονουκλίδια που θα μελετηθούν είναι το <sup>40</sup>K, τα ισότοπα του θορίου <sup>232</sup>Th και <sup>228</sup>Th, τα ισότοπα του ραδίου <sup>226</sup>Ra και <sup>228</sup>Ra και το <sup>238</sup>U. Τα παραπάνω βρίσκονται σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον και έχουν σημαντική αλληλεπίδραση με τους ζωντανούς οργανισμούς. Η μεγαλύτερη όμως συνεισφορά στη ραδιενέργεια του θαλασσινού νερού είναι εκείνη του <sup>40</sup>K.

Η διαλυτότητα των ακτινίδων στο θαλασσινό νερό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το pH, η ευκολία σε συμπλοκοποίηση με διάφορους υποκαταστάτες (όπως ανθρακικά, φωσφορικά συστατικά κ.α.) και η προσρόφηση τους σε επιφάνειες ορυκτών, κολλοειδών και άλλων σωματιδίων σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν ζεύγη των σειρών ουρανίου-θορίου που σε συνάρτηση μεταξύ τους, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του χρόνου παραμονής και της ταχύτητας καθίζησης των βλαβερών ουσιών σε ορισμένες περιοχές, αλλά και σαν ιχνηθέτες για χημικές ουσίες στο θαλάσσιο περιβάλλον. Στα ιζήματα, η αναλογία των συγκεντρώσεων του εκάστοτε φυσικού ραδιονουκλιδίου μεταξύ υδάτινης/λιθογενούς φάσης συμβάλλει στην εξακρίβωση των μηχανισμών ιζηματογένεσης, αλλά και λήψης, κατακράτησης του ραδιοϊσοτόπου από τους οργανισμούς [Φλώρου.01].

Παρακάτω (Πίνακας 3.3, Πίνακας 3.4) παρατίθενται κάποιες ενδεικτικές βιβλιογραφικές μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των υπό εξέταση φυσικών ραδιονουκλιδίων στο θαλασσινό νερό και στα θαλάσσια ιζήματα:

<sup>6</sup> Η ιζηματογένεση είναι η διαδικασία μεταφοράς και εναπόθεσης των σωματιδίων στον πυθμένα.

Πίνακας 3.3: Συγκεντρώσεις φυσικών ραδιοουκλιδίων στο θαλασσινό νερό [Hosseini.05],[Φλώρου.92]

Ραδιοουκλίδιο	Half-life (years)	Median concentration (Bq/m <sup>3</sup> filtered seawater)	Μέση τιμή ειδικής ενεργότητας σε δείγματα θαλασσινού νερού του Αιγαίου Πελάγους (Ελλάδα) (Bq/m <sup>3</sup> )
<sup>40</sup> K	1.28×10 <sup>9</sup>	18000	10660
<sup>226</sup> Ra	1600	2	1,5
<sup>228</sup> Ra	5.75	1	3,2
<sup>228</sup> Th	1.91	0.05	0,01
<sup>232</sup> Th	1.4×10 <sup>10</sup>	0.001	-
<sup>238</sup> U	4.47×10 <sup>9</sup>	40	38

Πίνακας 3.4: Συγκεντρώσεις φυσικών ραδιοουκλιδίων σε θαλάσσια ιζήματα [Stricht.01], [Φλώρου.92]

Ραδιοουκλίδιο	Half-life (years)	Median concentration (Bq/kg dry weight)	Μέση τιμή ειδικής ενεργότητας σε δείγματα θαλασσινού ιζήματος του Αιγαίου Πελάγους (Ελλάδα) (Bq/kg)
<sup>40</sup> K	1.28×10 <sup>9</sup>	400	517
<sup>226</sup> Ra	1600	30	25
<sup>228</sup> Ra	5.75	-	-
<sup>228</sup> Th	1.91	21	-
<sup>232</sup> Th	1.4×10 <sup>10</sup>	9	26
<sup>238</sup> U	4.47×10 <sup>9</sup>	10	36

(-) δεν ανιχνεύτηκε το ραδιοουκλίδιο με την μέθοδο της γ-φασματομετρίας

Από τις βιβλιογραφικές ενδεικτικές συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιοουκλιδίων στο θαλασσινό νερό και το ιζήμα που καταγράφονται στους παραπάνω πίνακες παρατηρείται ότι το K-40, με μεγάλη διαφορά, και στην συνέχεια το U-238 αποτελούν τις πιο πλούσιες φυσικές ραδιενεργές πηγές τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο, όσο και στον Ελλαδικό χώρο και πιο συγκεκριμένα στην θάλασσα του Αιγαίου.

### 3.2.4.3. Το $^{137}\text{Cs}$ στο Θαλάσσιο Περιβάλλον

Το  $^{137}\text{Cs}$  αποτελεί το σημαντικότερο ραδιονουκλίδιο της ραδιενεργού επίπτωσης, με χρόνο ημιζωής 30.17y, και τις πηγές προέλευσής του μπορούμε να τις διακρίνουμε σε άμεσες και έμμεσες. Στις άμεσες πηγές συγκαταλέγονται εκείνες από όπου τα ισότοπα απελευθερώνονται άμεσα στο περιβάλλον, ενώ στις έμμεσες εκείνες στις οποίες τα ισότοπα έχουν δεσμευτεί από κάποιο μέσο και έχουν απελευθερωθεί αργότερα στο περιβάλλον. Η απελευθέρωση ισοτόπων από έμμεσες πηγές μπορεί να οδηγήσει τοπικά σε υψηλές συγκεντρώσεις πολλά χρόνια έπειτα από την έκλυση τους από μια άμεση πηγή.

Άμεσες πηγές είναι:

- ο Οι ατομικές δοκιμές (Ατόλη Μορουρόα, Νησιά Μπικίνι, Novaya Zemlya κ.α), από το 1945 έως το 1980, ιδιαίτερα τις περιόδους 1952-1954, 1956-1957 και 1961-1962, που συνετέλεσαν στην εξάπλωση των ραδιενεργών ισοτόπων του Cs σε ολόκληρη τη γη.
- ο Τα πυρηνικά ατυχήματα (τα σημαντικότερα καταγράφηκαν στο Chernobyl (Ουκρανία) το 1986, στο οποίο εκτιμάται πως ελευθερώθηκαν  $10^6\text{Ci } ^{137}\text{Cs}$  (Εικόνα 3.11, Εικόνα 3.12), στο Three Miles Island (ΗΠΑ) το 1979 στο οποίο εκτιμάται πως ελευθερώθηκαν  $10^6\text{Ci } ^{137}\text{Cs}$ ) και το πιο πρόσφατο το 2011 στην μονάδα 1 του πυρηνικού σταθμού  $^7\text{Fukushima Dai-ichi}$  στην Ιαπωνία (Εικόνα 3.13, Εικόνα 3.14)).
- ο Τα απόβλητα και οι διαρροές πυρηνικών εργοστασίων.
- ο Τα απόβλητα επανεπεξεργασίας πυρηνικών κατάλοιπων.
- ο Μικρής έκτασης διαρροές από ερευνητικά εργαστήρια και ινστιτούτα.

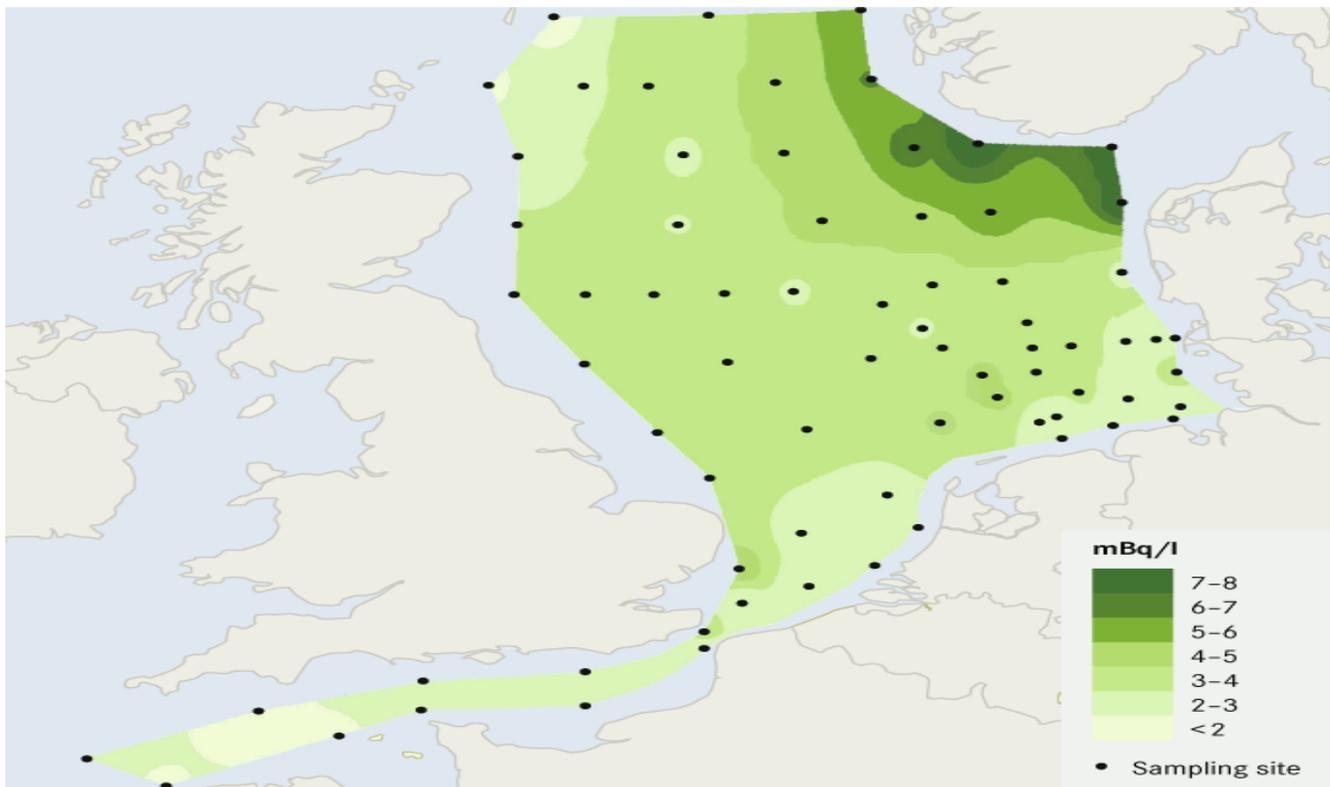
Στις έμμεσες πηγές συγκαταλέγονται:

- ο Η μεταφορά ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$  από ποταμούς από τη μολυσμένη λεκάνη απορροής τους.
- ο Η αποδέσμευση ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$  από πάγους που λιώνουν.
- ο Η καταβύθιση εμπλουτισμένων σε  $^{137}\text{Cs}$  προϊόντων απέκκρισης ζωοπλαγκτού που τρέφεται στα επιφανειακά στρώματα με φυτοπλαγκτόν.

<sup>7</sup> Αξίζει να σημειωθεί πως το ατύχημα στον σταθμό της Fukushima κατατάσσεται στο επίπεδο 4 βάσει της διεθνούς κλίμακας INES (πυρηνικό ατύχημα με μόνο τοπικές επιπτώσεις). Συγκριτικά το ατύχημα στο Chernobyl ήταν στο επίπεδο 7, ενώ στο Three Miles Island στο επίπεδο 5.

ο Η μεταφορά από ανέμους που πνέουν στις έρημους και μεταφέρουν λεπτόκοκκα ιζήματα (πχ. από τη Σαχάρα προς το Μεσογειακό χώρο).

Το  $^{137}\text{Cs}$  αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τεχνητά ραδιονουκλίδια από πλευράς ραδιενεργού ρύπανσης, λόγω του μεγάλου χρόνου ημίσειας ζωής του, του τύπου ακτινοβολίας και της βιοσυσώρευσης του από τους οργανισμούς. Το καίσιο, όπως και άλλα αλκαλικά μέταλλα, βρίσκεται σε ιοντική μορφή στο θαλασσινό νερό. Η επιβάρυνση όμως της ραδιενεργού επίπτωσης άλλαξε αυτή την κατάσταση, συνεπώς το 70% του καισίου στο θαλασσινό νερό βρίσκεται σε ιοντική μορφή, το 23% απορροφημένο σε σωματίδια και το 7% σε κολλοειδή μορφή. [Φλώρου.92]

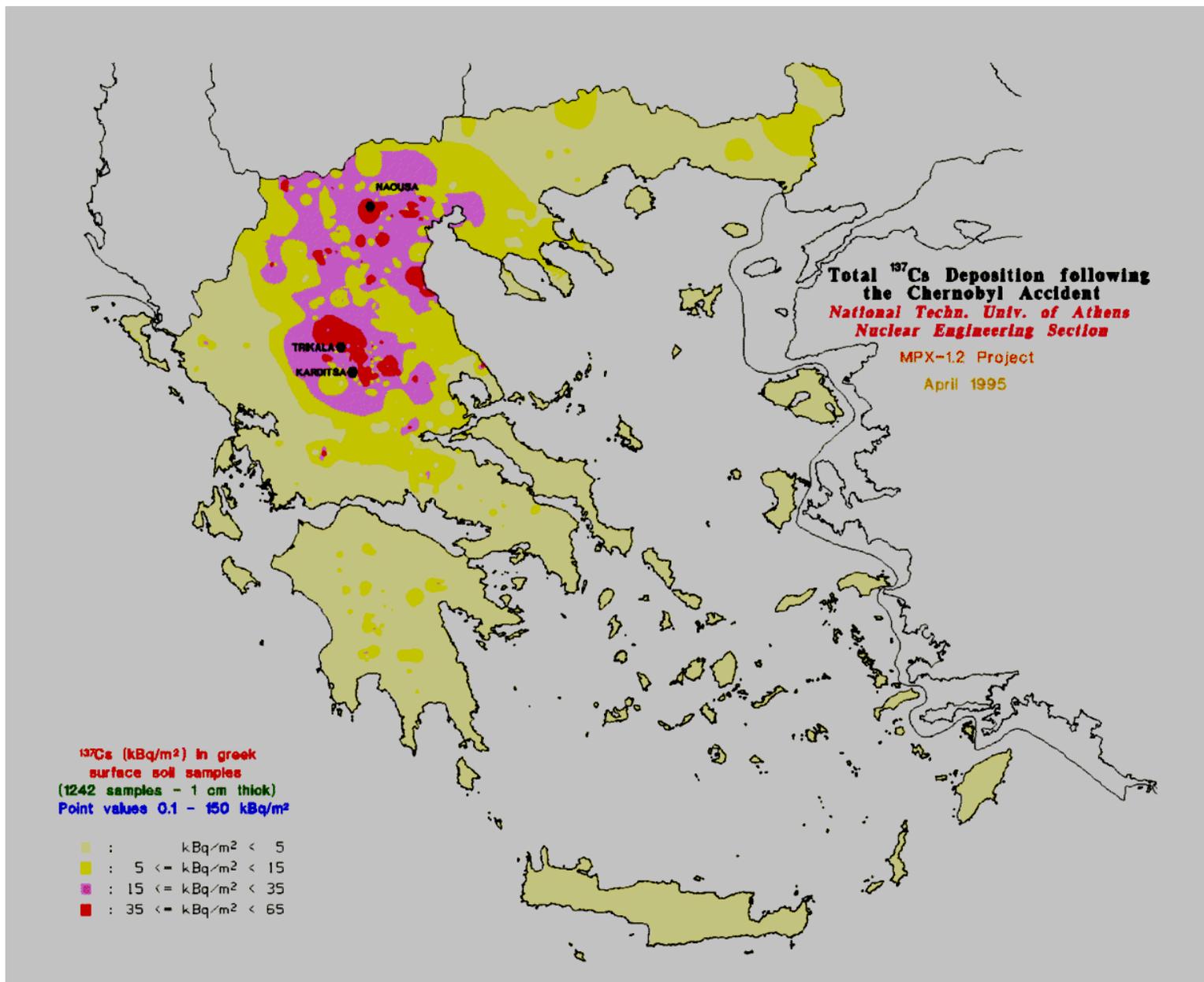


Εικόνα 3.11: Οι συγκεντρώσεις του  $^{137}\text{Cs}$  στη Βόρεια Θάλασσα ως αποτέλεσμα του Chernobyl fallout από τη Βαλτική [OSPAR web].

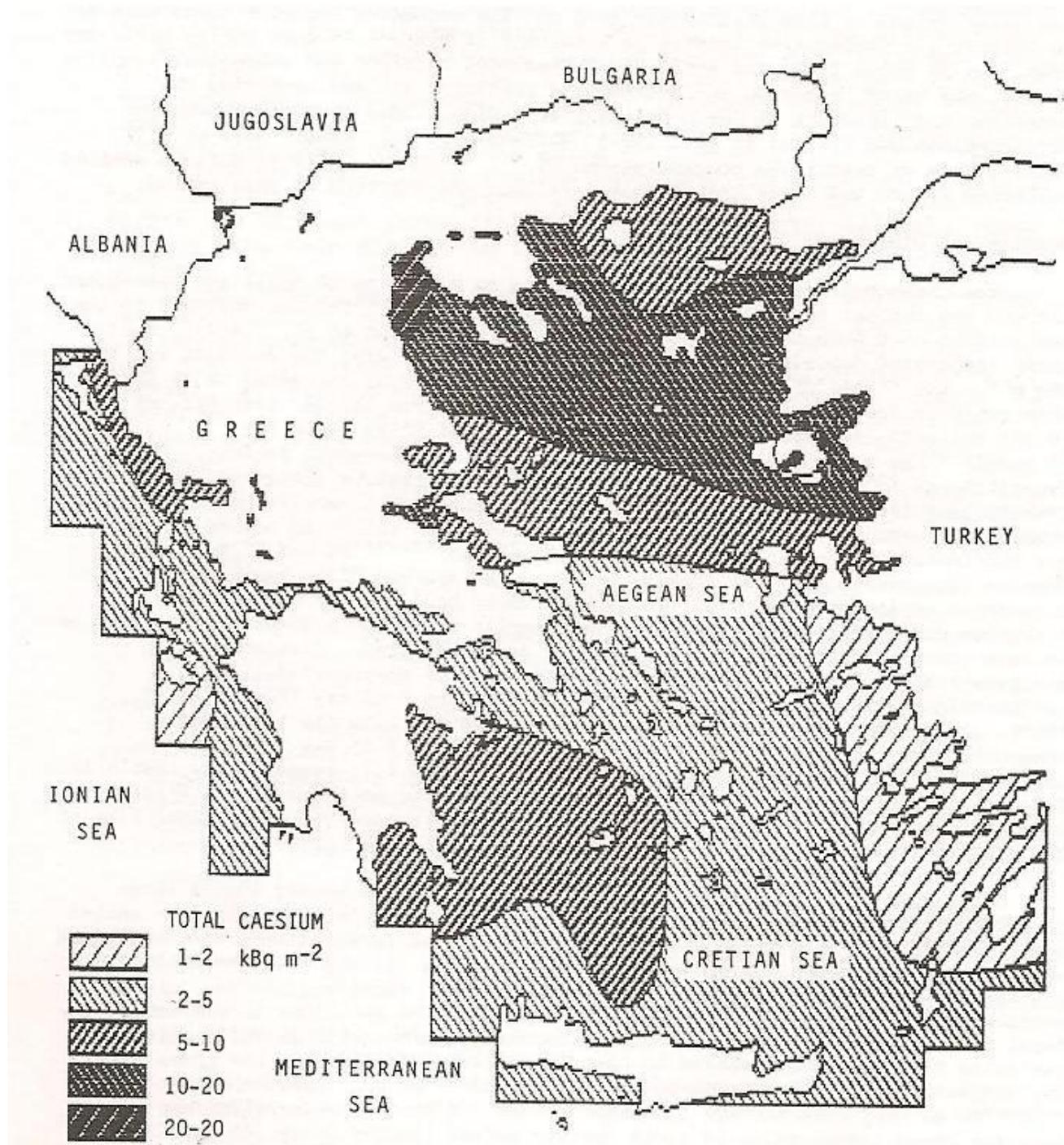
Η συμπεριφορά και κατανομή του καισίου στο θαλασσινό νερό των παράκτιων οικοσυστημάτων εξαρτάται, εκτός από την διάλυση και διάχυσή του στη μάζα του νερού, και από τις πολύπλοκες τοπογραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες, τις αλλαγές στην αλατότητα, τη χλωριότητα και το pH του νερού. Το  $^{137}\text{Cs}$  συγκαταλέγεται στα υψηλής διαλυτότητας στοιχεία

Η ταχύτητα διασποράς του και κατανομής του στην υδάτινη στήλη και καταβύθησής του στον πυθμένα είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή των ραδιονουκλιδίων που ενσωματώνονται στα σωματίδια του νερού. Παραμένει δηλαδή για μεγάλο χρονικό διάστημα στην υδάτινη στήλη και εξαπλώνεται με την κίνηση μαζών του νερού. Η ταχύτερη μεταφορά του σε μεγαλύτερα βάθη της υδάτινης στήλης συνδέεται με τη βιοσυσσώρευσή του στους θαλάσσιους οργανισμούς, οι οποίοι μεταναστεύουν σε μεγαλύτερα βάθη ή αποσυντίθενται [Ευαγγελίου.09].

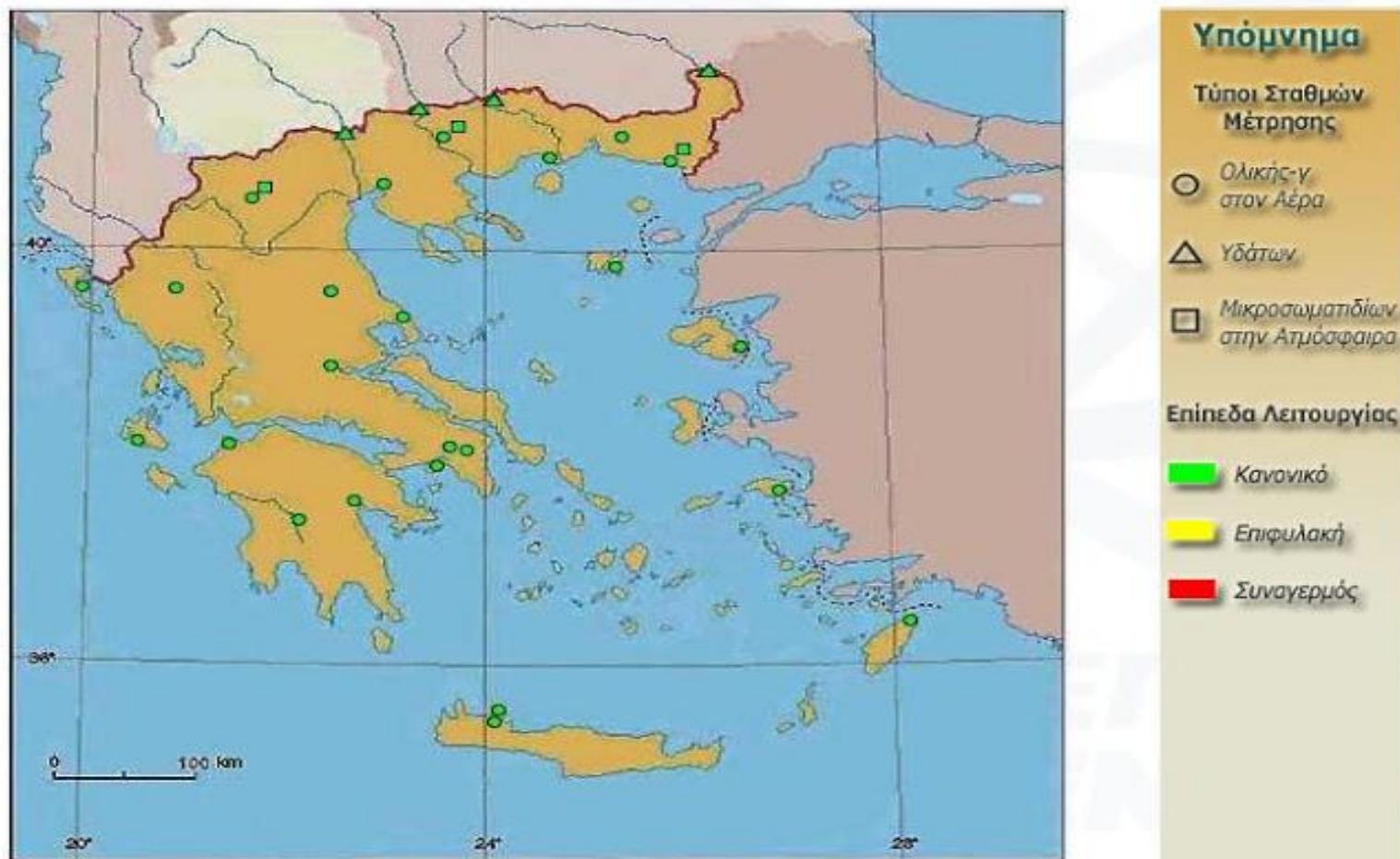
Ο κύριος λόγος μελέτης του  $^{137}\text{Cs}$  στα θαλάσσια ιζήματα είναι για τον προσδιορισμό του ρυθμού ιζηματογένεσης μιας θαλάσσιας περιοχής. Αυτό είναι λογικό, καθώς οι μέγιστες τιμές του λαμβάνονται ως δείκτες χρονικών στιγμών που εκλύθηκαν μεγάλες ποσότητες από αυτό (πχ. στο Chernobyl). Για να επιτευχθεί όμως αυτό απαιτείται γνώση των συγκεντρώσεων του πριν αυτές εμπλουτιστούν από την εξωτερική πηγή. Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνονται και πρόσθετα στοιχεία υπόψη, όπως η κίνηση και η διαλυτότητα του ισοτόπου, η ικανότητα αποθήκευσης από τα ιζήματα κλπ.



Εικόνα 3.12: Συνολική απόθεση <sup>137</sup>Cs μετά το ατύχημα στο Chernobyl [Simop.89]



Εικόνα 3.13: Συνολική απόθεση <sup>137</sup>Cs μετά το ατύχημα στο Chernobyl στο Αιγαίο, το Ιόνιο και το Κρητικό πέλαγος [Kritidis&Florou.90].



Εικόνα 3.14: Χάρτης με τα επίπεδα ραδιενέργειας που δείχνουν οι σταθμοί του Δικτύου Μέτρησης Ραδιενέργειας μετά την έκρηξη στον σταθμό Fukushima Dai-ichi. [ΕΕΑΕ web]



### 3.2.5. Θαλάσσιοι Οργανισμοί (Ιχθείς)

Οι οργανισμοί που διαβιούν στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι οργανωμένοι σε δύο μεγάλες κατηγορίες [Χατζημπ.07]:

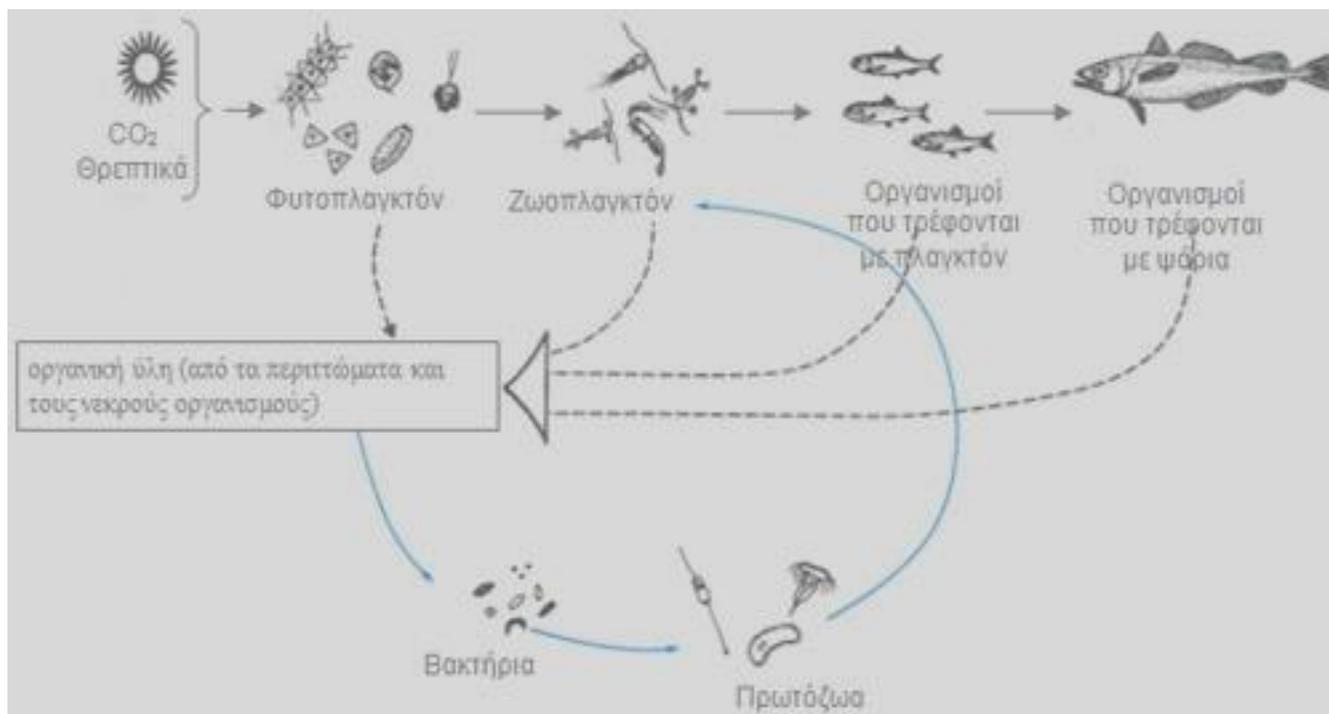
- **Στους αυτότροφους:** είναι οι οργανισμοί οι οποίοι παράγουν οργανική ουσία φωτοσυνθέτοντας και χρησιμοποιώντας θρεπτικά στοιχεία, κυρίως άζωτο και φώσφορο, που λαμβάνουν από το νερό. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το φυτοπλαγκτόν.
- **Στους ετερότροφους (ή καταναλωτές):** είναι οι οργανισμοί που δεν έχουν την ικανότητα να παράγουν οργανική ύλη αλλά την λαμβάνουν έτοιμη τρεφόμενοι από άλλους ετερότροφους οργανισμούς. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το ζωοπλαγκτόν, το νηκτόν (το σύνολο των οργανισμών με δυνατότητα ενεργητικής πλεύσης) και τα βακτήρια.

Οι σχέσεις και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των θαλάσσιων οργανισμών χαρακτηρίζονται από υψηλό επίπεδο οργάνωσης που επιτρέπει την αρμονική ανάπτυξή τους διατηρώντας συγχρόνως ισορροπίες μεταξύ των ειδών, του αριθμού τους και της διασποράς τους στο χρόνο και το χώρο. Οι εξωγενείς αρνητικές επιδράσεις επηρεάζουν τις ισορροπίες αυτές σε όλα τα τροφικά επίπεδα. Το εάν ένα οικοσύστημα θα απορροφήσει, ανακάμψει ή καταστραφεί μερικώς ή ολικώς από μία εξωγενή δράση εξαρτάται κυρίως από την ένταση, την έκταση και τη διάρκεια της πίεσης που υφίσταται.

Οι θαλάσσιοι οργανισμοί βιοσυσσωρεύουν τα διάφορα ισότοπα ανάλογα με τις μεταβολικές τους ανάγκες, που εκφράζονται σαν εκλεκτική βιοσυσσώρευση, αλλά και ανάλογα με την αφθονία των ισοτόπων στο περιβάλλον στους. Η αναγνώριση για την πρόσληψη του στοιχείου γίνεται μηχανικά, με αποτέλεσμα στη θέση των χρήσιμων και ουσιωδών στοιχείων για τον οργανισμό να προσλαμβάνουν ενίοτε ομόλογα χημικά, αλλά επιβλαβή για την υγεία και ευημερία του οργανισμού (π.χ το καίσιο στη θέση του καλίου)

Οι ραδιενεργοί ρύποι λαμβάνονται από τους θαλάσσιους οργανισμούς με δύο βασικούς τρόπους, άμεσα από το περιβάλλον και μέσω της τροφής. Στα ψάρια η κατακράτηση των μεταλλικών στοιχείων στους διάφορους ιστούς και στα όργανα, μέσω των βραγχίων, περυγίων και της επιφάνειας του σώματος αποτελεί βασική οδό προσρόφησης ραδιονουκλιδίων. Οι ποσότητες ραδιονουκλιδίων που εισέρχονται μέσω της τροφής εξαρτώνται

κυρίως από την αφθονία διαθέσιμης τροφής και την ταξινομική μονάδα των οργανισμών. Μάλιστα έχει παρατηρηθεί πως μέσω του πεπτικού τους συστήματος μεταφέρονται μικρότερες ποσότητες ραδιονουκλιδίων σε σχέση με την απευθείας απορρόφηση και προσρόφηση από το σώμα [Wood.73, NCRP.91.]

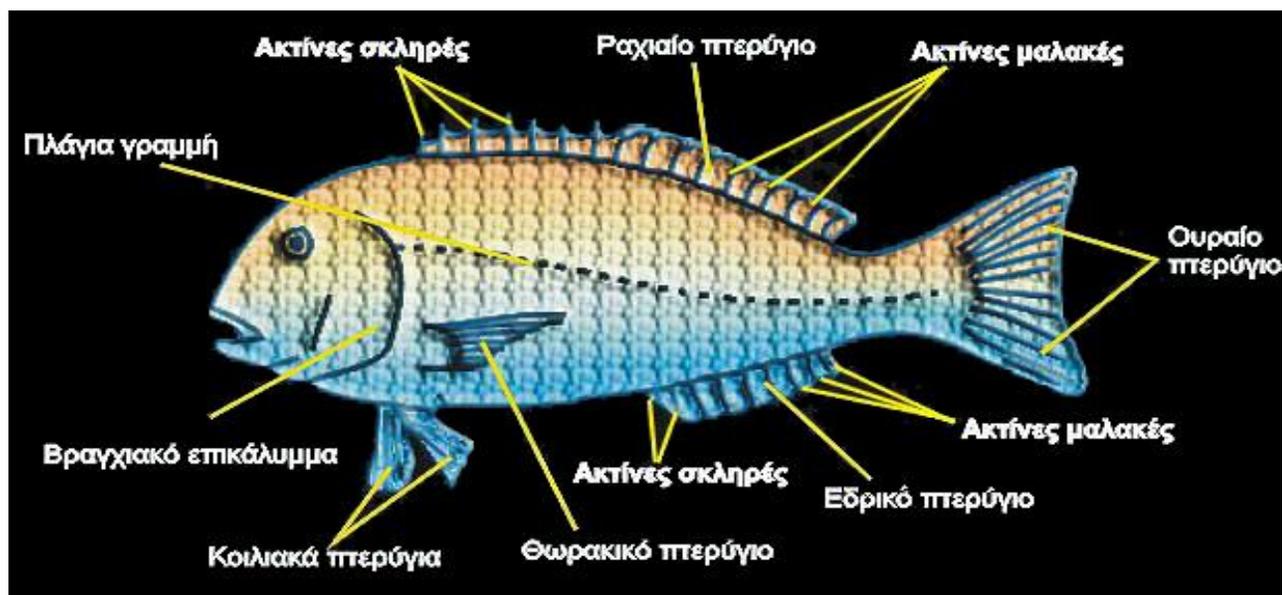


Εικόνα 3.16: Οργάνωση και κύκλος ζωής ενός θαλάσσιου οικοσυστήματος [kireas web].

Όλοι οι οργανισμοί δεν επηρεάζονται το ίδιο ή στον ίδιο βαθμό από τη ρύπανση, καθώς κάποιοι είναι περισσότερο ανθεκτικοί από άλλους ή ακόμα κάποιοι βιοσυσσωρεύουν ρύπους σε μεγαλύτερο βαθμό. Τα επίπεδα βιοσυγκέντρωσης και βιοσυσσώρευσης των ραδιενεργών ουσιών στα ψάρια, επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες (πχ. θερμοκρασία, αλατότητα), από το είδος ακτινοβολίας και τα επίπεδα συγκέντρωσης του ραδιοϊσοτόπου, το χρόνο έκθεσης του οργανισμού, καθώς και το είδος, την ηλικία, τον ιστό ή το όργανο και γενικότερα τον βιολογικό κύκλο του οργανισμού [Ζαχαρίας.04].

Βασικός παράγοντας της βιοσυσσώρευσης ραδιονουκλιδίων από τα ψάρια αποτελεί το ειδικό περιβάλλον διαβίωσής τους (habitat). Συνεπώς, ανάλογα με το πού ζουν και από πού λαμβάνουν την τροφή τους, χωρίζουμε τα ψάρια σε τρεις κατηγορίες [Φλώρου.92]:

- **Πελαγικά είδη (Pelagic Species):** τα οποία ζουν και τρέφονται αποκλειστικά στο θαλασσινό νερό.
- **Επιβενθικά-Πελαγικά είδη (Demersal-Pelagic Species):** τα οποία ζουν στην επιφάνεια των ιζημάτων, σε αρκετά μεγάλα βάθη. Τα είδη αυτά τρέφονται και από το ίζημα και από το θαλασσινό νερό, σε ποσοστό 50-50%.
- **Βενθικά είδη (Demersal Species):** τα οποία ζουν και τρέφονται αποκλειστικά μέσα στο ίζημα. Τα είδη αυτά έχουν περιορισμένη ικανότητα μετακίνησης και κατά συνέπεια μεγάλη δυνατότητα αποτύπωσης μη αναστρέψιμων αλλαγών του υδάτινου περιβάλλοντος.



Εικόνα 3.17: Εξωτερική μορφολογία ψαριού [Wikipedia web].

Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά σε ψάρια που ζουν και τρέφονται στις Ελληνικές θάλασσες και αποτελούν χαρακτηριστικούς εκπροσώπους των τριών κατηγοριών «ενδιαιτήματος» (“habitat”) που προαναφέρθηκαν. Παρακάτω ακολουθεί πίνακας (Πίνακας 3.5) με τα είδη αυτά και κάποια βασικά χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 3.5: Κατηγοριοποίηση ψαριών που θα μελετηθούν βάσει του habitat [ERL web]

Ενδιαίτημα (Habitat)	Όνομα Είδους	Κοινό Ελληνικό Όνομα	Βάθος διαβίωσης στη Θάλασσα (m)
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	Γόπα	From coast to 350m
	Spicara flexuosa	Μαρίδα	From coast to 130m
	Sardina pilchardus	Σαρδέλα	From coast to 180m
	Trachurus-trachurus	Σαφρίδι	100-200m to 600m
Επιβενθικά-πελαγικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	Λυθρίνι	20m-420m
	Mullus barbatus	Κουτσομούρα	10m-420m
Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	Γλώσσα	200m-400m

## ***ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ***

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ*

### *Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία με τη χρήση συμβατικών εξισώσεων*



#### 4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

---

Η παρούσα εργασία αφορά στον υπολογισμό του ρυθμού εξωτερικών δόσεων ακτινοβολίας γάμμα που δέχονται είδη ψαριών που ζουν και τρέφονται στις Ελληνικές Θάλασσες. Τα τελικά αποτελέσματα θα υπολογισθούν με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι μέσω των συμβατικών εξισώσεων υπολογισμού και ο δεύτερος γίνεται αυτοματοποιημένα, μέσω υπολογιστικού δοσιμετρικού μοντέλου (RESRAD-BIOTA). Ακριβώς επειδή η αναφορά γίνεται μόνο σε εξωτερικές δόσεις, γίνεται αντιληπτό πώς καταγράφονται αποκλειστικά και μόνο οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στο εκάστοτε θαλάσσιο οικοσύστημα, καθώς αποτελούν την αποκλειστική πηγή εξωτερικής έκθεσης σε ραδιενέργεια για τα ψάρια. Πιο συγκεκριμένα, τα ραδιονουκλίδια που θα εξετάζονται είναι από την οικογένεια των φυσικών, το  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  (και των θυγατρικών του  $^{228}\text{Ra}$  και  $^{228}\text{Th}$ ),  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$  και από τα τεχνητά το  $^{137}\text{Cs}$ . Οι τιμές των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων σε διάφορους σταθμούς του Αιγαίου, παραχωρήθηκαν από την Διευθύντρια Ερευνών ΕΚΕΦΕ “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ” Δρ Ελένη Φλώρου. Οι τιμές προέρχονται κυρίως από την διδακτορική της διατριβή [Φλώρου.92], αλλά και από το ευρύτερο ερευνητικό της έργο.

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, τα αβιοτικά στοιχεία του θαλάσσιου οικοσυστήματος είναι το θαλασσίνο νερό και το ίζημα, άρα αποτελούν και δύο διαφορετικές πηγές εξωτερικής έκθεσης για τους οργανισμούς. Συνεπώς για το ίδιο ραδιονουκλίδιο, στο ίδιο δείγμα, θα προκύπτουν δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις του, μία για το νερό και μία για το ίζημα, γεγονός απόλυτα λογικό, λόγω της διαφορετικής κατανομής και διασποράς των ραδιονουκλιδίων στα αβιοτικά στοιχεία. Αυτή είναι η πρώτη βασική παραδοχή. Η δεύτερη παραδοχή αφορά στον ίδιο τον οργανισμό. Εφόσον η εξωτερική έκθεση σχετίζεται μόνο με το περιβάλλον στο οποίο αναπνέει και τρέφεται, γίνεται αντιληπτό πως είναι απαραίτητη η κατανομή των μετρήσεων ανάλογα με το ενδιαίτημα (habitat) του εκάστοτε ψαριού. Συνεπώς θα έχουμε τρεις διαφορετικές κατηγορίες στον ρυθμό εξωτερικής δόσης: η πρώτη θα αφορά τα πελαγικά είδη, η δεύτερη τα επιβενθικά-πελαγικά και η τρίτη τα βενθικά. Τα πελαγικά είδη, που ζουν και τρέφονται στο νερό, θα δέχονται δόση που απορρέει από τις συγκεντρώσεις του ραδιονουκλιδίου επιλογής σε αυτό. Αντίστοιχα και τα βενθικά είδη, που ζουν και τρέφονται στο

ίζημα, θα δέχονται εξωτερική δόση από τις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στο ίζημα. Όσον αφορά τα επιβενθικά-πελαγικά είδη, επειδή τρέφονται και στο νερό και στο ίζημα σε ποσοστό 50/50(%), αντίστοιχο καταμερισμό θα έχει και η δόση που δέχονται από τις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στο νερό και το ίζημα.

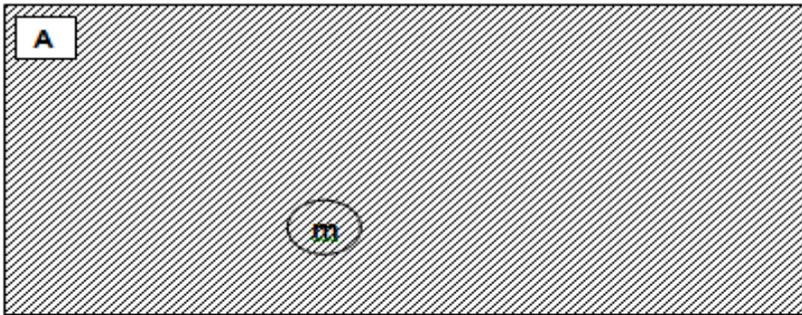
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ο υπολογισμός μέσω εξισώσεων, του ρυθμού δόσης που δέχεται ένα σώμα το οποίο βρίσκεται σε ραδιενεργό χώρο, ανάλογα με την γεωμετρία του χώρου και τον τρόπο κατανομής του ραδιενεργού υλικού. Στη συνέχεια οι γενικές εξισώσεις προσαρμόζονται στα δεδομένα της μελέτης, βάσει οργανισμού και ραδιονουκλιδίου. Είναι πολύ σημαντικό να επισημανθεί πως η αναφορά σε χώρους διαφορετικών υλικών (ραδιενεργών ή μη) γίνεται θεωρώντας αμελητέα την διαφορετική σκέδαση της ακτινοβολίας από τον ένα χώρο στον άλλο, χωρίς να επηρεάζει τον τελικό υπολογισμό της εξωτερικής δόσης.

## 4.2. ΡΥΘΜΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΟΣΗΣ ΣΕ ΑΠΕΙΡΟ (Η΄ ΗΜΙΑΠΕΙΡΟ) ΟΜΟΙΟΓΕΝΗ ΧΩΡΟ

### 4.2.1. Ομοιογενής Ραδιενεργός Χώρος Γεωμετρίας 4π

Έστω άπειρος χώρος A με ομοιογενή διασπορά ραδιενεργού υλικού και μία στοιχειώδης περιοχή μάζας m του χώρου αυτού (Σχήμα 4.1). Όπως είναι γνωστό από το Πρώτο Αξίωμα της Θερμοδυναμικής, η ενέργεια δεν μπορεί να εξαφανιστεί ούτε να δημιουργηθεί. Άρα λόγω διατήρησης ενεργειακού ισοζυγίου, η απορροφούμενη ενέργεια στην περιοχή m θα είναι ίση με την εκπεμπόμενη ενέργεια στην ίδια περιοχή. Δηλαδή για την περιοχή θα ισχύει:

$$\frac{dE_{\text{απορ.}}}{dt} = \frac{dE_{\text{εκπ.}}}{dt} \quad (\text{σχέση 4.1})$$



Σχήμα 4.1: Ομοιογενής ραδιενεργός χώρος A με στοιχειώδη περιοχή μάζας m.

Γενικά ως απορροφούμενη δόση ορίζεται η αποτιθέμενη ενέργεια οποιασδήποτε μορφής ιοντίζουσας ακτινοβολίας στη μονάδα μάζας του απορροφητή [ΕΕΑΕ.11].

Δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$D = \frac{dE_{\text{απορ.}}}{dm} \quad (\text{σχέση 4.2})$$

όπου **D** η απορροφούμενη δόση σε Gray(Gy), **E<sub>απορ.</sub>** η απορροφούμενη ενέργεια γ-ακτινοβολίας σε J και **m** η μάζα της στοιχειώδους περιοχής σε kg.

Όμως η απορροφούμενη δόση αποτελεί γραμμική συνάρτηση του ρυθμού απορροφούμενης δόσης με τον χρόνο έκθεσης δηλαδή:

$$D = \dot{D} \times t \quad (\text{σχέση 4.3})$$

όπου  $D$  η απορροφούμενη δόση σε Gray (Gy),  $\dot{D}$  ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης σε Gy/sec και  $t$  χρόνος έκθεσης σε sec.

Από τις σχέσεις 4.2&4.3 προκύπτει ότι ο ρυθμός δόσης ακτινοβολίας δίνεται με τη σχέση:

$$\dot{D} = \frac{dE_{\text{απορ.}}}{dt} \times \frac{1}{m} \quad (\text{σχέση 4.4})$$

Για την περιοχή μελέτης όμως ισχύει η σχέση 4.1, συνεπώς η 4.4 θα γραφτεί ως εξής:

$$\dot{D} = \frac{dE_{\text{εκπ.}}}{dt} \times \frac{1}{m} \quad (\text{σχέση 4.5})$$

όπου  $E_{\text{εκπ.}}$  η ενέργεια που εκπέμπεται μετρούμενη σε J.

Για τον ρυθμό εκπεμπόμενης ενέργειας από την στοιχειώδη περιοχή μάζας  $m$  θα ισχύει [Φλώρου.92]:

$$\frac{dE_{\text{εκπ.}}}{dt} = mA_s \sum_i I_i E_{\nu_i} \quad (\text{σχέση 4.6})$$

όπου:  $A_s$  η ειδική ενεργότητα (συγκέντρωση) του ραδιοϊσοτόπου σε Bq/kg.

$I_i$  ο μέσος αριθμός των εκπεμπόμενων  $\gamma$ -κβάντων ανά διάσπαση.

$E_{\nu_i}$  η ενέργεια της  $\gamma$ -ακτινοβολίας σε J.

$m$  η μάζα σε kg της στοιχειώδους περιοχής.

Με αντικατάσταση της σχέσης 4.6 στην 4.5 προκύπτει τελικά πως σε οποιοδήποτε σημείο ενός άπειρου ομοιογενούς ραδιενεργού χώρου, ο ρυθμός της απορροφούμενης δόσης θα είναι:

$$\dot{D} = mA_s \sum_i I_i E_{\nu_i} \times \frac{1}{m} \Leftrightarrow \dot{D} = A_s \sum_i I_i E_{\nu_i} \quad (\text{σχέση 4.7})$$

Επειδή όμως η ενέργεια γ-κβάντων δίνεται συνήθως σε keV και ως γνωστόν  $1\text{keV}=1.6\times 10^{-16}\text{J}$ , η σχέση 4.7 παίρνει την τελική της μορφή:

$$\dot{D} = 1.6 \times 10^{-16} A_s \sum_i I_i E_{\nu_i} \quad (\text{σχέση 4.8})$$

όπου:  $\dot{D}$  ο ρυθμός δόσης απορροφούμενης ενέργειας σε τυχαίο σημείο του άπειρου χώρου “Α”, με μονάδα το Gy/sec.

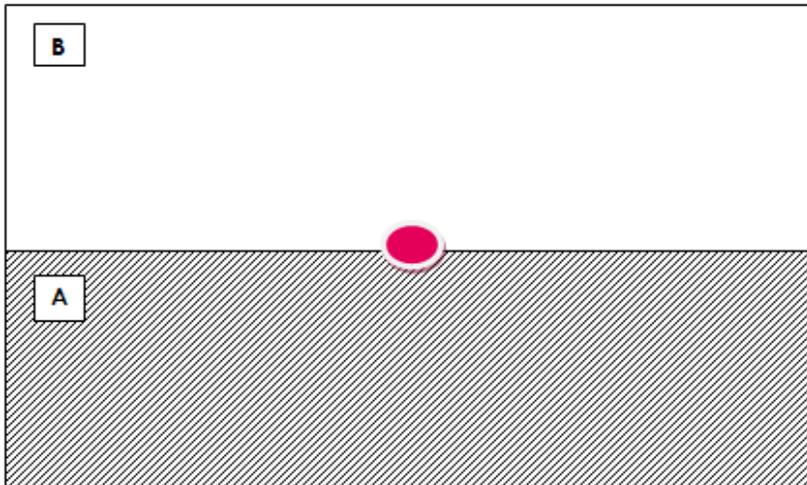
$A_s$  η ειδική ενεργότητα (συγκέντρωση) του ραδιοϊσοτόπου σε Bq/kg.

$I_i$  ο μέσος αριθμός των εκπεμπόμενων γ-κβάντων ανά διάσπαση.

$E_{\nu_i}$  η ενέργεια της γ-ακτινοβολίας σε keV.

#### 4.2.2. Δύο ημιάπειροι ομοιογενείς χώροι, εκ των οποίων ο ένας ραδιενεργός - Γεωμετρία 2π

Έστω δύο ημιάπειροι ομοιογενείς χώροι “Α” και “Β”, όπου στον Α έχουμε



ομοιογενή διασπορά ραδιενεργού υλικού και στον Β ομοιογενή διασπορά μη ραδιενεργού όμως υλικού. Θεωρούμε τυχαίο σημείο στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο χώρων (Σχήμα 4.2). Στην περίπτωση αυτή, για λόγους συμμετρίας, θεωρούμε πως ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης σε κάθε τυχαίο σημείο της διαχωριστικής επιφάνειας θα δίνεται από τον τύπο:

Σχήμα 4.2: Τυχαίο σημείο στη διαχωριστική επιφάνεια δύο ημιάπειρων ομοιογενών χώρων, εκ των οποίων ο ένας μόνο (ο Α) φέρει διασπορά ραδιενεργού υλικού.

$$\dot{D}(A) = \frac{1}{2} \dot{D} \xrightarrow{\text{σχ.4.8}} \dot{D}(A) = 8 \times 10^{-17} A_s(A) \sum_i I_i(A) E_{\nu_i}(A) \quad (\text{σχέση 4.9})$$

όπου:

$\dot{D}(A)$  ο ρυθμός δόσης απορροφούμενης ενέργειας σε τυχαίο σημείο της διαχωριστικής επιφάνειας των δύο χώρων, με μονάδα το Gy/sec.

$\dot{D}$  ο ρυθμός δόσης απορροφούμενης ενέργειας σε τυχαίο σημείο του άπειρου χώρου “A”, με μονάδα το Gy/sec.

$A_s(A)$  η ειδική ενεργότητα (συγκέντρωση) του ραδιοϊσοτόπου στον ραδιενεργό χώρο A, σε Bq/kg.

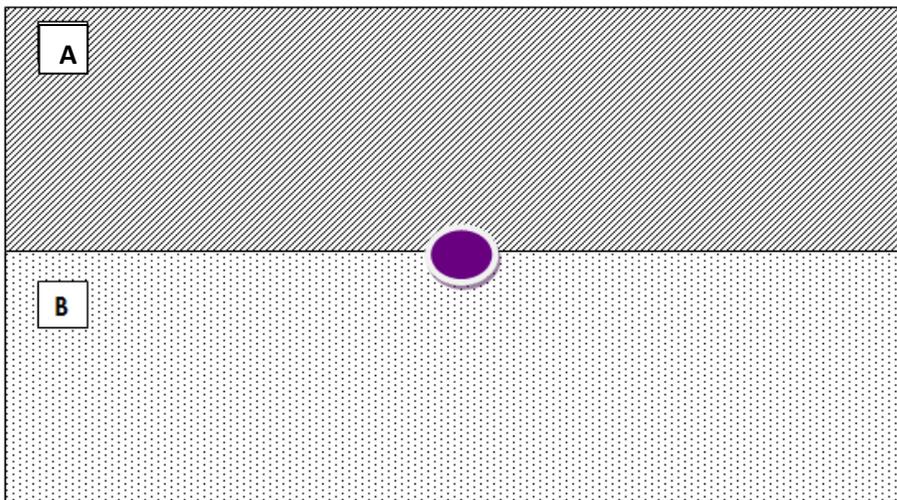
$I_i(A)$  ο μέσος αριθμός των εκπεμπόμενων γ-κβάντων ανά διάσπαση.

$E_{\nu_i}(A)$  η ενέργεια της γ-ακτινοβολίας σε keV του χώρου A.

#### 4.2.3. Δύο ημιάπειροι ομοιογενείς ραδιενεργοί χώροι - Γεωμετρία $2\pi(A)+2\pi(B)$

Έστω δύο ημιάπειροι ομοιογενείς χώροι “A” και “B”, όπου και στους δύο χώρους υπάρχει ομοιογενής διασπορά ραδιενεργού υλικού, διαφορετικής όμως ειδικής ενεργότητας στον

καθένα. Θεωρείται τυχαίο σημείο στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο χώρων (Σχήμα 4.3). Σε αυτή την περίπτωση, ακολουθείται παρόμοιο σκεπτικό με αυτό της προηγούμενης. Λόγω συμμετρίας λοιπόν, θεωρείται πως η δόση που απορροφάται από τυχαίο σημείο της διαχωριστικής επιφάνειας, θα προέρχεται κατά το πρώτο μισό από τον ραδιενεργό χώρο A και το δεύτερο μισό από τον ραδιενεργό



Σχήμα 4.3: Τυχαίο σημείο στη διαχωριστική επιφάνεια δύο ημιάπειρων ομοιογενών χώρων, όπου και οι δύο είναι ραδιενεργοί, με διαφορετική όμως ειδική ενεργότητα ραδιενεργού υλικού.

χώρο B. Συνεπώς η τελική δόση θα είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω «μισών δόσεων» δηλαδή:

$$\begin{aligned} \dot{D}(A, B) &= \frac{1}{2} \dot{D}(A) + \frac{1}{2} \dot{D}(B) = \\ &= \frac{1}{2} 1.6 \times 10^{-16} [A_s(A) \sum_i I_i(A) E_{\nu_i}(A) + A_s(B) \sum_i I_i(B) E_{\nu_i}(B)] \Rightarrow \quad (\text{σχέση} \\ &\Rightarrow \dot{D}(A, B) = 8 \times 10^{-17} [A_s(A) \sum_i I_i(A) E_{\nu_i}(A) + A_s(B) \sum_i I_i(B) E_{\nu_i}(B)] \end{aligned}$$

4.10)

όπου:

$\dot{D}(A, B)$  ο ρυθμός δόσης απορροφούμενης ενέργειας σε τυχαίο σημείο της διαχωριστικής επιφάνειας των δύο ραδιενεργών χώρων, με μονάδα το Gy/sec.

$\dot{D}(A)$  ο ρυθμός δόσης απορροφούμενης ενέργειας σε τυχαίο σημείο του άπειρου χώρου “Α”, με μονάδα το Gy/sec.

$\dot{D}(B)$  ο ρυθμός δόσης απορροφούμενης ενέργειας σε τυχαίο σημείο του άπειρου χώρου “Β”, με μονάδα το Gy/sec.

$A_s(A)$  η ειδική ενεργότητα (συγκέντρωση) του ραδιοϊσοτόπου στον ραδιενεργό χώρο A, σε Bq/kg.

$A_s(B)$  η ειδική ενεργότητα (συγκέντρωση) του ραδιοϊσοτόπου στον ραδιενεργό χώρο B, σε Bq/kg.

$E_{\nu_i}(A)$  η ενέργεια της γ-ακτινοβολίας σε keV του χώρου A.

$I_i(A)$  ο μέσος αριθμός των εκπεμπόμενων γ-κβάντων ανά διάσπαση ενέργειας  $E_{\nu_i}(A)$

$E_{\nu_i}(B)$  η ενέργεια της γ-ακτινοβολίας σε keV του χώρου B.

$I_i(B)$  ο μέσος αριθμός των εκπεμπόμενων γ-κβάντων ανά διάσπαση ενέργειας  $E_{\nu_i}(B)$ .

### 4.3. ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΟΣΗΣ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ

#### ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Όπως αναφέρθηκε και στα εισαγωγικά στοιχεία, για τον υπολογισμό του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης που δέχονται θαλάσσιοι οργανισμοί, λαμβάνονται υπόψιν δύο παράμετροι που σχετίζονται με το ραδιονουκλίδιο εκπομπής και τον χώρο διαβίωσης του κάθε οργανισμού. Διακρίνονται λοιπόν τρεις περιπτώσεις για τον υπολογισμό του ρυθμού εξωτερικής δόσης:

- Για τα πελαγικά ψάρια, που ζουν και τρέφονται αποκλειστικά στο νερό, δηλαδή σε ομοιογενή ραδιενεργό χώρο, θα εφαρμοστεί η σχέση 4.8.
- Για τα βενθικά ψάρια, που ζουν και τρέφονται αποκλειστικά στο ίζημα, δηλαδή σε ομοιογενή ραδιενεργό χώρο, θα εφαρμοστεί επίσης η σχέση 4.8.
- Για τα επιβενθικά-πελαγικά ψάρια, που ζουν και τρέφονται στην διαχωριστική επιφάνεια νερού-ιζήματος, δηλαδή στην διαχωριστική επιφάνεια δύο ημίσειων χώρων, θα εφαρμοστεί η σχέση 4.10.

Συνεπώς για τον κάθε ραδιενεργό ρυπαντή ή στρεσογόνο παράγοντα (για φυσική ραδιενέργεια), δηλαδή το κάθε ραδιονουκλίδιο, στον αντίστοιχο ραδιενεργό χώρο-περιβάλλον, οι σχέσεις της υποενότητας 4.2 θα διαμορφωθούν [Φλώρου.92, Τραμπίδου.97]:

- **Θαλασσινό νερό, ίζημα:**

$$\dot{D} = 1.6 \times 10^{-16} A_s \sum_i I_i E_{v_i} \quad (\text{Gy/sec})$$

και με αντίστοιχο σφάλμα: (σχέση 4.11)

$$\delta \dot{D} = \pm (\delta A_s) 1.6 \times 10^{-16} \sum_i I_i E_{v_i} \quad (\text{Gy/sec})$$

Άρα για τα υπό εξέταση ραδιονουκλίδια θα ισχύει:

$$\dot{D}_{226 Ra} = 1.6 \times 10^{-16} A_{s_{226 Ra}} \sum_i (I_i E_{v_i})_{226 Ra}$$

$$\dot{D}_{228 Ra} = 1.6 \times 10^{-16} A_{s_{228 Ra}} \sum_i (I_i E_{v_i})_{228 Ra}$$

$$\dot{D}_{228Th} = 1.6 \times 10^{-16} A_{s_{228Th}} \sum_i (I_i E_{v_i})_{228Th}$$

$$\dot{D}_{232Th} = 1.6 \times 10^{-16} A_{s_{232Th}} \sum_i (I_i E_{v_i})_{232Th}$$

$$\dot{D}_{40K} = 1.6 \times 10^{-16} A_{s_{40K}} \sum_i (I_i E_{v_i})_{40K}$$

$$\dot{D}_{238U} = 1.6 \times 10^{-16} A_{s_{238U}} \sum_i (I_i E_{v_i})_{238U}$$

$$\dot{D}_{137Cs} = 1.6 \times 10^{-16} A_{s_{137Cs}} \sum_i (I_i E_{v_i})_{137Cs}$$

○ Διαχωριστική επιφάνεια θαλασσινού νερού και ιζήματος:

$$\dot{D}(\text{water, sediment}) = 8 \times 10^{-17} [A_s(w) \sum_i I_i(w) E_{v_i}(w) + A_s(s) \sum_i I_i(s) E_{v_i}(s)] \text{ (Gy/sec)}$$

και με αντίστοιχο σφάλμα:

(σχέση 4.12)

$$\delta \dot{D}(w, s) = \pm 8 \times 10^{-17} \sqrt{\{[\delta A_s(w)] \sum_i I_i(w) E_{v_i}(w)\}^2 + \{[\delta A_s(s)] \sum_i I_i(s) E_{v_i}(s)\}^2} \text{ (Gy/sec)}$$

Άρα για τα υπό εξέταση ραδιονουκλίδια θα ισχύει:

$$\dot{D}(w, s)_{226Ra} = 8 \times 10^{-17} \{A_s(w)_{226Ra} \sum_i [I_i(w) E_{v_i}(w)]_{226Ra} + A_s(s)_{226Ra} \sum_i [I_i(s) E_{v_i}(s)]_{226Ra}\}$$

$$\dot{D}(w, s)_{232Th} = 8 \times 10^{-17} \{A_s(w)_{232Th} \sum_i [I_i(w) E_{v_i}(w)]_{232Th} + A_s(s)_{232Th} \sum_i [I_i(s) E_{v_i}(s)]_{232Th}\}$$

$$\dot{D}(w, s)_{40K} = 8 \times 10^{-17} \{A_s(w)_{40K} \sum_i [I_i(w) E_{v_i}(w)]_{40K} + A_s(s)_{40K} \sum_i [I_i(s) E_{v_i}(s)]_{40K}\}$$

$$\dot{D}(w, s)_{238U} = 8 \times 10^{-17} \{A_s(w)_{238U} \sum_i [I_i(w) E_{v_i}(w)]_{238U} + A_s(s)_{238U} \sum_i [I_i(s) E_{v_i}(s)]_{238U}\}$$

$$\dot{D}(w, s)_{137Cs} = 8 \times 10^{-17} \{A_s(w)_{137Cs} \sum_i [I_i(w) E_{v_i}(w)]_{137Cs} + A_s(s)_{137Cs} \sum_i [I_i(s) E_{v_i}(s)]_{137Cs}\}$$

## ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ***

***Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε ιοντίζουσα  
ακτινοβολία με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου  
RESRAD-BIOTA***



## 5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

---

Η ανάπτυξη της επιστήμης της Ραδιοοικολογίας τα τελευταία χρόνια, οδήγησε στην ανάγκη της ευρύτερης και ουσιαστικότερης μελέτης των επιπτώσεων της ραδιενέργειας, φυσικής και τεχνητής προέλευσης, στα περιβαλλοντικά οικοσυστήματα. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην προστασία των μη-ανθρώπινων ζώντων οργανισμών των οικοσυστημάτων, από τους ραδιενεργούς ρύπους του περιβάλλοντος στο οποίο διαβιούν. Η ανάγκη λοιπόν συστημάτων ελέγχου και προστασίας του περιβάλλοντος από την ιοντίζουσα ακτινοβολία αποτελεί πρωταρχικό σκοπό για την Διεθνή Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας (International Commission on Radiological Protection (ICRP)). Για να γίνει όμως αυτή η επίτευξη θα πρέπει να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων του περιβάλλοντος και σε τελικό στάδιο η δόση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που δέχεται ο κάθε οργανισμός από τα ραδιονουκλίδια του οικοσυστήματος που ζει και τρέφεται. Μέσα από τον υπολογισμό των δόσεων ακτινοβολίας θα καταστεί δυνατή η μελέτη των επιπέδων διαβίωσης σε ένα οικοσύστημα, βάσει των διεθνών προτύπων, και η λήψη των κατάλληλων μέτρων αντιμετώπισης και πρόληψης.

Ως απάντηση των παραπάνω αναγκών και εξελίξεων στην επιστήμη της Ραδιοοικολογίας, έχει προταθεί ένας αριθμός υπολογιστικών μοντέλων και προσεγγίσεων για την εκτίμηση της έκθεσης των μη-ανθρώπινων ζωντανών οργανισμών στην ιοντίζουσα ακτινοβολία. Κάποιες χώρες μάλιστα (Καναδάς, Ηνωμένο Βασίλειο και Η.Π.Α) συμπεριέλαβαν αυτά τα μοντέλα στα κανονιστικά τους πλαίσια για πυρηνικές και άλλες περιοχές που μπορεί να εκλύουν ραδιονουκλίδια στο περιβάλλον. Σε κάποιες περιπτώσεις τα ατμοσφαιρικά και υδάτινα μοντέλα μεταφοράς χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των ποσοτήτων των ραδιονουκλιδίων που εκλύονται, και την διασπορά τους στις συνιστώσες του οικοσυστήματος. Σε άλλες περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων καθορίζονται απ'ευθείας από το ερευνητικό πεδίο, ενώ σε μία εναλλακτική προσέγγιση, έχουμε ως υπόβαθρο μία καθορισμένη τιμή ρυθμού δόσης και το μοντέλο υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων που θα προστεθούν στο οικοσύστημα ώστε να καταλήξουμε στην παρούσα τιμή δόσης.

Η Διεθνή Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency (IAEA)) θέσπισε σαν μέρος του προγράμματος EMRAS (Environmental Modelling for

Radiation Safety) το 2004, την ομάδα BWG (Biota Working Group) της οποίας το βασικό αντικείμενο θα είναι να βελτιώσει τις δυνατότητες της Διεθνούς Κοινότητας για περιβαλλοντική προστασία, συγκρίνοντας και αξιολογώντας μοντέλα δοσιμετρίας στους έμβιους οργανισμούς, σαν κομμάτι διεθνούς εποπτείας όλων των νόμιμων μέσων που η λειτουργία τους επιφέρει την εκπομπή ραδιοϊσοτόπων. Ορισμένα μοντέλα δοσιμετρίας που χρησιμοποιούνται σε διάφορες χώρες και διεθνώς είναι τα ακόλουθα [Baresford.08]:

- **RESRAD-BIOTA:** ο κώδικας RESRAD-BIOTA αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται κυρίως στις Η.Π.Α και αποτελεί ένα ιδιαίτερος χρήσιμο εργαλείο για την διαβαθμιζόμενη προσέγγιση του ρυθμού δόσεων σε οργανισμούς. Ο συγκεκριμένος κώδικας θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μελέτη για τον υπολογισμό των εξωτερικών δόσεων ακτινοβολίας που δέχονται οι εξετασθέντες οργανισμοί από τα ραδιονουκλίδια που επιλέχθηκαν, ενώ παράλληλα θα συγκριθούν οι τιμές που θα προκύψουν με αυτές των κλασικών εξισώσεων, για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου.
- **ERICA (Environmental Risk from Ionizing Contaminants-Assessment and management):** ο κώδικας ERICA υλοποιήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για την εξυπηρέτηση των επιστημονικών και κοινωνικών προβληματισμών που προέκυψαν από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις και επιπτώσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας. Το μοντέλο υπολογίζει δόσεις ακτινοβολίας από το ραδιενεργά μολυσμένο περιβάλλον σε χερσαίους και υδάτινους οργανισμούς.
- **England and Wales environment agency 'R&D 128000':** το μοντέλο αυτό είναι συναφές με το ERICA, με το μειονέκτημα πως εμπεριέχει μικρότερη γκάμα οργανισμών και ραδιονουκλιδίων προς εξέταση.
- **Atomic Energy Canada limited (AECL) approach:** ο κώδικας αυτός υλοποιήθηκε στον Καναδά για τον υπολογισμό εξωτερικών και εσωτερικών δόσεων σε οργανισμούς. Ο κώδικας βρίσκεται σε συνεργασία με τον ResRad-Biota από του οποίου τις βιβλιοθήκες λαμβάνει τιμές σε περίπτωση ελλείμματος.
- **ECOMOD (Russia):** ο ECOMOD αποτελεί ένα δυναμικό μοντέλο προβλέψεων συγκεντρώσεων ραδιονουκλιδίων ακόμα και σε συνθήκες μεταβαλλόμενων συγκεντρώσεων. Αφορά κυρίως ραδιονουκλίδια που είναι ισότοπα βιολογικά ενεργών χημικών στοιχείων.

- *LIETDOS-BIO (Lithuania)*: ο κώδικας αποτελεί μία προσέγγιση που υλοποιήθηκε για προβλήματα μόλυνσης που σχετίζονται με την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας στην Λιθουανία.
- *SCK-CEN approach (Belgium)*: κώδικας ο οποίος είναι υπό βελτίωση και μελετά τους παράγοντες συγκέντρωσης για τα φυτά, ασπόνδυλα χερσαία ζώα και οργανισμούς του γλυκού νερού από την βιβλιογραφία.

Όλοι οι παραπάνω κώδικες με πιο σημαντικούς τον ERICA και τον RESRAD-BIOTA, αποτελούν μία προοδευτική εξέλιξη για την αυτοματοποίηση των μεθόδων υπολογισμού δόσεων ακτινοβολίας, βήμα καίριο για την προστασία του περιβάλλοντος και κατ'επέκταση της δημόσιας υγείας. Επειδή η Ραδιοικολογία είναι μοντέρνα επιστήμη και τα μοντέλα δοσιμετρίας υλοποιήθηκαν μόλις την τελευταία δεκαετία, είναι λογικό να υπάρχουν ορισμένα κενά στους υπολογισμούς των δόσεων τα οποία ο κάθε επιστήμονας καλείται να προσδιορίσει και να επισημάνει ανάλογα και με τις ιδιαίτερες τοπογραφικές και περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην υπό εξέταση περιοχή.

Για τον κώδικα του RESRAD-BIOTA, αρχικά θα αναλυθούν τμηματικά οι παράμετροι της λειτουργίας του και στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τις πραγματικές τιμές των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων, θα υπολογισθούν οι εξωτερικές δόσεις, οι οποίες σε τελικό στάδιο θα συγκριθούν με τις δόσεις που προέκυψαν από τις συμβατικές εξισώσεις.

## 5.2. Ο ΚΩΔΙΚΑΣ RESRAD

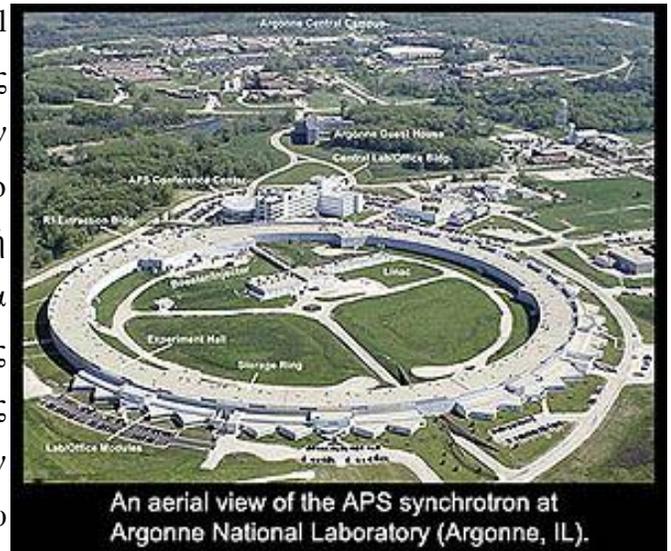
Ο κώδικας RESRAD-BIOTA ανήκει στην ευρύτερη οικογένεια κωδίκων ResRad και αποτελεί ένα προγραμματιστικό μοντέλο που υλοποιήθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S. Department of Energy (DOE's)) ως εργαλείο για την εφαρμογή ελέγχου και ανάλυσης μεθόδων που περιλαμβάνονται στο DOE's Technical Standard DOE-STD-1153-2002. Ο κώδικας συγχρηματοδοτήθηκε από το Γραφείο Περιβαλλοντικής πολιτικής των Η.Π.Α (DOE's Office of Environment) με την υποστήριξη της Υπηρεσίας για θέματα προστασίας περιβάλλοντος των Η.Π.Α (U.S. Environmental Protection Agency) και της Πυρηνικής Ρυθμιστικής Επιτροπής των Η.Π.Α (U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC)). Η υλοποίηση του κώδικα έγινε από το ερευνητικό κέντρο Argonne National Laboratory (Εικόνα 5.1, Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.1: Ερευνητικό κέντρο Argonne [Argonne web].

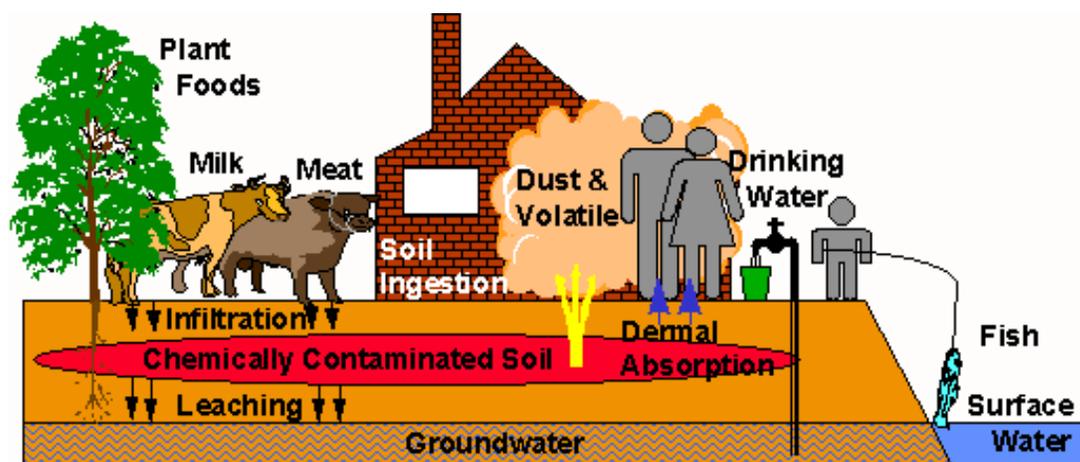
Ο RESRAD (Residual Radioactivity) είναι ο μοναδικός κώδικας της DOE για την αξιολόγηση των ραδιενεργών περιοχών [DOE 5400.5]. Η υλοποίησή του ξεκίνησε το 1989, σημειώνοντας τα επόμενα χρόνια σημαντική αναβάθμιση, συνυφασμένη με τα προηγμένα υπολογιστικά μοντέλα και τις σύγχρονες επιταγές της επιστήμης στις δόσεις ακτινοβολίας και τους παράγοντες κινδύνου, ώστε να γίνει ο καθορισμός των «ασφαλών ορίων» ραδιενέργειας των περιοχών. Η εγκατάσταση του κώδικα είναι πολύ απλή μέσα από τον επίσημο ιστότοπο του RESRAD [RESRAD web]. Η εφαρμογή του είναι

ευρέως διαδεδομένη σε περισσότερες από 300 πολιτείες των Η.Π.Α καθώς και σε άλλες χώρες. Η NRC έχει εγκρίνει τη χρήση του RESRAD ως αξιόπιστη πηγή εκτίμησης δόσεων για την χορήγηση αδειών στον παροπλισμό και τη διάθεση των αποβλήτων. Ακόμη πολλά Πανεπιστημιακά Ιδρύματα χρησιμοποιούν τον RESRAD σαν εργαλείο εκπαίδευσης και έρευνας.



Εικόνα 5.2: Σύγχροτρον Επιταχυντής στις εγκαταστάσεις του Argonne [Argonne web].

Το DOE's Technical Standard παρέχει μία βαθμονομημένη προσέγγιση (συμπεριλαμβανομένων απεικονιστικών μεθόδων και μεθόδων λεπτομερών αναλύσεων) και σχετικές οδηγίες που αξιοποιεί η DOE για τον καθορισμό των ορίων των δόσεων ιοντίζουσας ακτινοβολίας σε πληθυσμούς υδρόβιων και χερσαίων φυτών και ζώων λόγω ανθρωπογενών παραγόντων, σε συνεργασία με τις εκτιμήσεις της NCRP και της IAEA [DOE 5400.5, DOE 5400.1, IAEA.92, NCRP.91]. Ο κώδικας RESRAD χρησιμοποιεί την μέθοδο της «ανάλυσης μονοπατιού» (pathway analysis) σύμφωνα με την οποία η έκθεση στην ακτινοβολία υπολογίζεται βάσει των εκτιμήσεων του συγκεκριμένου «μονοπατιού» μέσω του οποίου προκλήθηκε η έκθεση. Λαμβάνονται λοιπόν υπόψιν περιβαλλοντικά μονοπάτια έκθεσης και συγκεκριμένα: άμεση έκθεση, εισπνοή σωματιδίων και ραδονίου, η τροφή από τα φυτά, το κρέας, το γάλα, η υδρόβια τροφή, το νερό και το χώμα (Εικόνα 5.3).

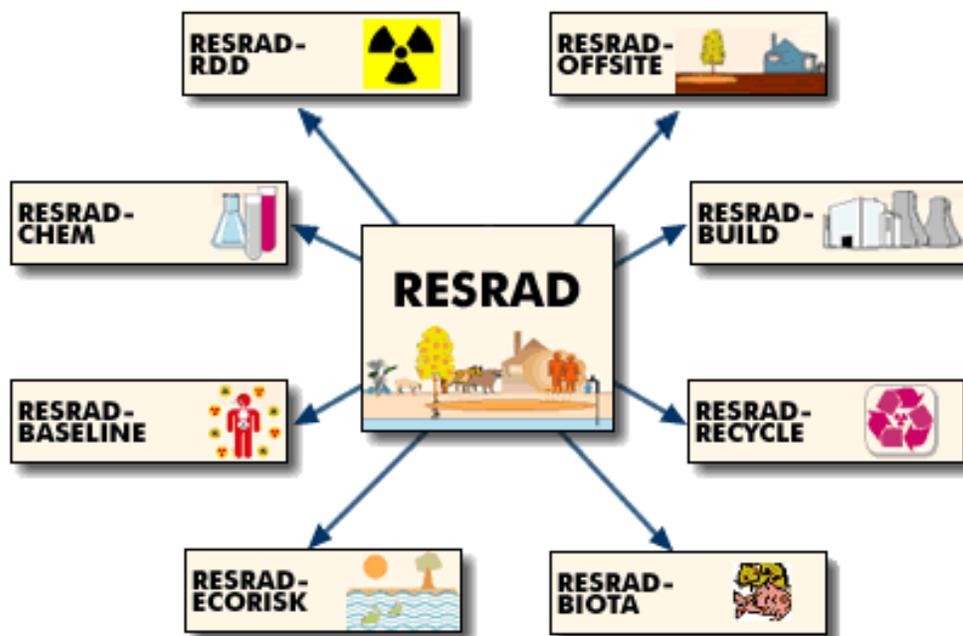


Εικόνα 5.3: Τα πιθανά μονοπάτια μόλυνσης από έκθεση σε ραδιενέργεια (exposure pathways) που εξετάζει το RESRAD [RESRAD web].

Προκειμένου η οικογένεια του RESRAD να ανταπεξέλθει ικανοποιητικά σε όλα τα πιθανά μονοπάτια έκθεσης, προχώρησε στην ανάπτυξη θυγατρικών εξειδικευμένων κωδίκων. Η οικογένεια κωδίκων του RESRAD περιλαμβάνει τους ακόλουθους κωδικούς (Εικόνα 5.4) [RESRAD web]:

- *RESRAD*: εκτιμά τις δόσεις και το ρίσκο στην ανθρώπινη υγεία από ραδιενεργά μολυσμένα εδάφη.
- *RESRAD-CHEM*: εκτιμά τον χημικό κίνδυνο από την εδαφική μόλυνση.

- *RESRAD-ECORISK*: εκτιμά τον κίνδυνο των τροφικών αλυσίδων από τους χημικούς ρυπαντές.
- *RESRAD-BUILT*: εξετάζει τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από κτίρια μολυσμένα με ραδιενεργά υλικά.
- *RESRAD-RECYCLE*: εκτιμά τις δόσεις ακτινοβολίας σε διάφορους υποδοχείς, από την ανακύκλωση ή την επαναχρησιμοποίηση ραδιενεργώς μολυσμένων υλικών και εξοπλισμού.
- *RESRAD-BASELINE*: εκτελεί βασικές εκτιμήσεις κινδύνου σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος (EPA: U.S. Environmental Protection Agency).
- *RESRAD-BIOTA*: χρησιμοποιεί προσεγγιστική μέθοδο στην εκτίμηση των ραδιενεργών δόσεων για ζώντες μη-ανθρώπινους οργανισμούς.



Εικόνα 5.4: Η οικογένεια κωδίκων του RESRAD [RESRAD web].

### 5.3. Ο ΚΩΔΙΚΑΣ RESRAD-BIOTA

---

#### 5.3.1. Εισαγωγικά Στοιχεία

Ο κώδικας RESRAD-BIOTA υλοποιήθηκε για την ανάγκη μοντελοποίησης υπολογισμού των δόσεων ακτινοβολίας (από εξωτερική ή/και εσωτερική έκθεση) που λαμβάνουν οι οργανισμοί από τα ραδιονουκλία του περιβάλλοντός τους. Λειτουργεί ως μία προσεγγιστική μέθοδος αξιολόγησης των δόσεων ακτινοβολίας στους υδάτινους και χερσαίους οργανισμούς και αποτελεί εργαλείο για την εφαρμογή των μεθόδων ελέγχου και ανάλυσης του DOE Technical Standard [RESRAD-BIOTA]. Σύμφωνα λοιπόν με το Technical Standard, έχουν καθοριστεί τα ανώτερα επιτρεπτά όρια έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία των μη-ανθρώπινων ζώντων οργανισμών, ώστε να προστατεύονται από τις βλαβερές της συνέπειες [DOE.93]. Τα όρια αυτά παρουσιάζονται ανά είδος οργανισμού :

- **Υδάτινοι Οργανισμοί:** η απορροφούμενη δόση στους υδάτινους οργανισμούς δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 10mGy/d (ή 1rad/d) από έκθεση σε ακτινοβολία ή ραδιενεργά υλικά που μόλυναν το υδάτινο περιβάλλον.
- **Χερσαία Φυτά:** στα χερσαία φυτά η απορροφούμενη δόση από έκθεση σε ακτινοβολία στο ραδιενεργά μολυσμένο χερσαίο περιβάλλον δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 10mGy/d (ή 1rad/d).
- **Χερσαία Ζώα:** στα χερσαία ζώα η απορροφούμενη δόση από έκθεση σε ακτινοβολία στο ραδιενεργά μολυσμένο χερσαίο περιβάλλον δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 1mGy/d (ή 0.1rad/d).

Η ανάπτυξη των μεθόδων που εμπεριέχονται στο πρότυπο της DOE ήταν επακόλουθο συγκεκριμένων βασικών θεμάτων που προέκυψαν και περιελάμβαναν:

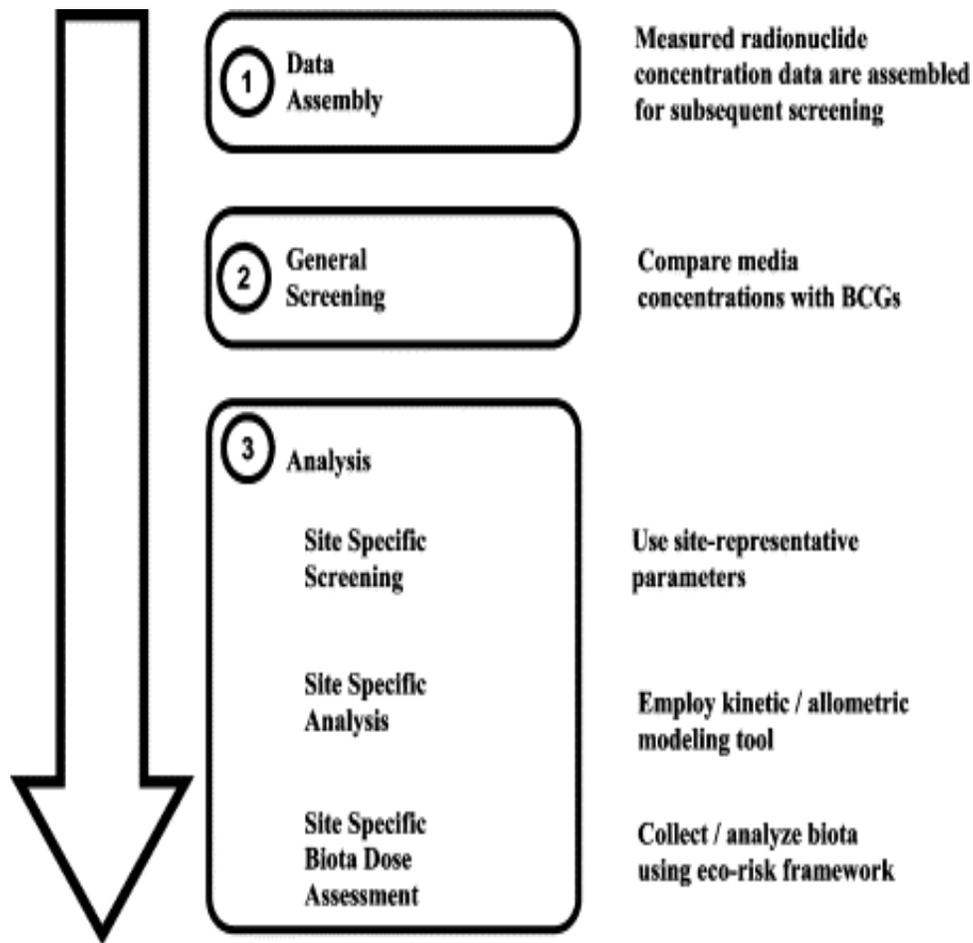
1. Την απαίτηση για την ανάπτυξη χαμηλού κόστους μεθόδων για την υποστήριξη της χρήσης των προτεινόμενων από την DOE ορίων δόσης.
2. Την υποστήριξη για μία πολυεπίπεδη προσέγγιση με σκοπό τον έλεγχο.
3. Την απαίτηση για την ύπαρξη βασικών κατευθυντήριων γραμμών που να αφορούν την μελέτη-παρακολούθηση των ζωντανών οργανισμών.

4. Την απαίτηση για την ανάπτυξη μίας γενικής μεθόδου για την προώθηση της συνοχής, διατηρώντας παράλληλα σχετική ευελιξία για την εισαγωγή επιπρόσθετων ειδικών παραμέτρων και πληροφοριών στην θέση των αντίστοιχων προκαθορισμένων παραμέτρων (default parameters) της μεθόδου.

Τα πρότυπα προστασίας των ζωντανών οργανισμών βασίζονται στον υπολογισμό δόσεων. Η πολυπλοκότητα όμως των περιβαλλοντικών συστημάτων και η τεράστια ποικιλία των οργανισμών που ενδέχεται να εκτεθούν σε ραδιονουκλίδια, καθιστούν αδύνατη την απευθείας μέτρηση της δόσης σε κάθε συγκεκριμένο οργανισμό, σαν μέσο περιβαλλοντικής συμμόρφωσης. Μία πιο απλή μέθοδος είναι να εξαγωγή ορίων συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων για το εκάστοτε περιβαλλοντικό μέσο (νερό, ίζημα ή χώμα) που θα θεωρηθούν ως όρια προστασίας γενικά για όλους τους οργανισμούς. Αυτή όμως η απλοϊκή προσέγγιση είναι πολύ συντηρητική για τις περισσότερες περιπτώσεις έκθεσης. Κατά συνέπεια θεωρήθηκε πως μία διαβαθμισμένη προσέγγιση για την εκτίμηση της επικινδυνότητας είναι πιο κατάλληλη [Higley.03]. Η προσέγγιση που υλοποίησε το DOE αποτελεί μία διαδικασία τριών σταδίων (Εικόνα 5.5) [DOE.02]:

1. Ο συνδυασμός δεδομένων για τις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων και γενικών γνώσεων για τις πηγές, τους αποδέκτες και την πορεία της έκθεσης για την περιοχή που μελετάται.
2. Η εφαρμογή μίας γενικής μεθοδολογίας ελέγχου.
3. Η διεξαγωγή ανάλυσης μέσω της δυνατότητας εισαγωγής δεδομένων και παραμέτρων στην εκτίμηση των δόσεων, στην θέση των προκαθορισμένων δεδομένων και παραμέτρων (default parameters) που χρησιμοποιούνται από την προσεγγιστική μέθοδο (site-specific screening, site-specific analysis).

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται μόνο στην δόση από εξωτερική έκθεση σε θαλάσσιους οργανισμούς. Συνεπώς και η επεξηγηματική ανάλυση των βημάτων που υλοποιεί ο RESRAD-BIOTA για την εύρεση των δόσεων, θα εστιαστεί κατά κύριο λόγο στον τρόπο υπολογισμού της εξωτερικής δόσης που δέχονται οι θαλάσσιοι οργανισμοί της μελέτης από τον κώδικα.



Εικόνα 5.5: Στάδια προσεγγιστικής μεθόδου RESRAD [RESRAD-BIOTA] .

### 5.3.2. Μεθοδολογία RESRAD-BIOTA (Για υδάτινους οργανισμούς)

#### ***BHMA 1<sup>o</sup> : DATA ASSEMBLY PHASE***

Η πρώτη φάση της μεθόδου, όπως και σε κάθε πειραματική διαδικασία, αφορά στην συλλογή και την ταξινόμηση των δεδομένων. Για να είναι αξιόπιστη η εκτίμηση των δόσεων που θα προκύψει υπάρχουν τρεις βασικοί παράγοντες που θα ληφθούν αρχικά υπόψιν:

- *Η ραδιενεργός πηγή*, η οποία θα πρέπει να βρίσκεται σε διαρκή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον που θα μελετηθεί.
- *Οι περιβαλλοντικοί αποδέκτες της ακτινοβολίας* (φυτά ή/και ζώα), οι οποίοι θα πρέπει να γειτνιάζουν με την ραδιενεργό πηγή.
- *Οι διαδρομές της έκθεσης (exposure pathways)* από την ραδιενεργό πηγή στον αποδέκτη θα πρέπει να είναι εμφανείς.

Έχοντας γνώση των προαπαιτούμενων δεδομένων, ορίζεται η περιοχή της εκτίμησης της δόσης, θεωρώντας αρχικά πως ο οργανισμός ζει και τρέφεται στην μολυσμένη περιοχή το 100% του χρόνου. Συνεπώς βρίσκεται μόνιμα εκτεθειμένος στο ραδιενεργό μέσο με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται αρχικά οι μέγιστες συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στην γεωγραφική περιοχή της μελέτης. Τα δεδομένα που αφορούν στις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων θα πρέπει να είναι ταξινομημένα ανάλογα με την προεύλεσή τους στο νερό ή/και το ίζημα και το χώμα.

Πιο συγκεκριμένα, για το υδάτινο οικοσύστημα στο οποίο επικεντρώνεται η μελέτη, οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών-ραδιονουκλιδίων θα αφορούν στο νερό ή/και το ίζημα ανάλογα με το είδος του οργανισμού. Η μέγιστη επιτρεπτή δόση έκθεσης ενός οργανισμού που αποτελεί μέρος ενός υδάτινου οικοσυστήματος δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 0.4mGy/h, ώστε να εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα του πληθυσμού [NCRP.91].

Ακόμη, για καλύτερη κατανόηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων αξίζει να αναφερθούν ορισμένες ιδιαιτερότητες-χαρακτηριστικά των υδάτινων οργανισμών [IAEA.92]:

- Οι υδάτινοι οργανισμοί είναι ποικιλόθερμοι, δηλαδή η θερμοκρασία του σώματός τους ακολουθεί την θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο οποίο ζουν, συνεπώς η θερμοκρασία

αποτελεί παράγοντα ελέγχου του χρόνου εμφάνισης των επιδράσεων της ακτινοβολίας στους οργανισμούς.

- Η ραδιοευαισθησία των υδάτινων οργανισμών μεταβάλλεται με την ηλικία, ή με το στάδιο της ανάπτυξης, στην περίπτωση των μη-εκκολαπτόμενων αυγών.
- Η ραδιοευαισθησία των υδάτινων οργανισμών αυξάνεται όσο αυξάνεται και η φυλογενετική πολυπλοκότητα του εκάστοτε οργανισμού.
- Στα ψάρια έχει παρατηρηθεί μετά από μετρήσεις πως τα στάδια της γαμετογένεσης και της ανάπτυξης του εμβρύου εμφανίζουν και τη μεγαλύτερη ραδιοευαισθησία.
- Στους υδάτινους οργανισμούς ο ρυθμός μετάλλαξης λόγω ακτινοβολίας κυμαίνεται στην κλίμακα μεταξύ των ρυθμών της *Drosophila* και των ποντικών.

## ***BHMA 2<sup>o</sup> : GENERAL SCREENING PHASE***

Σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης βασικός σκοπός του κώδικα είναι να παρέχει την δυνατότητα στον ερευνητή να εισαγάγει δεδομένα που αφορούν στην συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου στο περιβαλλοντικό μέσο που τον ενδιαφέρει και παράλληλα να εξαγάγει συμπεράσματα σχετικά με τα όρια δόσης εξωτερικής έκθεσης για τους οργανισμούς που ζουν και τρέφονται στο περιβάλλον μελέτης.

Η μέθοδος πρέπει να είναι απλή, αξιόπιστη και κατανοητή για τον χρήστη, ενώ παράλληλα θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες οι οποίοι αφορούν τα ακόλουθα [DOE.02, Higley.03]:

1. Τον διαχωρισμό των οργανισμών ανάλογα με το περιβάλλον διαβίωσης σε υδάτινους και χερσαίους. Η επιλογή των οργανισμών για την μέθοδο προέκυψε από τα ισχύοντα πρότυπα ραδιολογικής προστασίας για τους ζώντες οργανισμούς στις Η.Π.Α [DOE.02]. Στον κώδικα λοιπόν υπάρχουν οι επιλογές για υδάτινα ζώα (aquatic animals) και χερσαία φυτά και ζώα (terrestrial plants and animals). Εκτός όμως από αυτές τις τρεις κατηγορίες προστέθηκε και μία τέταρτη που αφορά στα παρόχθια ζώα (terrestrial animals) των οποίων οι διαδρομές έκθεσης σε ακτινοβολία παρουσιάζουν χαρακτηριστικά των υδάτινων και των χερσαίων οικοσυστημάτων.
2. Θα πρέπει να υπάρχει διακύμανση της δόσης ανάλογα με το μέγεθος του οργανισμού που μελετάται, από πολύ μικρά ζώα μέχρι μεγάλα σαρκοφάγα. Για τον σκοπό αυτό το

πρόγραμμα παρέχει δυνατότητα επιλογής του μεγέθους του οργανισμού σε μορφή κλίμακας και δυνατότητα εισαγωγής του βάρους του με ακρίβεια.

3. Τα μονοπάτια έκθεσης για τους οργανισμούς των τεσσάρων κατηγοριών αναπτύχθηκαν βάση της πιθανότητας της δόσης που μπορεί να λάβει ένας οργανισμός από μία συγκεκριμένη διαδρομή. Σχετικά μονοπάτια μπορούν να περιλαμβάνουν δόσεις από εσωτερική και εξωτερική έκθεση. Βασιζόμενο στα πιθανά μονοπάτια έκθεσης, το πρόγραμμα περιλαμβάνει προκαθορισμένες (default) BCG's (Biota Concentration Guide) για το επιφανειακό νερό, το ίζημα και το χώμα. Οι BCG's είναι ιδιαίτερες σημαντικές, καθώς αποτελούν «το ταβάνι» πέραν του οποίου όλες οι εισαγόμενες τιμές συγκεντρώσεων αποκλείονται, καθώς υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια που έχουν θεσπιστεί από τα διεθνή πρότυπα.

#### **5.3.2.1. Συντελεστές ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης (EXTERNAL DOSE CONVERSION FACTORS (DCFs))**

Βασική προκαθορισμένη παράμετρος του κώδικα είναι οι συντελεστές εξωτερικής δόσης DCFs (EXTERNAL DOSE CONVERSION FACTORS or EXTERNAL DOSE COEFFICIENTS or EXTERNAL DOSE RATE CONVERSION FACTORS) οι οποίοι δίνουν τον ρυθμό δόσης εξωτερικής έκθεσης ανά μονάδα ειδικής ενεργότητας, για κάθε ραδιονουκλίδιο στο περιβαλλοντικό μέσο. Για την εξωτερική έκθεση σε ραδιενέργεια λαμβάνονται υπόψιν μόνο οι διεισδυτικές ακτινοβολίες (δηλ. φωτόνια και ηλεκτρόνια) ενώ παραλείπονται τα μη διεισδυτικά σωματίδια-α. Μάλιστα οργανισμοί με παχύ στρώμα επιδερμίδας ή άλλου τύπου ραδιο-ανθεκτικό περίβλημα δεν επηρεάζονται καθόλου από δόση ακτινοβολίας-α από εξωτερική έκθεση [Till.78]. Συνεπώς, η ακτινοβολία των σωματιδίων-α θεωρείται αμελητέα για εξωτερική έκθεση, ενώ είναι πλήρως υπολογίσιμη στην περίπτωση της εσωτερικής έκθεσης.

Η ουσία του υπολογισμού των DCFs σε επίπεδο ελέγχου, για υδάτινους και χερσαίους οργανισμούς αφορά στον καθορισμό υπερεκτιμημένων τιμών ρυθμού εξωτερικής δόσης από δεδομένες τιμές συγκεντρώσεων ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί η προσαρμοστικότητα των οργανισμών σε προκαθορισμένα όρια

ρυθμού απορροφώμενης δόσης ακτινοβολίας, χωρίς να χρειάζεται λεπτομερής ανάλυση των παραμέτρων του μονοπατιού της έκθεσης και εισαγωγής εξωτερικών παραμέτρων που αφορούν τον οργανισμό [DOE.02]. Η προσεγγιστική διαδικασία υπολογισμού των DCFs σε επίπεδα ελέγχου στους υδάτινους και χερσαίους οργανισμούς βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

1. Το μέσο της έκθεσης (νερό, ίζημα, ή χώμα) θεωρείται άπειρο σε έκταση με ομοιόμορφη κατανομή συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων. Αυτή η υπόθεση οδηγεί σε λογικά συμπεράσματα για τους ρυθμούς δόσης των ραδιονουκλιδίων που είναι διασκορπισμένα στο περιβαλλοντικό μέσο, καθώς η εμβέλεια των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων από την ραδιενεργό διάσπαση δεν ξεπερνά τα λίγα cm και των εκπεμπόμενων φωτονίων τις λίγες δεκάδες cm [Shleien.98]. Πιο συγκεκριμένα, για τους υδάτινους και παρόχθιους οργανισμούς μέσα έκθεσης θεωρούνται το μολυσμένο νερό και ίζημα, ενώ για τους χερσαίους οργανισμούς το μολυσμένο νερό και χώμα.
2. Ο οργανισμός θεωρείται πολύ μικρός (μικρότερος από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων). Η υπόθεση αυτή σε συνδυασμό με την υπόθεση πως το μέσο έκθεσης είναι άπειρο σε έκταση με ομοιόμορφη διασπορά ραδιονουκλιδίων, οδηγεί στο συμπέρασμα πως η εκπεμπόμενη ενέργεια των ραδιονουκλιδίων απορροφάται ομοιόμορφα από το μέσο και ο ρυθμός δόσης του οργανισμού είναι ο ίδιος με αυτόν του περιβαλλοντικού μέσου. Συνεπώς ο υπολογισμός του ρυθμού δόσης γίνεται απ'ευθείας από την ενέργεια των ηλεκτρονίων και φωτονίων που εκπέμπονται ανά διάσπαση από τα ραδιονουκλίδια του μέσου.
3. Επειδή ο οργανισμός θεωρείται πολύ μικρός, όλες οι ενέργειες των ηλεκτρονίων και φωτονίων συνυπολογίζονται στον υπολογισμό των DCFs. Λαμβάνονται υπόψιν ακόμα και οι χαμηλές ενέργειες της εκπομπής-β, καθώς θεωρείται πως οι ραδιοευαίσθητοι ιστοί βρίσκονται στην επιφάνεια του σώματος, όταν ο οργανισμός είναι πολύ μικρός.

Ο υπολογισμός των εξωτερικών DCFs είναι απλή διαδικασία καθώς οι συντελεστές υπολογίζονται από τις γνωστές ενέργειες και εντάσεις εκπομπής των φωτονίων και ηλεκτρονίων, που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση των ραδιενεργών πυρήνων. Στην περίπτωση της έκθεσης υδάτινων οργανισμών σε ραδιονουκλίδια του ιζήματος και του νερού, ο υπολογισμός βασίζεται στην υπόθεση πως ο εκτιθέμενος οργανισμός βρίσκεται το 100% του χρόνου στην μολυσμένη περιοχή και πιο συγκεκριμένα στην διεπιφάνεια νερού-ιζήματος.

Θεωρείται λοιπόν πώς ο οργανισμός βρίσκεται εκτεθειμένος στην διεπιφάνεια δύο ημιάπειρων, ομοιόμορφα ραδιενεργών μέσων, και κατά συνέπεια ο ρυθμός δόσης υπολογίζεται ως το 1/2 του ρυθμού δόσης σε άπειρο ομοιόμορφα ραδιενεργό μέσο [Higley.03].

Οι τιμές των DCFs για τους υδάτινους οργανισμούς, ανάλογα με το μέσον έκθεσης (νερό, ίζημα), είναι υπολογισμένες στο λογισμικό του κώδικα με την διαδικασία που θα αναλυθεί παρακάτω [DOE.02].

Όλες οι ενέργειες των εκπεμπόμενων φωτονίων και ηλεκτρονίων δίνονται σε μονάδες των MeV/διάσπαση (disintegration) (δηλ. Bq·sec). Ξεκινώντας λοιπόν από τις ενέργειες εκπομπής και πάντα σε μονάδες του SI, θα προκύψει ο υπολογισμός των συντελεστών εξωτερικής δόσης (DCF), σε μονάδες ρυθμού δόσης (Gy/y) ανά μονάδα ειδικής ενεργότητας (Bq/kg) για κάθε ραδιονουκλίδιο, με την ακόλουθη διαδικασία:

$$1 \frac{MeV}{dis} = 1 \frac{MeV}{Bq \cdot sec} = 10^3 \frac{keV}{Bq \cdot sec} = 1.6 \cdot 10^{-13} \frac{J}{Bq \cdot sec} = 1.6 \cdot 10^{-13} \frac{Gy \cdot kg}{Bq \cdot sec} = 1.6 \cdot 10^{-13} \frac{Gy/sec}{Bq/kg} = 5.04 \cdot 10^{-6} \frac{Gy/y}{Bq/kg}$$
$$\Rightarrow 1 \frac{MeV}{dis} = 5.04 \cdot 10^{-6} \frac{Gy/y}{Bq/kg}$$

αφού ισχύει:  $1Gy = \frac{J}{kg}$  και  $1keV = 1.6 \cdot 10^{-16} J$

Όπως προαναφέρθηκε για τους υδάτινους οργανισμούς, που αποτελούν το επίκεντρο της μελέτης, στην διεπιφάνεια νερού-ιζήματος ο συντελεστής εξωτερικής δόσης υπολογίζεται ως το 1/2 της αντίστοιχης τιμής σε άπειρο μέσο.

### ➤ DCFs στο ίζημα

Για έκθεση σε μολυσμένο ίζημα, με τις ενέργειες εκπομπής των φωτονίων και ηλεκτρονίων ενός ραδιονουκλιδίου να δίνονται σε MeV/dis, ο συντελεστής εξωτερικής δόσης  $d_{ext}$  θα είναι:

$$(d_{ext})_{sediments} \left( \frac{Gy/y}{Bq/kg} \right) = (2.52 \cdot 10^{-6}) E_{photons+electrons} \left( \frac{MeV}{dis} \right) \quad (\text{σχέση 5.1})$$

➤ *DCFs στο νερό*

Για έκθεση σε μολυσμένο νερό, οι μονάδες (στο SI) του συντελεστή εξωτερικής δόσης δίνονται

σε  $\left(\frac{\text{Gy}}{\text{Bq}}\right) \frac{\text{y}}{\text{m}^3}$ . Θεωρώντας λοιπόν πως η πυκνότητα του νερού είναι  $1 \text{ gr}/\text{cm}^3$ , ο συντελεστής

εξωτερικής δόσης για έκθεση σε μολυσμένο νερό, στην διεπιφάνεια νερού-ιζήματος θα είναι:

$$(d_{ext})_{water} \left(\frac{\text{Gy}}{\text{Bq}}\right) \frac{\text{y}}{\text{m}^3} = (2.52 \cdot 10^{-9}) E_{photons+electrons} \left(\frac{\text{MeV}}{\text{dis}}\right)$$

(σχέση 5.2)

Οι ενέργειες των φωτονίων και ηλεκτρονίων ανά διάσπαση, των επιλεγόμενων ραδιονουκλιδίων-ρυπαντών που χρησιμοποιήθηκαν από το πρόγραμμα πηγάζουν από τις μετρήσεις του Kocher [Kocher.81], όπου με αντικατάσταση στους τύπους 5.1,5.2 προκύπτουν οι προκαθορισμένες DCFs για εξωτερική έκθεση, σε νερό ή ίζημα. Για ορισμένα ραδιονουκλίδια (συμπεριλαμβανομένων των  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  και  $^{238}\text{U}$ ) των οποίων τα προϊόντα αποδιέγερσης είναι βραχύβια και θεωρείται πως βρίσκονται σε ραδιενεργό ισορροπία με το μητρικό ραδιονουκλίδιο, οι εξωτερικές DCFs είναι το άθροισμα των τιμών του μητρικού ραδιονουκλιδίου και των βραχύβιων θυγατρικών του. Για κάποια άλλα ραδιονουκλίδια, οι εξωτερικές DCFs μπορεί να μην περιλαμβάνουν τη συνεισφορά θυγατρικών ραδιονουκλιδίων που είναι σχετικά μακρόβια και θεωρείται πως δεν βρίσκονται σε ραδιενεργό ισορροπία με το μητρικό, και καταγράφονται ξεχωριστά. Παραδείγματα τέτοιων ραδιονουκλιδίων (με το αντίστοιχο θυγατρικό τους στην παρένθεση) είναι:  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{210}\text{Pb}$ ) και  $^{228}\text{Ra}$  ( $^{228}\text{Th}$ ). Οι παραπάνω υποθέσεις δεν είναι καθολικές, καθώς θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και η διαφορετική περιβαλλοντική συμπεριφορά των μητρικών και θυγατρικών ραδιονουκλιδίων.

Παρακάτω παρατίθενται πίνακες με τις τιμές των εξωτερικών DCFs για νερό και ίζημα που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, για την υλοποίηση της λειτουργίας του αρχικού ελέγχου, καθώς και πίνακας με τα θυγατρικά προϊόντα που επιλέχθηκαν και συνυπολογίσθηκαν

στις ενέργειες, για κάθε μητρικό ραδιονουκλίδιο. Η αναφορά επικεντρώνεται μόνο στα ραδιονουκλίδια που αφορούν στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 5.1: Θυγατρικά ραδιονουκλίδια που συνοπολογίζονται στις ενέργειες για τις εξωτερικές DCFs.[DOE.02]

Μητρικό Ραδιονουκλίδιο	Θυγατρικά ραδιονουκλίδια που συνοπολογίζονται στην ενέργεια εκπομπής φωτονίων+ηλεκτρονίων
$^{137}\text{Cs}$	$^{137\text{m}}\text{Ba}$
$^{40}\text{K}$	-
$^{226}\text{Ra}$	$^{222}\text{Rn}+^{214}\text{Pb}+^{214}\text{Bi}+^{214}\text{Po}$
$^{228}\text{Ra}$ (νερό)	$^{228}\text{Ac}$
$^{228}\text{Th}$ (νερό)	$^{224}\text{Ra}+^{220}\text{Rn}+^{212}\text{Pb}+^{212}\text{Bi}+^{208}\text{Tl}$
$^{232}\text{Th}$ (ίζημα)	-
$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{Th}+^{234}\text{Pa}$

Πίνακας 5.2: Εξωτερικές DCFs για έκθεση υδάτινων οργανισμών σε μολυσμένο νερό ή ίζημα. [DOE.02]

Ραδιονουκλίδιο	Ενέργεια εκπομπής φωτονίων+ηλεκτρονίων (MeV/dis)	Συντελεστής εξωτερικής δόσης (External Dose Coefficient) DCF	
		DCF <sub>sediment</sub> $\frac{\text{Gy}}{\text{y}}$ $\left(\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}\right)$	DCF <sub>water</sub> $\frac{\text{Gy}}{\text{y}}$ $\left(\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right)$
$^{137}\text{Cs}$	0.7966	2.0E-06	2.0E-09
$^{40}\text{K}$	0.6104	1.5E-06	1.5E-09
$^{226}\text{Ra}$	2.7023	6.8E-06	6.8E-09
$^{228}\text{Ra}$ (νερό)	1.3677	3.4E-06	3.4E-09
$^{228}\text{Th}$ (νερό)	2.4310	6.1E-06	6.1E-09
$^{232}\text{Th}$ (ίζημα)	0.0121	3.0E-08	3.0E-11
$^{238}\text{U}$	0.9154	2.3E-06	2.3E-09

### 5.3.2.2. Οι DCFs εξωτερικής έκθεσης στον RESRAD-BIOTA

Όπως προαναφέρθηκε, ο υπολογισμός των συντελεστών εξωτερικής δόσης, σε επίπεδο ελέγχου, υλοποιήθηκε με την υπόθεση πώς ο υδάτινος οργανισμός βρίσκεται το 100% του χρόνου στην διεπιφάνεια νερού-ιζήματος και λαμβάνοντας υπόψιν στον υπολογισμό μόνο τις ενέργειες εκπομπής-β & -γ των ραδιονουκλιδίων που είναι ομοιόμορφα καταναμημένα στο μέσο.

Στο δοσιμετρικό μοντέλο, ο υπολογισμός των DCFs για την τελική εύρεση της εξωτερικής δόσης αποτελεί συνάρτηση οργανισμού-ραδιονουκλιδίου. Συνεπώς εκτός από τις ενέργειες εκπομπής-β & -γ, λαμβάνονται υπόψιν και τα βιομετρικά χαρακτηριστικά του υπό έκθεσιν οργανισμού, πιο συγκεκριμένα τις διαστάσεις του και τη μάζα του. Πρακτικά, η υλοποίηση αυτή γίνεται μέσω της τεχνικής προσομοίωσης Monte Carlo.

Στην προσομοίωση μεταφοράς της ακτινοβολίας στην ύλη με την μέθοδο Monte Carlo, η ιστορία ενός σωματιδίου αντιμετωπίζεται ως μία τυχαία ακολουθία από ελεύθερες διαδρομές, όπου η κάθε μία ολοκληρώνεται με την αλληλεπίδραση του σωματιδίου με το περιβάλλον του. Η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια μέρους της ενέργειάς του, σε αλλαγή της διεύθυνσης κίνησής του ή ακόμα και στην παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το σωματίδιο να χάσει όλη του την ενέργεια ή να εξέλθει από το σύστημα που έχει οριστεί. Με το πέρας της ιστορίας καταγράφονται τα φυσικά μεγέθη που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση σωματιδίου-ύλης (π.χ εναποτιθέμενη ενέργεια στο σημείο αλληλεπίδρασης, γωνία εισόδου ή εξόδου από την επιφάνεια κ.α). Εάν ο αριθμός των ιστοριών είναι αρκετά μεγάλος, καταγράφεται η μέση τιμή των φυσικών μεγεθών που απορρέουν από κάθε ιστορία, προσεγγίζοντας με σχετική ακρίβεια τις πραγματικές τιμές. Ουσιαστικά η δημιουργία μίας ιστορίας αποτελεί μία στατιστική δειγματοληψία, όπου τα διακριτά πιθανά γεγονότα που αποτελούν μία διαδικασία αλληλεπίδρασης σωματιδίου-ύλης προσομοιώνονται διαδοχικά.[Βασιλοπ.12]

Στα πλαίσια υλοποίησης του κώδικα RESRAD-BIOTA, ο κάθε οργανισμός τοποθετείται ως ένα ελλειψοειδές υλικό σώμα μέσα στον ραδιενεργό ομοιογενή περιβάλλοντα-χώρο. Μέσω της μεθόδου Monte Carlo καταγράφονται οι πιθανότητες αλληλεπίδρασης των ραδιονουκλιδίων με το υλικό σώμα, ως μία ακολουθία από τυχαίες

αλληλεπιδράσεις. Από την στατιστική επεξεργασία των φυσικών μεγεθών που διέπουν κάθε πιθανή ιστορία αλληλεπίδρασης σωματιδίου-ύλης, ο κώδικας εξάγει τις τελικές DCF εξωτερικής έκθεσης. Βασικές προϋποθέσεις για τον υπολογισμό αποτελούν οι ακόλουθες παραδοχές [FASSET.03]:

1. Οι οργανισμοί παρουσιάζονται ως ελλειψοειδή. Το μέγεθος μπορεί να επιλεγεί μέσω προκαθορισμένης κλίμακας ενώ η μάζα μπορεί να καταγραφεί με ακρίβεια.
2. Πιθανές διαφορές πυκνότητας μεταξύ του οργανισμού και του μέσου έκθεσης αγνοούνται.
3. Τα ραδιονουκλίδια κατανέμονται ομοιόμορφα στους ιστούς του οργανισμού.
4. Στον υπολογισμό των εξωτερικών DCFs, θεωρείται πως ο οργανισμός βυθίζεται σε άπειρο μέσο απορρόφησης με σταθερή ειδική ενεργότητα.

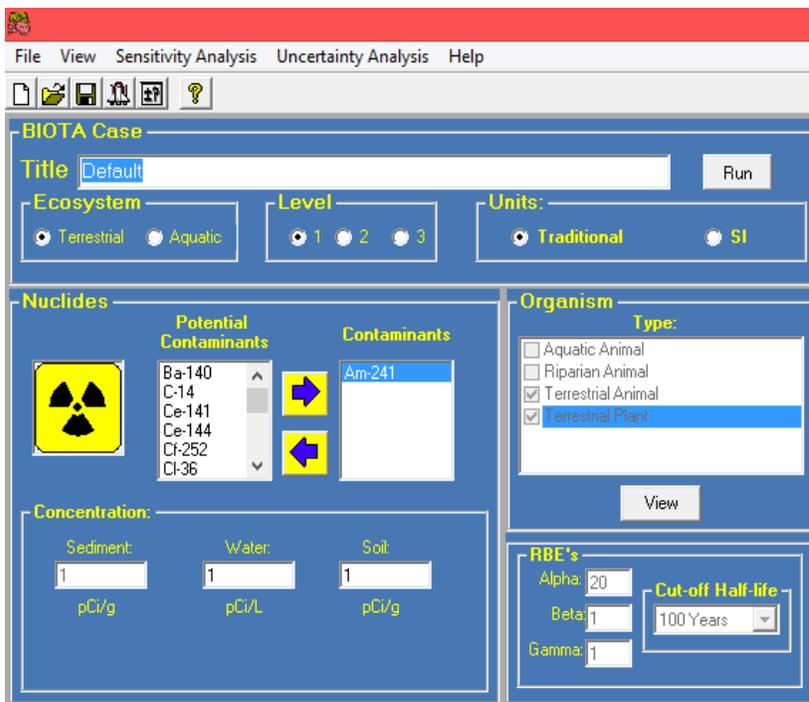
Το δοσιμετρικό μοντέλο επιτρέπει την εκτίμηση του ρυθμού έκθεσης ζωντανών οργανισμών σε ραδιενέργεια, λόγω περιβαλλοντικής ραδιενεργού ρύπανσης. Για το σκοπό αυτό, οι συντελεστές εξωτερικής δόσης (DCFs), που είναι χαρακτηριστικοί για κάθε ραδιονουκλίδιο (αφού σχετίζονται με την ενέργεια εκπομπής του), επιτρέπουν την εκτίμηση της εξωτερικής δόσης, σε συνάρτηση με το ενδιαίτημα (habitat) και το μέγεθος του οργανισμού-στόχου. Συνεπώς οι εξωτερικές DCFs υπολογίζονται από το μοντέλο μέσω Monte Carlo σαν συνάρτηση των προκαθορισμένων παραμέτρων (default parameters), που αφορούν στις ενέργειες εκπομπής-β & -γ ανά ραδιονουκλίδιο και τα βιομετρικά χαρακτηριστικά του οργανισμού.

Ο τελικός υπολογισμός του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης απορρέει από τον κώδικα, πολλαπλασιαστικά, από τον DCF που προκύπτει για το συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο που μελετάται σε συγκεκριμένο οργανισμό με γνωστά βιομετρικά χαρακτηριστικά, και από την συγκέντρωση που εισάγει ο ερευνητής για το συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο, από μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο (real time data).

### 5.3.3. Βήμα προς βήμα απεικονιστική παρουσίαση του RESRAD-BIOTA

Σε αυτό το κομμάτι της μελέτης θα γίνει μία λεπτομερής απεικονιστική παρουσίαση του κώδικα, ώστε να γίνει πρακτικά κατανοητός ο τρόπος εισαγωγής και τελικής επεξεργασίας των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, που εισάγει ο χρήστης, από τον κώδικα. Ο κώδικας έχει την δυνατότητα υπολογισμού εξωτερικής και εσωτερικής δόσης, αλλά επειδή η εργασία επικεντρώνεται αποκλειστικά στον υπολογισμό των εξωτερικών δόσεων, η ανάλυση του RESRAD θα γίνει προς την ίδια κατεύθυνση. Όπως έχει προαναφερθεί, τα αποτελέσματα του ρυθμού δόσης που δίνει ο κώδικας αποτελούν συνδυασμό των προκαθορισμένων μεγεθών (default parameters) του προγράμματος και των μεγεθών σε πραγματικό χρόνο που εισάγει ο χρήστης. Παρακάτω θα παρουσιαστεί η δομή του προγράμματος, απεικονιστικά και με αναλυτική επεξήγηση των βημάτων που καλείται ο χρήστης να ακολουθήσει για το τελικό αποτέλεσμα.

#### 5.3.3.1. Εισαγωγή δεδομένων και μετρήσεων στο μοντέλο RESRAD-BIOTA



Εικόνα 5.6: RESRAD-BIOTA

✓ Με το άνοιγμα του RESRAD-BIOTA εμφανίζεται η πλατφόρμα εισαγωγής και επεξεργασίας των δεδομένων που εισάγονται, η οποία έχει σε αρχικό στάδιο την μορφή που παρουσιάζεται στην διπλανή εικόνα (Εικόνα 5.6). Παρατηρείται ο διαχωρισμός σε τέσσερις κατηγορίες δεδομένων οι οποίες και θα αναλυθούν ξεχωριστά :

- I. *BIOTA Case*
- II. *Nuclides*
- III. *Organism*
- IV. *RBE's*

I. Η εισαγωγή και η επιλογή των δεδομένων και των παραμέτρων για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων ξεκινάει στο *BIOTA Case* με τις ακόλουθες επιλογές (Εικόνα 5.7):



Εικόνα 5.7: RESRAD-BIOTA

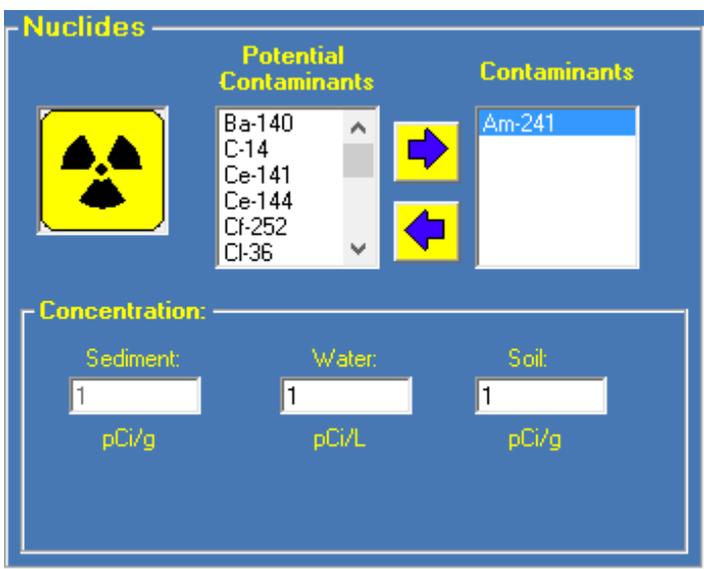
- *Title*: Δίνεται ο τίτλος της ανάλυσης που θα υλοποιηθεί από τον κώδικα.

- *Ecosystem*: Επιλέγεται το οικοσύστημα μελέτης, χερσαίο (terrestrial) ή υδάτινο (aquatic).

- *Level*: Δίνεται η δυνατότητα επιλογής τριών επιπέδων ανάλυσης όπου το πρώτο επίπεδο αντιστοιχεί σε γενικό προσυμπτωματικό έλεγχο, το δεύτερο σε ειδικό προσυμπτωματικό έλεγχο και το τρίτο σε πλήρη ειδική ανάλυση. Παρακάτω θα αποσαφηνιστεί ο ρόλος του κάθε επιπέδου στην ανάλυση και επεξεργασία.
- *Units*: Επιλογή συστήματος μονάδων, σε παραδοσιακό (traditional) ή S.I.
- *Run*: Εντολή εκτέλεσης του κώδικα.

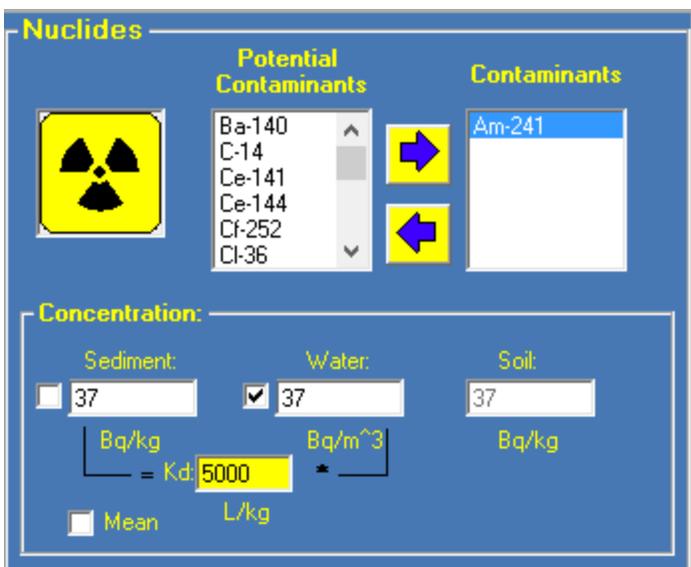
- *Ecosystem*: Επιλέγεται το

II. Σε αυτό το στάδιο επιλέγονται από την λίστα των πιθανών ραδιονουκλιδίων-ρυπαντών (φυσικής και τεχνητής προέλευσης) που



Εικόνα 5.8: RESRAD-BIOTA

περιλαμβάνει το πρόγραμμα (potential contaminants), εκείνα που θα μελετηθούν. Σε κάθε επιλεγόμενο ραδιονουκλίδιο εισάγεται η τιμή της συγκέντρωσής του, ανάλογα με το οικοσύστημα και το ενδιαίτημα του εκτιθέμενου οργανισμού. Στους υδάτινους οργανισμούς η εισαγωγή των συγκεντρώσεων αφορά μόνο στο νερό και στο ίζημα, ενώ στους χερσαίους στο νερό και στο χώμα. Στο πρώτο επίπεδο ανάλυσης (Εικόνα 5.8), ο ρόλος του χρήστη περιορίζεται στην επιλογή των ραδιονουκλιδίων και την εισαγωγή των συγκεντρώσεών τους.



Εικόνα 5.9: RESRAD-BIOTA

Στην περίπτωση που επιλεγθεί το 2ο επίπεδο (όμοια και στο 3ο) για υδάτινο οικοσύστημα, σε μονάδες του S.I, θα προκύψουν δύο καινούριες μεταβλητές, η  $K_d$  και η Mean (Εικόνα 5.9).

➤ *Mean*: Με την επιλογή της παραμέτρου Mean υποδηλώνεται η εισαγωγή μέσων τιμών στις συγκεντρώσεις των επιλεγόμενων ραδιονουκλιδίων. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο όταν υπάρχουν χρονοεξαρτώμενα δεδομένα.

➤  $K_d$ : Όπως έχει προαναφερθεί βασικός παράγοντας στην αξιόπιστη μελέτη και εξαγωγή

συμπερασμάτων είναι το ενδιαίτημα (haditat) του κάθε θαλάσσιου οργανισμού, αφού αποτελεί την αποκλειστική ραδιενεργό πηγή στην εξωτερική έκθεση. Ο κώδικας δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής συγκεντρώσεων του κάθε ραδιονουκλιδίου, για το νερό και το ίζημα, ή και ξεχωριστά για το καθένα, ανάλογα με τον τόπο διαβίωσης του οργανισμού (η αναφορά γίνεται πάντα σε υδάτινο οικοσύστημα). Στην περίπτωση διαβίωσης στην διεπιφάνεια νερού-ιζήματος (επιβενθικά είδη) όπου απαιτούνται οι συγκεντρώσεις του ραδιονουκλιδίου και στα δύο μέσα, για την ορθή εξαγωγή συμπερασμάτων θα πρέπει τα δείγματα να είναι από γειτονικές περιοχές νερού και ιζήματος. Στην περίπτωση που ο ερευνητής δεν έχει δεδομένα από γειτονικά δείγματα, ο κώδικας παρέχει την δυνατότητα χρήσης του «πιθανού» συντελεστή κατανομής  $K_d$ , μέσω του οποίου υπολογίζεται το νερό ή το ίζημα για το οποίο δεν υπάρχουν μετρήσεις. Οι τιμές των  $K_d$  είναι χαρακτηριστικές για κάθε ραδιονουκλίδιο και προκαθορισμένες από την βιβλιογραφία [DOE.02].

Σε περίπτωση ύπαρξης μετρήσεων για το νερό και όχι για το γειτονικό ίζημα, η συγκέντρωση για το «χαμένο» ίζημα υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{\text{sediment}} = 0.001 \times C_{\text{water}} \times K_{d, \text{most probable}} \quad (\text{σχέση 5.3})$$

όπου:  $C_{\text{sediment}}$  (Bq/kg) η συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου στο ίζημα

0.001 ( $\text{m}^3/\text{L}$ ) ο παράγοντας μετατροπής των L σε  $\text{m}^3$

$C_{\text{water}}$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) η συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου στο νερό

$K_{d_{most\text{-}probable}}$  (L/kg) ο συντελεστής κατανομής που σχετίζει την συγκέντρωση στο νερό με την αντίστοιχη στο ίζημα, για γειτονικά δείγματα. Για τον παραπάνω υπολογισμό χρησιμοποιούνται μέσες τιμές των  $K_d$ , ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο ρεαλιστικά.

Αντίστοιχα, σε περίπτωση ύπαρξης μετρήσεων για το ίζημα και όχι για το γειτονικό νερό, η συγκέντρωση για το «χαμένο» νερό από το RESRAD υπολογίζεται ως εξής (οι όροι έχουν διευκρινιστεί παραπάνω):

$$C_{water} = \frac{C_{sediment}}{0.001 \times K_{d_{most\text{-}probable}}} \quad (\text{σχέση 5.4})$$

Πίνακας 5.3: Πιθανές τιμές των  $K_d$  για ίζημα ή νερό, σε υδάτινο οικοσύστημα, όταν υπάρχει απουσία δεδομένων για γειτονικό νερό ή ίζημα αντίστοιχα [DOE.02].

Ραδιονουκλίδιο	Πιθανές $K_d$ (L/kg or mL/g)
$^{137}\text{Cs}$	500
$^{40}\text{K}$	5.5
$^{226}\text{Ra}$	70
$^{228}\text{Ra}$	70
$^{228}\text{Th}$	60000
$^{232}\text{Th}$	60000
$^{238}\text{U}$	50

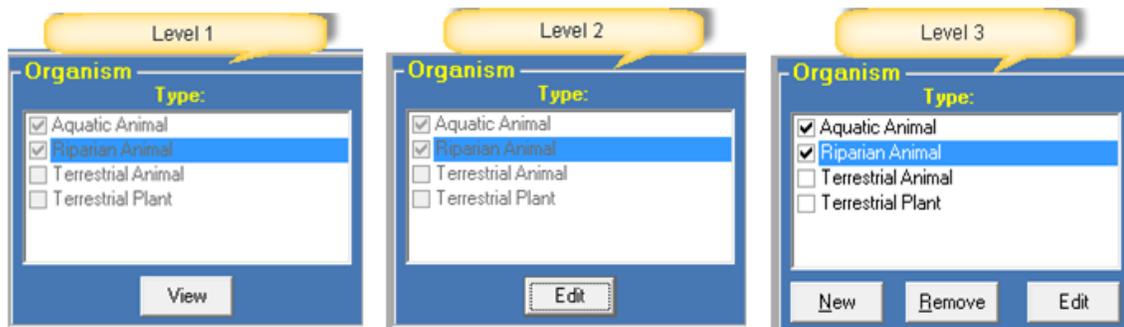
III. *Organism*: Στο παράθυρο Organism γίνεται η επιλογή του οργανισμού που εκτίθεται στο ραδιονουκλίδιο του περιβάλλοντός του, με την δυνατότητα εισαγωγής και επεξεργασίας δεδομένων μέσω του Organism-Specific Parameter (Εικόνα 5.12). Οι δυνατότητες επιλογών του χρήστη ποικίλλουν ανάλογα με το επίπεδο εργασίας που θα επιλεγεί (Εικόνα 5.11).

Πιο συγκεκριμένα:

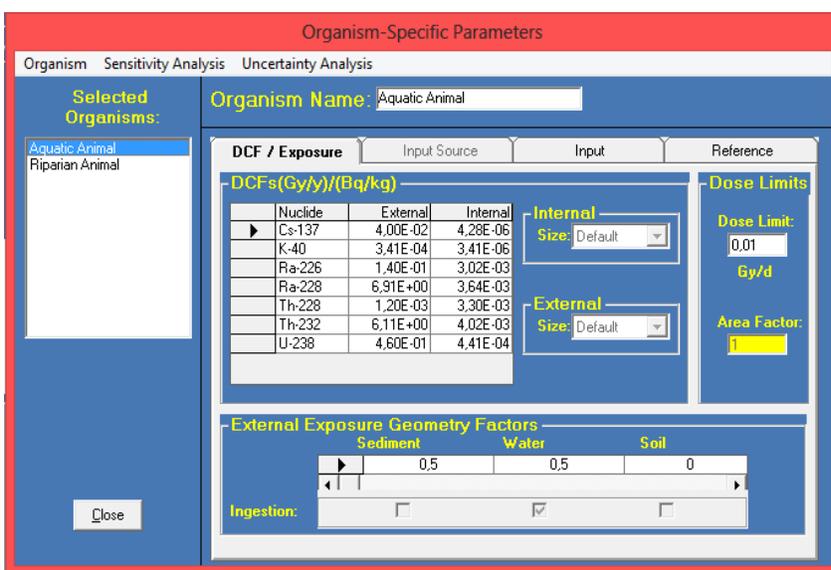
- ✓ Στο level 1, ο χρήστης παρατηρεί μόνο τους προεπιλεγμένους οργανισμούς, ανάλογα με το οικοσύστημα (Εικόνα 5.10), και τις αντίστοιχες προεπιλεγμένες παραμέτρους αυτών.



Εικόνα 5.10: Γράφημα με τους προεπιλεγμένους οργανισμούς του RESRAD-BIOTA, ανάλογα με το επιλεγμένο οικοσύστημα.



Εικόνα 5.11: RESRAD-BIOTA

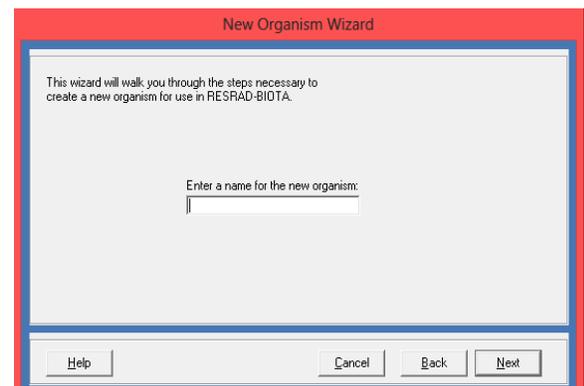


Εικόνα 5.12: RESRAD-BIOTA

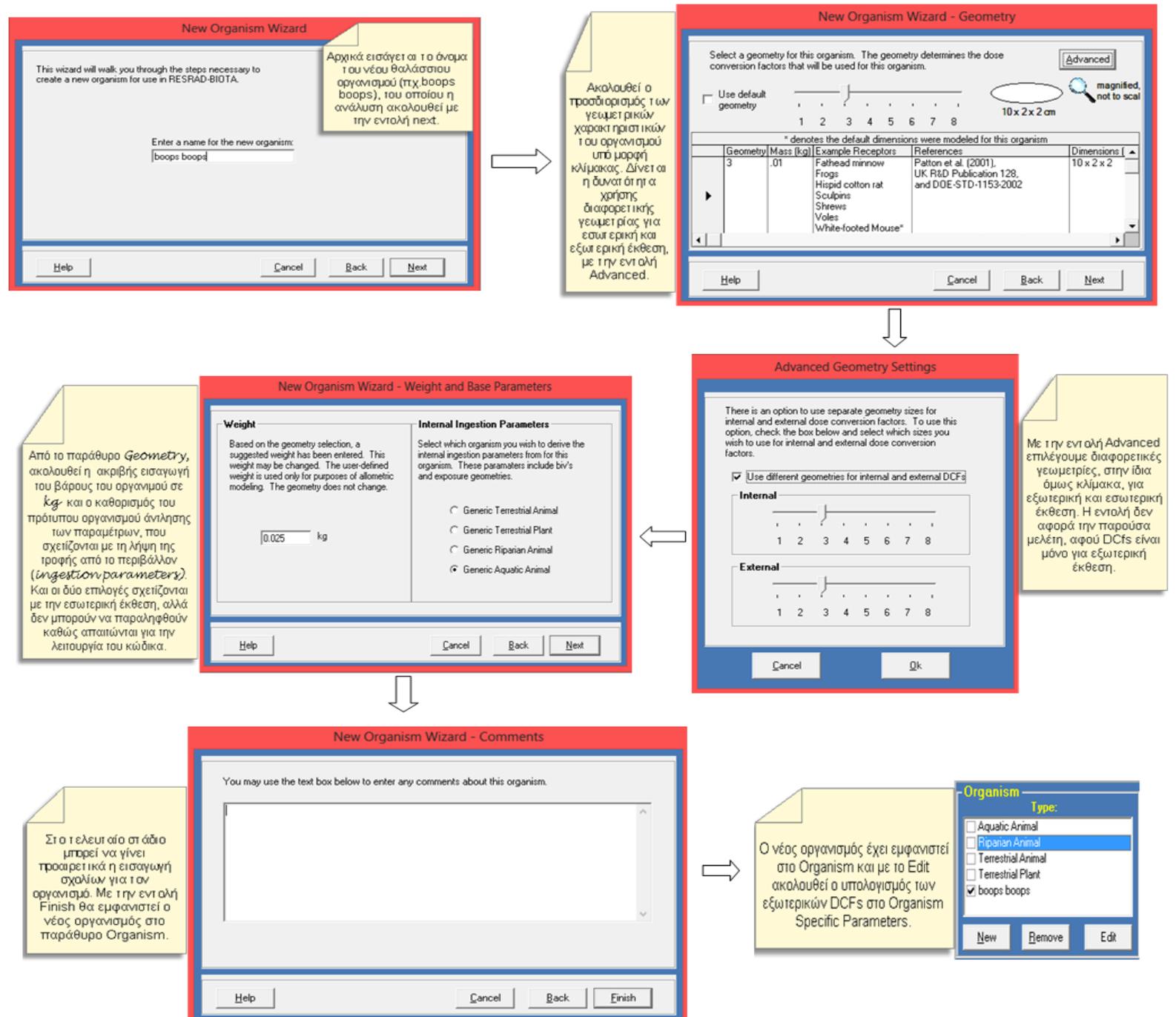
επεξεργασίας των παραμέτρων του, όπως και η δυνατότητα εισαγωγής ενός νέου οργανισμού (από την εντολή New του Organism) μέσω του New Organism Wizard (Εικόνα 5.13).

Εικόνα 5.13: RESRAD-BIOTA

- ✓ Στο level 2 δίνεται η δυνατότητα επεξεργασίας συγκεκριμένων παραμέτρων των προεπιλεγμένων οργανισμών στο Organism-Specific Parameters.
- ✓ Στο level 3 δίνεται πλήρης ευχέρεια επιλογής οργανισμού και

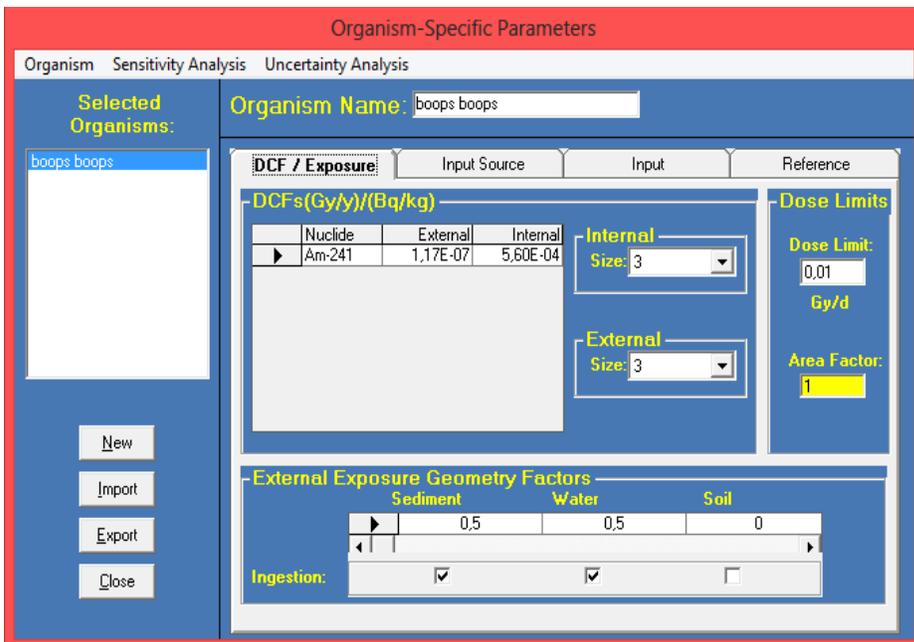


- *New Organism Wizard* (Εικόνα 5.14): Στο τρίτο επίπεδο ανάλυσης, ο χρήστης μπορεί να ορίσει ένα νέο οργανισμό και να προσδιορίσει τα βιομετρικά του χαρακτηριστικά (διαστάσεις και μάζα), μέσω αυτού του παραθύρου.



Εικόνα 5.14: RESRAD-BIOTA: Λειτουργία του New Organism Wizard.

- *Organism Specific Parameters:* Στο παράθυρο αυτό υλοποιείται ο υπολογισμός των DCF, εσωτερικών και εξωτερικών, μετά από τα στοιχεία που έχουν εισαχθεί για τον οργανισμό που μελετάται.



Εικόνα 5.15: RESRAD-BIOTA: Organism Specific Parameters

Παρατηρείται (Εικόνα 5.15) η εμφάνιση του οργανισμού που είχε εισαχθεί στο New Organism Wizard, με τη γεωμετρία που έχει προσδιοριστεί και την τιμή των DCF (σε  $\frac{Gy}{y}$  /  $\frac{Bq}{kg}$ ) εσωτερικών και εξωτερικών, για το ραδιονουκλίδιο επιλογής.

✓ *Dose Limit:* Η τιμή αυτή αφορά στη μέγιστη επιτρεπτή απορροφούμενη δόση (=0,01Gy/d) στους

υδάτινους οργανισμούς από έκθεση σε ραδιενέργεια [DOE.93].

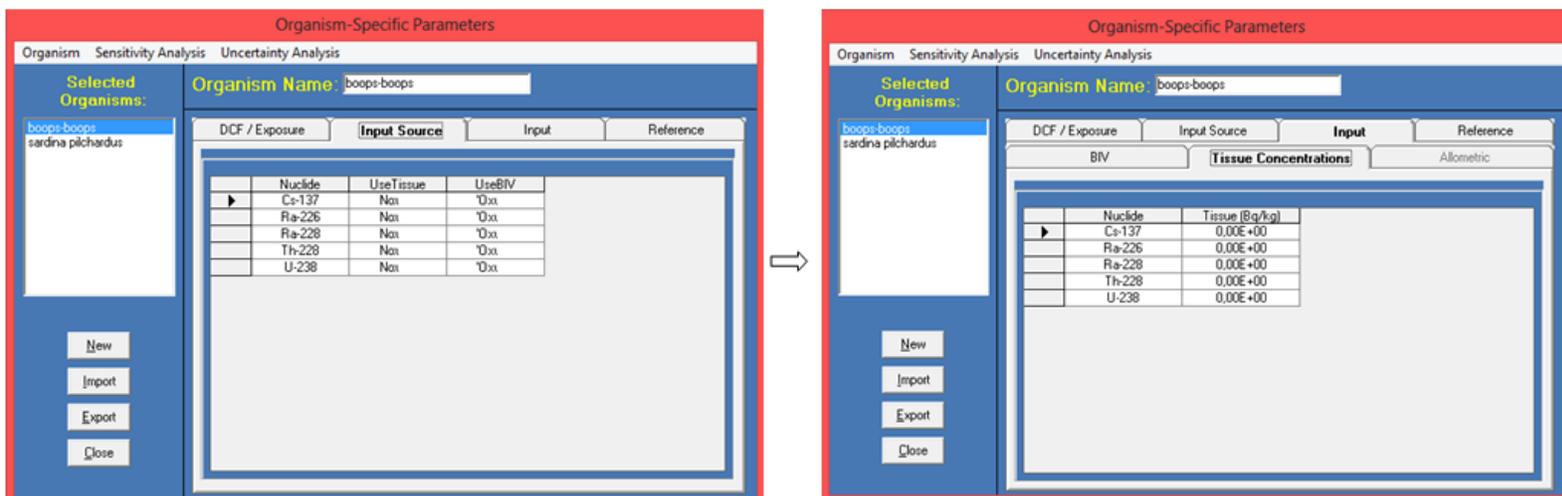
*Area Factor:* Διορθωτικός προκαθορισμένος παράγοντας (=1) που σχετίζεται με την περιοχή μελέτης ή τον χρόνο παραμονής του οργανισμού σε αυτή.

Και οι δύο παραπάνω παράγοντες είναι ανεξάρτητοι του ραδιονουκλιδίου και υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής τους.

- ✓ *External Exposure Geometry Factors:* Σε αυτό το κομμάτι δηλώνεται ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνει την τροφή του ο οργανισμός (υδάτινος οργανισμός). Πιο συγκεκριμένα εάν ζει στην διεπιφάνεια νερού-ιζήματος και τρέφεται και από τα δύο μέσα, επιλέγονται και τα δύο μέσα, με 50% συμμετοχή το καθένα. Αντίστοιχα εάν ζει μόνο στο ένα από τα δύο μέσα, επιλέγεται μόνο το συγκεκριμένο, με συμμετοχή 100%.

Το πρόγραμμα υπολογίζει τις τιμές των DCFs για εξωτερική και για εσωτερική δόση χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα επιλογής από το χρήστη μόνο της μίας εκ των δύο. Στην παρούσα εργασία η μελέτη αφορά μόνο εξωτερική έκθεση συνεπώς οι εσωτερικές DCFs είναι

περιττές. Όμως στην τελική δόση το επιθυμητό είναι να υπάρχει ο εμφανής διαχωρισμός των δύο τύπων έκθεσης από τον κώδικα. Αυτό επιτυγχάνεται στο παράθυρο *Input Source*.



Εικόνα 5.16: RESRAD-BIOTA: *Input Source*

Στο παράθυρο *Input Source* δίνεται η δυνατότητα επιλογής του τρόπου εσωτερικής ραδιενεργού έκθεσης του επιλεγόμενου οργανισμού, μέσω των εντολών *Use Tissue* & *Use BIV* (Εικόνα 5.16). Με την επιλογή του *Use BIV* ο χρήστης δίνει την εντολή στο πρόγραμμα να χρησιμοποιήσει για τον υπολογισμό της εσωτερικής δόσης τους προκαθορισμένους παράγοντες βιοσυσσώρευσης (Default Bioaccumulation Factors ( $B_{iv,S}$ )). Η βιοσυσσώρευση αφορά την κατακράτηση των ραδιενεργών ρύπων στους ιστούς των φυτών και των ζώων, μέσω της αναπνοής και της διατροφής. Ασφαλώς το φαινόμενο αυτό εξαρτάται από περιβαλλοντικούς και βιολογικούς παράγοντες οι σημαντικότεροι εκ των οποίων είναι: η συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου, ο χρόνος ημιζωής του, ο χρόνος έκθεσης του οργανισμού, το είδος του οργανισμού, η ηλικία του, το φύλο, ο ιστός/όργανο και ο βιολογικός του κύκλος. Οι τρεις πρώτοι ανήκουν στους περιβαλλοντικούς παράγοντες, ενώ οι υπόλοιποι στους βιολογικούς [Μαμάης,10]. Στην παρούσα μελέτη όπου το επιθυμητό είναι ο υπολογισμός μόνο των εξωτερικών δόσεων, χρησιμοποιείται η εντολή *Use Tissue*. Η επιλογή αυτή δίνει την δυνατότητα να διαχωριστούν πλήρως οι εσωτερικές και εξωτερικές ραδιενεργές συνεισφορές των ραδιονουκλιδίων στον οργανισμό. Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση που εισάγεται στο μέσον επιλογής (νερό ή/και ίζημα), αντιστοιχεί μόνο σε εξωτερική δόση, ενώ η εσωτερική υπολογίζεται από την συγκέντρωση που θα εισαχθεί στον ιστό για κάθε ραδιονουκλίδιο (Εικόνα 5.16). Εφόσον δεν μελετάται εσωτερική δόση, η συγκέντρωση στον ιστό θεωρείται ίση με 0.

#### IV. RBEs (Relative Biological Effectiveness) :



Εικόνα 5.17: RESRAD-BIOTA: RBEs

ζωντανούς οργανισμούς και σχετίζεται άμεσα με τον ιστό που εξετάζεται,

τον τρόπο έκθεσης του ιστού στην ακτινοβολία και την ενέργεια της ακτινοβολίας. Πρακτικά, η RBE για ακτινοβολία τύπου R σε ιστό τύπου T μετράται ως ο λόγος της απορροφούμενης δόσης μίας ακτινοβολίας αναφοράς τύπου X ( $D_X$ ) προς την απορροφούμενη δόση της ακτινοβολίας τύπου R ( $D_R$ ), που προκαλεί το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα στον ιστό T [DOE.02].

$$RBE = \frac{D_X}{D_R} \quad (\text{σχέση 5.5})$$

Ποσοτικά και οι δύο δόσεις εξαρτώνται από την ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται από τα κύτταρα του ιστού.

Στο RESRAD-BIOTA όπως και σε όλα τα δοσιμετρικά μοντέλα που σχετίζονται με την επίδραση ιονίζουσας ακτινοβολίας σε μη ανθρώπινους ζώντες οργανισμούς, οι τιμές των RBEs κυμαίνονται [DOE.02],[Ulanovsky.08]:

- σωματίδια-α: 1-20 (με πιο συνήθη τιμή το 10)
- σωματίδια-β: 1-3 (με πιο συνήθη τιμή το 3)
- ακτινοβολία-γ: 1-1.5 (με πιο συνήθη τιμή το 1)

Οι τιμές των RBEs σχετίζονται άμεσα με την ακτινοβόληση του ιστού, γεγονός που δεν μας ενδιαφέρει στην μελέτη καθώς εξετάζεται αποκλειστικά η εξωτερική δόση. Συνεπώς διατηρούνται οι προκαθορισμένες τιμές των RBE από το πρόγραμμα, καθώς δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα (Εικόνα 5.17).

### 5.3.3.2. Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο μοντέλο RESRAD-BIOTA

Μετά την εισαγωγή στο πρόγραμμα των μετρήσεων και παραμέτρων που αφορούν στο αντικείμενο μελέτης, τα αποτελέσματα προκύπτουν από την εντολή *Run* στο παράθυρο του *Biota Case* (Εικόνα 5.7).

Στο πρώτο επίπεδο, γίνεται έλεγχος της αξιοπιστίας και της ορθότητας των τιμών των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων που εισάγονται από το χρήστη, με τη βοήθεια του BCG (*Biota Concentration Guide*). Ο BCG περιλαμβάνει προκαθορισμένες τιμές συγκεντρώσεων που υπολογίζονται από τον κώδικα για κάθε περιβαλλοντικό μέσο (νερό ή ίζημα) και ραδιονουκλίδιο. Εξαρτώνται άμεσα από τις DCFs (Πίνακας 5.2) και από το μέγιστο επιτρεπτό όριο δόσης που θα λάβει ο οργανισμός, ανάλογα με το οικοσύστημα αναφοράς. Εν προκειμένω 0,01Gy/d για το υδάτινο οικοσύστημα [DOE.93]. Οι BCGs του Πίνακα 5.4 βασίζονται στις προκαθορισμένες (default) τιμές των DCFs που δίδονται από το πρόγραμμα (Πίνακας 5.2). Με την εισαγωγή συγκεκριμένων στοιχείων για τον προς μελέτη οργανισμό (μήκος), αυτές αλλάζουν, με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται και οι BCGs. Πρακτικά λοιπόν οι BCGs θέτουν τα όρια επικινδυνότητας για το οικοσύστημα μελέτης.

Πίνακας 5.4: BCGs για νερό και ίζημα, σε υδάτινο οικοσύστημα [DOE.02].

Ραδιονουκλίδιο	BCG (sediment) Bq/kg	BCG (water) Bq/m <sup>3</sup>
<sup>137</sup> Cs	1.8E+06	3.9E+04
<sup>40</sup> K	2.2E+06	1.1E+05
<sup>226</sup> Ra	5.4E+05	3.8E+02
<sup>228</sup> Ra	1.1E+06	3.1E+02
<sup>228</sup> Th	6.1E+05	1.4E+04
<sup>232</sup> Th	1.2E+08	1.1E+04
<sup>238</sup> U	1.6E+06	8.3E+03

Με την εισαγωγή από το χρήστη των συγκεντρώσεων που έχουν μετρηθεί σε πραγματικό χρόνο (Εικόνα 5.8), υπολογίζεται από το πρόγραμμα το άθροισμα των λόγων των συγκεντρώσεων του κάθε ραδιονουκλιδίου προς την αντίστοιχη τιμή στον BCG, και για τα δύο

περιβαλλοντικά μέσα του υδάτινου περιβάλλοντος. Στην περίπτωση που το τελικό άθροισμα είναι μικρότερο του 1, οι εισαγόμενες συγκεντρώσεις θεωρούνται αξιόπιστες και χρησιμοποιούνται στο επόμενο στάδιο ανάλυσης. Στην περίπτωση όμως που υπερβαίνει την μονάδα, θεωρούνται ιδιαίτερος υψηλές και πρέπει να επαναξεταστούν.

Πιο συγκεκριμένα, για να περάσει ο χρήστης το αρχικό στάδιο αξιολόγησης θα πρέπει να ισχύει:

✓ Για Υδάτινο Οικοσύστημα

$$\left[ \frac{C_A}{BCG_A} + \frac{C_B}{BCG_B} + \dots + \frac{C_N}{BCG_N} \right]_{water} + \left[ \frac{C_A}{BCG_A} + \frac{C_B}{BCG_B} + \dots + \frac{C_N}{BCG_N} \right]_{sediment} < 1.0$$

(σχέση 5.6)

όπου  $C_A, C_B, \dots, C_N$  οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων A, B, ... N αντίστοιχα στο κάθε μέσο και  $BCG_A, BCG_B, \dots, BCG_N$  οι αντίστοιχες προκαθορισμένες τιμές των συγκεντρώσεων στον BCG.

Συνεπώς στο level 1, ο κώδικας εξάγει αποτελέσματα σχετικά με τις BCGs και τους λόγους που προκύπτουν από τις συγκεντρώσεις που

Αποτελέσματα πρώτου επιπέδου σχετικά με τους λόγους των συγκεντρώσεων (Ratio) κάθε ραδιονουκλιδίου για το νερό. Αντίστοιχη επιλογή υπάρχει για το ίζημα, ενώ με την επιλογή Ecosystem δίνεται το άθροισμα των λόγων και των δύο μέσων.



Εικόνα 5.18: RESRAD-BIOTA: Results level 1

Η BCG report δίνει αναλυτικό πίνακα όλων των τιμών που υπολόγισε ο RESRAD.

	Aquatic Animal							
	Water				Sediment			
	Nuclide	Concentration (Bq/m <sup>3</sup> )	BCG (Bq/m <sup>3</sup> )	Ratio	Limiting Organism	Concentration (Bq/kg)	BCG (Bq/kg)	Ratio
Cs-137	2.7	3.87E+04	5.18E-05	No	1.35	1.82E+08	5.48E-07	No
K-40	10700	1.07E+05	9.97E-02	No	638.5	2.15E+08	2.97E-04	No
Ra-226	1.55	3.77E+02	2.65E-03	No	39.6	5.36E+05	7.27E-05	No
Ra-228	3.14	3.14E+02	9.55E-03	No	0	1.07E+08	0.00E+00	No
U-238	37.78	8.26E+03	4.48E-03	Yes	48.1	1.59E+08	3.03E-05	No
Summed	-	-	1.18E-01	-	-	-	4.01E-04	-

Εικόνα 5.19: RESRAD-BIOTA: BCG Report

εισάγονται. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής του επιθυμητού περιβαλλοντικού μέσου, όπου παρατηρείται ο υπολογισμός των κλασμάτων των συγκεντρώσεων ξεχωριστά, για κάθε ραδιονουκλίδιο στο μέσο επιλογής (Εικόνα 5.18) . Με την BCG Report παρέχεται αναλυτικός πίνακας με τις μετρήσεις που έχουν εισαχθεί αλλά και με το σύνολο των λόγων (ratios) που υπολογίζει ο κώδικας (Εικόνα 5.19).

- ✓ Ο τελικός υπολογισμός των εξωτερικών δόσεων υλοποιείται στο τρίτο στάδιο μελέτης, όπου δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής οργανισμού με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (βιομετρικά και διαβίωσης). Συνεπώς εξάγονται αποτελέσματα βασισμένα στον οργανισμό μελέτης. Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, η μελέτη αφορά εξωτερική δόση μόνο, συνεπώς γίνεται επιλογή Use Tissue, στο οποίο οι εισαγόμενες τιμές θα είναι 0.

### Tissue Concentration Report for Level 3 in Bq/kg

Title: demersal-pelagic(2)

mullus barbatus	
Nuclide	Tissue Concentration
Cs-137	0.00E+00
K-40	0.00E+00
Ra-226	0.00E+00
Ra-228	0.00E+00
U-238	0.00E+00

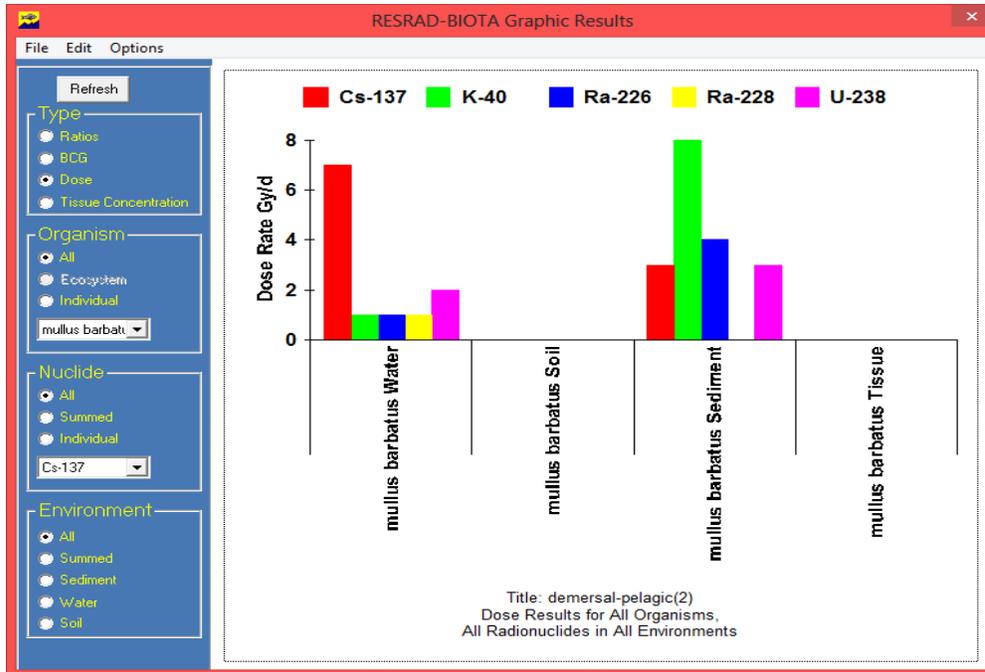
### Dose Report for Level 3 in Gy/d

Title: demersal-pelagic(2)

mullus barbatus					
Nuclide	Water	Soil	Sediment	Tissue	Summed
Cs-137	7.65E-12	0.00E+00	3.83E-09	0.00E+00	3.83E-09
K-40	1.36E-08	0.00E+00	8.10E-07	0.00E+00	8.23E-07
Ra-226	1.21E-11	0.00E+00	4.71E-07	0.00E+00	4.71E-07
Ra-228	1.74E-11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.74E-11
U-238	2.87E-11	0.00E+00	3.72E-08	0.00E+00	3.73E-08
Summed	1.36E-08	0.00E+00	1.32E-06	0.00E+00	1.34E-06

Εικόνα 5.20: RESRAD-BIOTA: Πίνακες αποτελεσμάτων

Προκύπτει συνεπώς πίνακας με τις εξωτερικές δόσεις (σε Gy/d) σε κάθε μέσον, και επιλογές αναλυτικής παρουσίασης των αποτελεσμάτων (Dose Report, Tissue Report) (Εικόνα 5.20).



Εικόνα 5.21: RESRAD-BIOTA: Graphic Results

Παράλληλα με τους πίνακες των αποτελεσμάτων, ο κώδικας παρέχει και τη δυνατότητα υλοποίησης γραφημάτων (Εικόνα 5.21). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει τις μεταβλητές του γραφήματος ανάλογα με το είδος του αποτελέσματος (λόγος συγκεντρώσεων, BCGs, ρυθμός δόσης, συγκέντρωση στον ιστό), τον προς μελέτη οργανισμό, το ραδιονουκλίδιο και το περιβάλλον διαβίωσης.

## ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ***

***Βασικές παράμετροι για τον συγκριτικό υπολογισμό του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε  $(2\pi(A)+2\pi(B))$  και  $4\pi$  γεωμετρία στο θαλάσσιο περιβάλλον με συμβατικές εξισώσεις και το RESRAD-BIOTA.***



**6.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ**  $\sum_i I_i E_{v_i}$

Για κάθε ραδιονουκλίδιο υπάρχουν ορισμένες φωτοκορυφές στο ενεργειακό του φάσμα, κατάλληλες για την ποσοτική του ανάλυση, ανάλογα με την έντασή τους (δηλαδή το ποσοστό εκπομπής γ-κβάντων ανά διάσπαση), την θέση τους ως προς τις άλλες φωτοκορυφές και το τμήμα Compton του φάσματος, που προκαλείται από φωτοκορυφές μεγαλύτερης ενέργειας που βρίσκονται στην περιοχή της φωτοκορυφής.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού εξωτερικής δόσης των προς εξέταση ραδιονουκλιδίων, απαραίτητος είναι ο αρχικός υπολογισμός των αθροισμάτων των γινομένων της ενέργειας κάθε φωτοκορυφής επί την έντασή της, για κάθε ραδιονουκλίδιο. Τα ραδιονουκλίδια που εξετάζονται δίνονται στον ακόλουθο πίνακα μαζί με τους χρόνους ημιζωής:

Πίνακας 6.1: Ραδιονουκλίδια θαλάσσιου περιβάλλοντος με τους αντίστοιχους χρόνους ημιζωής τους. [chem. web]

Ραδιονουκλίδιο	Χρόνος ημιζωής (years)
$^{40}\text{K}$	$1.28 \times 10^9$
$^{226}\text{Ra}$	1600
$^{228}\text{Ra}$	5.75
$^{228}\text{Th}$	1.91
$^{232}\text{Th}$	$1.4 \times 10^{10}$
$^{238}\text{U}$	$4.47 \times 10^9$
$^{137}\text{Cs}$	30.17

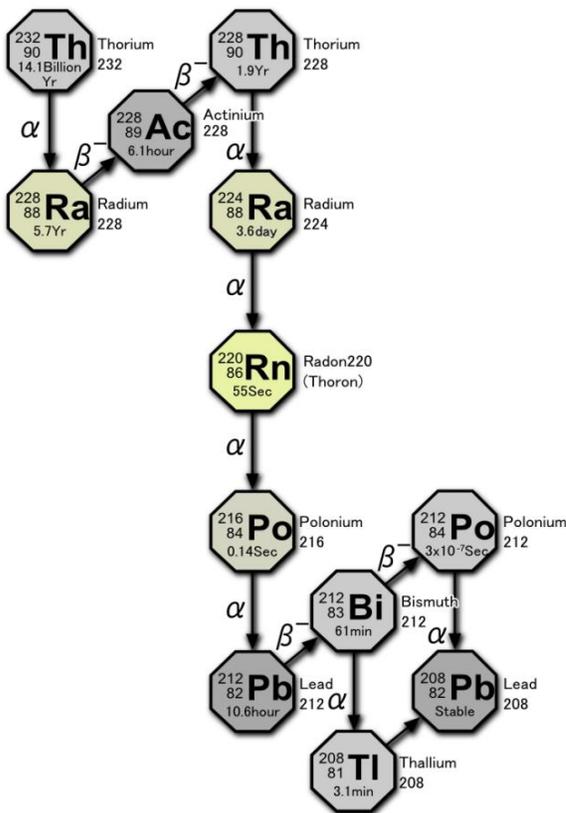
Όταν ένα μητρικό ισότοπο μεταστοιχειώνεται, το αρχικό θυγατρικό προϊόν είναι επίσης ραδιενεργό και διασπάται, μέσω μίας σειράς από ραδιενεργούς πυρήνες, μέχρι να επιτευχθεί το τελικό σταθερό προϊόν. Το θυγατρικό ισότοπο λέμε ότι βρίσκεται σε ισορροπία με το πατρικό, όταν ο αριθμός των θυγατρικών ατόμων  $N_2$  που μεταστοιχειώνεται ανά δευτερόλεπτο είναι ίσος με τον αριθμό που δημιουργείται από τις μεταστοιχειώσεις των μητρικών ατόμων  $N_1$ , δηλαδή θα ισχύει η σχέση:

$$N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2 = N_3 \lambda_3 = \dots = N_k \lambda_k \quad (\text{σχέση 6.1})$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση ισορροπίας, ο χρόνος ισορροπίας  $t_{eq}$  μπορεί να συσχετιστεί με τις σταθερές διάσπασης του μητρικού ( $\lambda_1$ ) και του θυγατρικού ( $\lambda_2$ ) πυρήνα. Η τελική σχέση που μας δίνει την πλήρη ισορροπία είναι η ακόλουθη:

$$t_{eq} = \left( \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (\text{σχέση 6.2})$$

Στα υπό εξέταση ραδιονουκλίδια, παρατηρείται ότι οι χρόνοι ημιζωής των μητρικών ραδιονουκλιδίων των ραδιενεργών σειρών του θορίου και του ουρανίου (Εικόνα 6.1, 6.2) είναι κατά πολύ μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους χρόνους ημιζωής του κάθε θυγατρικού ραδιονουκλιδίου. Τότε, στη κλίμακα χρόνου ημιζωής του δεύτερου, ο ρυθμός διασπάσεων του πρώτου είναι πρακτικά σταθερός. Μετά από κάποιο δεδομένο χρόνο (κάποιο πολλαπλάσιο του χρόνου ημιζωής του θυγατρικού) η ποσότητα των θυγατρικών νουκλιδίων θα φτάσει και αυτή μια τιμή ισορροπίας, δηλαδή ο ρυθμός διασπάσεων του μητρικού και του θυγατρικού θα είναι σταθερός. Κάτω από συνθήκες ισορροπίας, το ποσό του μητρικού προϊόντος σε ένα δείγμα, μπορεί να υπολογιστεί με τη μέτρηση του ποσού ενός από τα θυγατρικά μέλη. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο, καθώς στην δική μας περίπτωση μελετώνται ραδιοϊσότοπα που δεν αποδιεγείρονται με



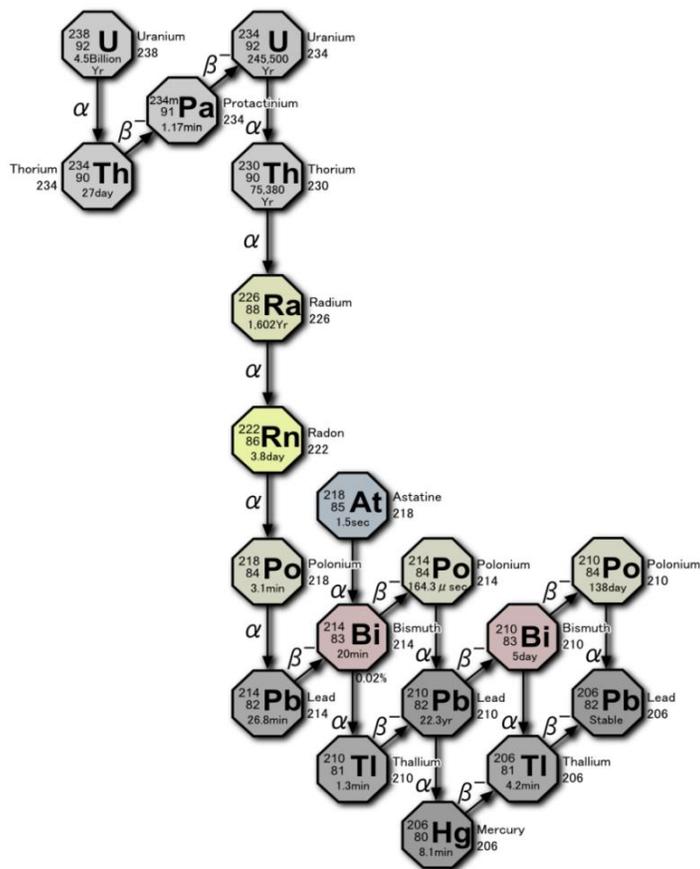
ακτινοβολία-γ (Th-232, Ra-228, U-238) ή που οι ακτίνες-γ εκπέμπουν είναι σχεδόν αμελητέας έντασης (Th-228, Ra-226). Σε αυτές τις περιπτώσεις, λόγω της ραδιενεργού ισορροπίας, τα γινόμενα των ενεργειών ακτινοβολίας-γ κάθε μητρικού ισότοπου θα υπολογίζονται και από τα θυγατρικά του ισότοπα. Για παράδειγμα η ενέργεια του  $^{232}\text{Th}$  (Εικόνα 6.1), το οποίο δεν εκπέμπει ακτίνες-γ, υπολογίστηκε από τις ενέργειες όλων των θυγατρικών του ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν ακτινοβολία-γ (Πίνακας 6.9). Για το πρώτο θυγατρικό του θορίου, το  $^{228}\text{Ra}$  (Πίνακας 6.6), το οποίο επίσης δεν διασπάται σε γάμμα χρησιμοποιήθηκαν οι ενέργειες του θυγατρικού του εκπομπής-γ  $^{228}\text{Ac}$ , το οποίο στη συνέχεια μεταστοιχειώνεται σε  $^{228}\text{Th}$ , που μπορεί να εκπέμπει

Εικόνα 6.1: Ραδιενεργός σειρά θορίου [Wikipedia web]

ακτίνες-γ, αλλά είναι τόσο χαμηλής (σχεδόν αμελητέας) έντασης, ώστε συνυπολογίζονται και οι εντάσεις όλων των επόμενων θυγατρικών εκπομπής-γ, μέχρι τον σταθερό πυρήνα (Πίνακας 6.7). Αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιήθηκε και στη σειρά του ουρανίου (Εικόνα 6.2).

Το περιβάλλον των ανοικτών θαλασσών και σε μεγάλα βάθη θεωρείται λίγο πολύ σταθερό, ενώ τα παράκτια οικοσυστήματα υφίστανται περισσότερες αλληλεπιδράσεις παρουσιάζοντας μεγαλύτερη αστάθεια. Στο θαλάσσιο περιβάλλον, η ισορροπία θεωρείται δυναμική, με πιθανές αλληλεπιδράσεις των βιοτικών και αβιοτικών στοιχείων που το απαρτίζουν, υπό το καθεστώς συγκεκριμένων φυσικοχημικών νόμων.

Όσον αφορά στο πλήθος των φωτοκορυφών που χρησιμοποιήθηκαν, συνυπολογίστηκαν στα αθροίσματα όσο το δυνατόν περισσότερες φωτοκορυφές του κάθε ραδιονουκλιδίου εκπομπής-γ, ακόμα και ορισμένες με πολύ χαμηλή ένταση, προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη αξιοπιστία στο αποτέλεσμα. Οι ενέργειες εκπομπής-γ όλων των ραδιοϊσοτόπων μαζί με τις αντίστοιχες εντάσεις τους, ελήφθησαν από την βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος του Ινστιτούτου Πυρηνικών και Ραδιολογικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ενέργειας και Ασφάλειας του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.[ERL web]



Εικόνα 6.2: Ραδιενεργός σειρά ουρανίου [Wikipedia web]

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες με τα μητρικά και τα θυγατρικά ραδιονουκλίδια (όπου είναι επιβεβλημένο) που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό των αθροισμάτων  $\sum_i I_i E_{v_i}$ . Ακόμη δίδονται και οι ενέργειες κάθε φωτοκορυφής (E), μαζί με το ποσοστό διάσπασης ανά ενέργεια, δηλαδή την ένταση (I).

Πίνακας 6.2: Θυγατρικά ραδιονουκλίδια που συνυπολογίζονται στα αθροίσματα  $\sum_i I_i E_{v_i}$

Μητρικό Ραδιονουκλίδιο	Θυγατρικά ραδιονουκλίδια που συνυπολογίζονται στην ενέργεια εκπομπής γ
$^{137}\text{Cs}$	-
$^{40}\text{K}$	-
$^{226}\text{Ra}$ (της σειράς του U-238)	$^{214}\text{Pb} + ^{214}\text{Bi} + ^{210}\text{Pb}$
$^{228}\text{Ra}$ (νερό)	$^{228}\text{Ac}$
$^{228}\text{Th}$ (νερό)	$^{224}\text{Ra} + ^{212}\text{Pb} + ^{212}\text{Bi} + ^{208}\text{Tl}$
$^{232}\text{Th}$ (ιζημα)	$^{228}\text{Ac} + ^{229}\text{Ac} + ^{228}\text{Th} + ^{224}\text{Ra} + ^{212}\text{Pb} + ^{212}\text{Bi} + ^{208}\text{Tl}$
$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{Th} + ^{234}\text{Pa}$

- Αθροίσματα  $\sum_i I_i E_{v_i}$  των ραδιονουκλιδίων που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του ρυθμού εξωτερικής δόσης στο θαλασσινό νερό:

Πίνακας 6.3: Πίνακας αθροίσματος ενεργειών εκπομπής-γ επί την ένταση για το  $^{40}\text{K}$ .

Ραδιονουκλίδιο	Ενέργεια-γ (keV)	Ένταση I (N <sub>γ-κβάντα/διάσπαση</sub> )	Γινόμενο ενέργειας- έντασης EI (keV/διάσπαση)
$^{40}\text{K}$	1460,81	0,1067	155,9

Πίνακας 6.4: Πίνακας αθροίσματος ενεργειών εκπομπής-γ επί την ένταση για το  $^{137}\text{Cs}$ .

Ραδιονουκλίδιο	Ενέργεια-γ (keV)	Ένταση I (N <sub>γ-κβάντα/διάσπαση</sub> )	Γινόμενο ενέργειας- έντασης EI (keV/διάσπαση)
$^{137}\text{Cs}$	661,66	0,851	563,1

Πίνακας 6.5: Πίνακας αθροίσματος ενεργειών εκπομπής-γ (θυγατρικών νουκλιδίων) επί την ένταση, ανά ενέργεια, για το  $^{226}\text{Ra}$ .

Ραδιονουκλίδιο	Θυγατρικό	Ενέργεια-γ (keV)	Ένταση I ( $N_{\gamma}$ -κβάντα/διάσπαση)	Γινόμενο ενέργειας- έντασης EI (keV/διάσπαση)	Άθροισμα γινομένων Σ(EI) (keV/διάσπαση)
$^{226}\text{Ra}$	$^{226}\text{Ra}$	186,211	0,03533	6,5788	1647,8
	$^{214}\text{Pb}$	53,23	0,011	0,586	
	$^{214}\text{Pb}$	241,98	0,0712	17,229	
	$^{214}\text{Pb}$	258,79	0,0051	1,3198	
	$^{214}\text{Pb}$	295,21	0,1815	53,5806	
	$^{214}\text{Pb}$	351,92	0,351	123,524	
	$^{214}\text{Pb}$	351,92	0,351	123,524	
	$^{214}\text{Bi}$	609,31	0,446	271,752	
	$^{214}\text{Bi}$	665,45	0,0151	10,0483	
	$^{214}\text{Bi}$	768,36	0,0476	36,5739	
	$^{214}\text{Bi}$	785,91	0,0104	8,1735	
	$^{214}\text{Bi}$	806,19	0,0119	9,5937	
	$^{214}\text{Bi}$	934,06	0,0307	28,6756	
	$^{214}\text{Bi}$	1120,29	0,147	164,683	
	$^{214}\text{Bi}$	1155,19	0,0163	18,8296	
	$^{214}\text{Bi}$	1238,11	0,0578	71,5628	
	$^{214}\text{Bi}$	1280,96	0,0142	18,1896	
	$^{214}\text{Bi}$	1377,67	0,039	53,729	
	$^{214}\text{Bi}$	1401,5	0,0136	19,0604	
	$^{214}\text{Bi}$	1407,98	0,024	33,792	
	$^{214}\text{Bi}$	1509,23	0,0208	31,392	
	$^{214}\text{Bi}$	1661,28	0,0112	18,6063	
	$^{214}\text{Bi}$	1729,6	0,0292	50,5043	
	$^{214}\text{Bi}$	1764,49	0,151	266,438	
	$^{214}\text{Bi}$	1847,42	0,0204	37,6874	
	$^{214}\text{Bi}$	2118,55	0,0117	24,787	
	$^{214}\text{Bi}$	2204,071	0,0489	107,7791	
	$^{214}\text{Bi}$	2447,673	0,01536	37,5963	
	$^{210}\text{Pb}$	46,54	0,0424	1,9733	

Πίνακας 6.6: Πίνακας αθροίσματος ενεργειών εκπομπής-γ (θυγατρικών νουκλιδίων) επί την ένταση, ανά ενέργεια, για το  $^{228}\text{Ra}$ .

Ραδιονουκλίδιο	Θυγατρικό	Ενέργεια-γ (keV)	Ένταση I ( $N_{\gamma}$ -κβάντα/διάσπαση)	Γινόμενο ενέργειας- έντασης EI (keV/διάσπαση)	Άθροισμα γινομένων Σ(EI) (keV/διάσπαση)
$^{228}\text{Ra}$	$^{228}\text{Ac}$	99,5	0,013	1,294	672,4
	$^{228}\text{Ac}$	129,07	0,0245	3,1622	
	$^{228}\text{Ac}$	153,98	0,0074	1,139	
	$^{228}\text{Ac}$	209,25	0,0388	8,1189	
	$^{228}\text{Ac}$	270,24	0,0343	9,2692	
	$^{228}\text{Ac}$	327,98	0,0306	10,0362	
	$^{228}\text{Ac}$	338,32	0,1125	38,061	
	$^{228}\text{Ac}$	409,46	0,0194	7,9435	
	$^{228}\text{Ac}$	463,01	0,0444	20,5576	
	$^{228}\text{Ac}$	794,95	0,0434	34,5008	
	$^{228}\text{Ac}$	911,21	0,266	242,382	
	$^{228}\text{Ac}$	964,77	0,0511	49,2997	
	$^{228}\text{Ac}$	968,97	0,162	156,973	
	$^{228}\text{Ac}$	1459,14	0,008	11,673	
	$^{228}\text{Ac}$	1588,21	0,0327	51,9345	
	$^{228}\text{Ac}$	1630,63	0,016	26,09	

Πίνακας 6.7: Πίνακας αθροίσματος ενεργειών εκπομπής-γ (θυγατρικών νουκλιδίων) επί την ένταση, ανά ενέργεια, για το  $^{228}\text{Th}$ .

Ραδιονουκλίδιο	Θυγατρικό	Ενέργεια-γ (keV)	Ένταση I ( $N_{\gamma}$ -κβάντα/διάσπαση)	Γινόμενο ενέργειας- έντασης EI (keV/διάσπαση)	Άθροισμα γινομένων Σ(EI) (keV/διάσπαση)
$^{228}\text{Th}$	$^{228}\text{Th}$	84,4	0,011	0,928	1423,2
	$^{224}\text{Ra}$	240,99	0,041	9,881	
	$^{212}\text{Pb}$	238,63	0,435	103,804	
	$^{212}\text{Pb}$	300,09	0,0325	9,7529	
	$^{212}\text{Bi}$	727,33	0,0669	48,6584	

	<sup>212</sup> Bi	785,46	0,0107	8,4044	
	<sup>212</sup> Bi	893,43	0,0035	3,127	
	<sup>212</sup> Bi	1078,62	0,0058	6,256	
	<sup>212</sup> Bi	1620,74	0,0149	24,149	
	<sup>208</sup> Tl	277,36	0,023	6,38	
	<sup>208</sup> Tl	510,77	0,0818	41,781	
	<sup>208</sup> Tl	583,19	0,306	178,456	
	<sup>208</sup> Tl	763,13	0,0073	5,571	
	<sup>208</sup> Tl	860,56	0,045	38,725	
	<sup>208</sup> Tl	2614,51	0,3585	937,3022	

Πίνακας 6.8: Πίνακας αθροίσματος ενεργειών εκπομπής-γ (θυγατρικών νουκλιδίων) επί την ένταση, ανά ενέργεια, για το <sup>238</sup>U.

Ραδιονουκλίδιο	Θυγατρικά	Ενέργεια-γ (keV)	Ένταση I (N <sub>γ-κβάντα</sub> /διάσπαση)	Γινόμενο ενέργειας- έντασης EI (keV/διάσπαση)	Αθροισμα γινομένων Σ(EI) (keV/διάσπαση)
<sup>238</sup> U	<sup>234</sup> Th	63,28	0,041	2,594	19,4
	<sup>234</sup> Th	92,5	0,0481	4,4493	
	<sup>234</sup> Th	112,81	0,0024	0,2707	
	<sup>234</sup> Pa	258,24	0,000726	0,1875	
	<sup>234</sup> Pa	742,814	0,00096	0,7131	
	<sup>234</sup> Pa	766,358	0,00318	2,4371	
	<sup>234</sup> Pa	786,272	0,00054	0,425	
	<sup>234</sup> Pa	1001,025	0,00832	8,329	

- Αθροίσματα  $\sum_i I_i E_{\nu_i}$  των ραδιονουκλιδίων που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του ρυθμού εξωτερικής δόσης στο ιζήμα :

Στην περίπτωση του ιζήματος θα χρησιμοποιηθούν όλα τα ραδιονουκλίδια των οποίων οι ενέργειες αναφέρθηκαν (Πίνακες 6.3, 6.4, 6.5, 6.8), με την διαφορά πως στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται το Th-232 αντί των θυγατρικών του Th-228&Ra-228 που

χρησιμοποιούνται στο νερό. Πιο συγκεκριμένα λόγω κυρίως της διαφορετικής διαλυτότητας των θυγατρικών του Th-232 (Ra-228&Th-228) στο νερό, δεν υπάρχει ισορροπία και οι συγκεντρώσεις στο νερό θα υπολογίζονται ξεχωριστά για το Ra-228 και ξεχωριστά για το Th-228. Στο θαλασσινό ίζημα οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών Th-228 και Ra-228 θεωρήθηκαν περίπου ίσες με την συγκέντρωση του μητρικού Th-232, έχοντας κάνει την παραδοχή πως είναι ισορροπημένα (δυναμική ισορροπία). Συνεπώς στο ίζημα θα χρησιμοποιείται το Th-232 ενώ στο νερό τα θυγατρικά του Ra-228&Th-228.

**Πίνακας 6.9:** Πίνακας αθροίσματος ενεργειών γ-εκπομής (θυγατρικών νουκλιδίων) επί την ένταση ανά ενέργεια για το <sup>232</sup>Th.

Ραδιονουκλίδιο	Θυγατρικό	Ενέργεια-γ (keV)	Ένταση I (N <sub>γ-κβάντα</sub> /διάσπαση)	Γινόμενο ενέργειας- έντασης EI (keV/διάσπαση)	Άθροισμα γινόμενων Σ(EI) (keV/διάσπαση)
<sup>232</sup> Th	<sup>228</sup> Ac	99,5	0,013	1,294	2095,6
	<sup>228</sup> Ac	129,07	0,0245	3,1622	
	<sup>228</sup> Ac	153,98	0,0074	1,1395	
	<sup>228</sup> Ac	209,25	0,0388	8,1189	
	<sup>228</sup> Ac	270,24	0,0343	9,2692	
	<sup>228</sup> Ac	327,98	0,0306	10,0362	
	<sup>228</sup> Ac	338,32	0,1125	38,061	
	<sup>228</sup> Ac	409,46	0,0194	7,9435	
	<sup>228</sup> Ac	463,01	0,0444	20,5576	
	<sup>228</sup> Ac	794,95	0,0434	34,5008	
	<sup>228</sup> Ac	911,21	0,266	242,382	
	<sup>228</sup> Ac	964,77	0,0511	49,3	
	<sup>228</sup> Ac	968,97	0,162	156,973	
	<sup>228</sup> Ac	1459,14	0,008	11,673	
	<sup>228</sup> Ac	1588,21	0,0327	51,9345	
	<sup>228</sup> Ac	1630,63	0,016	26,09	
	<sup>228</sup> Th	84,4	0,011	0,928	
	<sup>224</sup> Ra	240,99	0,041	9,881	
	<sup>212</sup> Pb	238,63	0,435	103,804	
	<sup>212</sup> Pb	300,09	0,0325	9,753	
	<sup>212</sup> Bi	727,33	0,0669	48,6584	
	<sup>212</sup> Bi	785,46	0,0107	8,4044	
	<sup>212</sup> Bi	893,43	0,0035	3,127	

	$^{212}\text{Bi}$	1078,62	0,0058	6,256	
	$^{212}\text{Bi}$	1620,74	0,0149	24,149	
	$^{208}\text{Tl}$	277,36	0,023	6,38	
	$^{208}\text{Tl}$	510,77	0,0818	41,781	
	$^{208}\text{Tl}$	583,19	0,306	178,456	
	$^{208}\text{Tl}$	763,13	0,0073	5,57085	
	$^{208}\text{Tl}$	860,56	0,045	38,725	
	$^{208}\text{Tl}$	2614,511	0,3585	937,3022	

Πίνακας 6.10: Συγκεντρωτικός πίνακας αθροισμάτων  $\sum_i I_i E_{\nu_i}$

Ραδιονουκλίδιο	$\sum_i I_i E_{\nu_i}$ (keV/διάσπαση)
$^{40}\text{K}$	155,9
$^{226}\text{Ra}$	1647,8
$^{228}\text{Ra}$ (νερό)	672,4
$^{228}\text{Th}$ (νερό)	1423,2
$^{232}\text{Th}$ (ίζημα)	2095,6
$^{238}\text{U}$	19,4
$^{137}\text{Cs}$	563,1

## 6.2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

---

### 6.2.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός του ρυθμού εξωτερικής δόσης των ραδιοϊσοτόπων, είναι πολύ βασικό να έχει μετρηθεί η συγκέντρωσή τους στον ραδιενεργό χώρο που ζουν και τρέφονται οι οργανισμοί. Στο θαλάσσιο περιβάλλον που εξετάζεται, οι χώροι αυτοί είναι το θαλασσινό νερό και το ίζημα.

Οι τιμές των συγκεντρώσεων επιλέχθηκαν από την διδακτορική διατριβή της Δρ. Ελένης Φλώρου, Διευθύντρια Ερευνών του Εργαστηρίου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος του Ινστιτούτου Πυρηνικών και Ραδιολογικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ενέργειας και Ασφάλειας του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος με θέμα: «Συμπεριφορά και κατανομή μακρόβιων ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο οικοσύστημα του Ελλαδικού χώρου», ΑΘΗΝΑ 1992.

Η δειγματοληψία για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικούς σταθμούς στη θάλασσα του Αιγαίου, σε διάφορα βάθη και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, συγκεκριμένα στην τριετία 1984-1987. Τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκαν οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Θα γίνει χρήση των μετρήσεων που υλοποιήθηκαν μετά το 1986, ώστε να συμπεριληφθεί και η περιβαλλοντική επιβάρυνση μετά το ατύχημα στο Chernobyl.
- Το Αιγαίο είναι μία κλειστή θάλασσα μικρής έκτασης, συνεπώς οι κατανομές των ραδιονουκλιδίων ενδέχεται να μην παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από περιοχή σε περιοχή από τη στιγμή που δεν υπάρχει εξωτερικός επιβαρυντικός παράγοντας. Παρόλα αυτά για μεγαλύτερη αξιοπιστία, επιλέχθηκαν οι τιμές των συγκεντρώσεων του ίδιου ραδιονουκλιδίου, στο θαλασσινό νερό και το ίζημα, να προέρχονται από δείγματα με όσο το δυνατόν πιο κοντινές αποστάσεις και όπου υπήρχαν δεδομένα, και από την ίδια περιοχή δειγματοληψίας.
- Σημαντική παράμετρο αποτελούν και οι υπό εξέταση οργανισμοί. Τα ψάρια όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ. 3.2.5), παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες στον

τρόπο διαβίωσής τους. Συνεπώς το ενδιαίτημα (habitat) αλλά και το θαλάσσιο βάθος στο οποίο ζουν, αποτελούν κριτήρια για την επιλογή των τιμών.

Παρακάτω θα αναφερθούν ξεχωριστά οι τιμές των συγκεντρώσεων που επιλέχθηκαν για το θαλασσινό νερό και το ίζημα, όπως και οι τιμές των συγκεντρώσεων για κάθε κατηγορία οργανισμών, ανάλογα με το ενδιαίτημα (habitat).

### 6.2.2. Συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιονουκλιδίων στο θαλασσινό νερό

Οι συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιονουκλιδίων εκπομπής-γ υπολογίστηκαν σε επιφανειακά δείγματα θαλασσινού νερού σε τρεις περιοχές-σταθμούς (Εικόνα 6.3):

- Βόρεια της κεντρικής Κρήτης
- Ανατολικά της Ρόδου-Βόρεια της Καρπάθου
- Βόρεια της Λήμνου

Με τον όρο επιφανειακά δείγματα υποδηλώνεται βάθος από την επιφάνεια 0-30cm. Στην κάθε περιοχή περιλαμβάνονται 4 σταθμοί που αντιστοιχούν σε κάθε τρίμηνο του έτους. Τα δείγματα ελήφθησαν το 1986, χωρίς όμως να ενδιαφέρει ιδιαίτερα η επιβάρυνση του Chernobyl, αφού αφορά τη φυσική ραδιενέργεια. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις συγκεντρώσεις  $A_{sw}$  ( $10^{-3}$ Bq/l) των φυσικών ραδιονουκλιδίων εκπομπής-γ σε επιφανειακά δείγματα θαλασσινού νερού, για κάθε περιοχή-σταθμό, μαζί με τις μέσες τιμές τους

- **Περιοχή 1: Βόρεια της Κρήτης**

Πίνακας 6.11: Ειδική ενεργότητα φυσικών ραδιονουκλιδίων σε επιφανειακά δείγματα θαλασσινού νερού

$$A_{sw} \pm \delta A_{sw} \text{ (} 10^{-3} \text{ Bq/l)}$$

Σταθμός	$^{226}\text{Ra}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{228}\text{Ra}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{228}\text{Th}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{40}\text{K}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{238}\text{U}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)
1	1,46 ± 0,28	2,59 ± 0,39	0,11 ± 0,02	10050 ± 1205	42 ± 8
2	1,63 ± 0,32	3,05 ± 0,45	0,08 ± 0,01	11834 ± 1400	32 ± 6
3	1,49 ± 0,30	2,08 ± 0,30	0,11 ± 0,02	10870 ± 1300	39 ± 8
4	1,48 ± 0,30	3,92 ± 0,59	0,10 ± 0,02	9811 ± 1177	40 ± 8
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1,52 ± 0,15</b>	<b>2,91 ± 0,22</b>	<b>0,10 ± 0,01</b>	<b>10641 ± 637</b>	<b>38,30 ± 3,80</b>

ο *Περιοχή 2: Ανατολικά της Ρόδου-Βόρεια της Καρπάθου*

Πίνακας 6.12: Ειδική ενεργότητα φυσικών ραδιονουκλιδίων σε επιφανειακά δείγματα θαλασσινού νερού  
 $A_{sw} \pm \delta A_{sw}$  ( $10^{-3}$  Bq/l)

Σταθμός	$^{226}\text{Ra}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{228}\text{Ra}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{228}\text{Th}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{40}\text{K}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{238}\text{U}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)
1	1,45 ± 0,25	2,96 ± 0,44	0,12 ± 0,02	9875 ± 1185	43 ± 8
2	1,60 ± 0,31	4,32 ± 0,65	0,11 ± 0,02	11847 ± 1422	35 ± 7
3	1,67 ± 0,37	2,98 ± 0,45	0,07 ± 0,01	9930 ± 1190	41 ± 8
4	1,40 ± 0,23	3,37 ± 0,51	0,13 ± 0,02	10951 ± 1314	38 ± 7
Μέση τιμή	1,53 ± 0,15	3,41 ± 0,21	0,11 ± 0,01	10651 ± 641	39,30 ± 3,80

ο *Περιοχή 3: Βόρεια της Λήμνου*

Πίνακας 6.13: Ειδική ενεργότητα φυσικών ραδιονουκλιδίων σε επιφανειακά δείγματα θαλασσινού νερού  
 $A_{sw} \pm \delta A_{sw}$  ( $10^{-3}$  Bq/l)

Σταθμός	$^{226}\text{Ra}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{228}\text{Ra}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{228}\text{Th}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{40}\text{K}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)	$^{238}\text{U}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)
1	1,53 ± 0,29	2,67 ± 0,40	0,06 ± 0,01	11100 ± 1332	36 ± 7
2	1,61 ± 0,31	3,03 ± 0,43	0,07 ± 0,01	9970 ± 1196	43 ± 8
3	1,57 ± 0,30	3,97 ± 0,60	0,11 ± 0,02	9895 ± 1184	33 ± 6
4	1,52 ± 0,29	2,82 ± 0,42	0,09 ± 0,01	11789 ± 1414	35 ± 6
Μέση τιμή	1,56 ± 0,15	3,12 ± 0,21	0,08 ± 0,01	10689 ± 643	36,75 ± 3,40

Τα σφάλματα στις μετρήσεις, που αποτελούν τη σταθερή μετρούμενη απόκλιση, είναι επαυξημένα με ένα επιπλέον 10% σφάλμα από την πορεία επεξεργασίας και το συστηματικό σφάλμα του οργάνου και της βαθμονόμησης του οργάνου.

Τέλος οι πολύ υψηλές συγκεντρώσεις του  $^{40}\text{K}$  επιβεβαιώνουν την αφθονία στην οποία υπάρχει στο θαλασσινό νερό και γενικότερα περιβάλλον. Κατά πολύ μικρότερη, αλλά σημαντική είναι η αφθονία του  $^{238}\text{U}$ . Γενικά παρατηρείται η ακόλουθη σχέση στις τιμές των συγκεντρώσεων σε δείγματα θαλασσινού νερού στο Αιγαίο:

$$^{40}\text{K} \gg ^{238}\text{U} > ^{228}\text{Ra} > ^{226}\text{Ra} > ^{228}\text{Th}$$



Εικόνα 6.3: Χάρτης της Ελλάδας με εμφανείς τις περιοχές που έγινε η δειγματοληψία στο θαλασσίνο νερό.

### 6.2.3. Συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιονουκλιδίων στο ίζημα

Για την μέτρηση των συγκεντρώσεων των φυσικών ραδιονουκλιδίων εκπομπής-γ στο ίζημα, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα επιφανειακών ιζημάτων της υπο-αιγιαλίτιδας ζώνης σε διάφορες περιοχές του Αιγαίου πελάγους. Οι τιμές που επιλέχθηκαν αφορούν μετρήσεις που ελήφθησαν το διάστημα 1986-1987, αν και στην περίπτωση της φυσικής ραδιενέργειας δεν παίζει σημαντικό ρόλο η επιβάρυνση του Chernobyl, καθώς αυτή οφείλεται κυρίως στη ραδιενέργεια της σύστασης του φλοιού της γης (ενδογενής περιβαλλοντικός παράγοντας).

Τα δείγματα ελήφθησαν σε διάφορα θαλάσσια βάθη και οι μετρήσεις έγιναν στην επιφάνεια των ιζημάτων, δηλαδή περίπου στα 0-10cm στρωμάτωσης, λόγω ιζήματογένεσης. Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων που θα χρησιμοποιηθούν, αφορούν επιφανειακά δείγματα από τις ακόλουθες περιοχές (Εικόνα 6.4):

- Βόρειο Αιγαίο (Χαλκιδική)
- Κυκλάδες (κοντά στη Μήλο)
- Σαρωνικός-Πλατώ Κυκλάδων

Σε κάθε περιοχή, έγιναν μετρήσεις σε δείγματα διαφορετικού βάθους και πιο συγκεκριμένα όλες οι μετρήσεις στα ιζήματα έγιναν στο κλάσμα  $\leq$ (~200) $\mu$ m αφού έχει αποδειχθεί ότι είναι το κλάσμα που συγκεντρώνει τα περισσότερα ραδιονουκλίδια [Bowen.79].

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν από τους δειγματοληπτικούς σταθμούς των παραπάνω περιοχών, με τα αντίστοιχα στατιστικά τους σφάλματα, προσαυξημένα όπως και στο νερό με συστηματικό σφάλμα 10%. Όπου υπάρχει η πληροφορία, αναφέρεται και το βάθος της θαλασσινης στήλης.

Πίνακας 6.14: Ειδική ενεργότητα φυσικών ραδιονουκλιδίων σε επιφανειακά ιζήματα  $A_{ss} \pm \delta A_{ss}$  (Bq/kg)

Περιοχή	Δειγματοληπτικός Σταθμός	Βάθος (m)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)	$^{238}\text{U}$ (Bq/kg)
<b>Βόρειο Αιγαίο (Χαλκιδική)</b>	-	30	50 ± 19	22 ± 12	627 ± 210	54 ± 20
<b>Κυκλάδες(Μήλος)</b>	ML1	38	33 ± 1	43 ± 2	691 ± 19	48 ± 12
	ML2	91	28 ± 2	37 ± 4	722 ± 46	-
	ML3	32	35 ± 2	45 ± 3	800 ± 23	48 ± 11
	ML4	36	62 ± 2	83 ± 2	1214 ± 22	82 ± 13
	ML5	22	23 ± 2	39 ± 3	521 ± 21	65 ± 15
	ML6	47	28 ± 2	39 ± 3	528 ± 28	26 ± 16
	ML7	46	33 ± 2	51 ± 2	661 ± 21	36 ± 12
	ML8	42	41 ± 2	59 ± 3	797 ± 21	72 ± 12
	ML9	48	28 ± 2	48 ± 3	705 ± 32	23 ± 14
	ML10	64	42 ± 2	41 ± 3	839 ± 23	92 ± 36
	ML11	68	23 ± 2	39 ± 3	781 ± 29	24 ± 10
	ML12	20	18 ± 2	25 ± 4	573 ± 31	38 ± 19
	ML13	74	23 ± 1	34 ± 3	643 ± 28	32 ± 11
	ML14	80	26 ± 1	44 ± 2	781 ± 28	9 ± 3
	ML16	65	23 ± 2	36 ± 4	645 ± 11	34 ± 8
ML20	60	25 ± 1	33 ± 2	607 ± 24	27 ± 7	
ML21	51	23 ± 3	54 ± 4	410 ± 18	-	
ML23	202	21 ± 1	25 ± 2	243 ± 20	29 ± 18	
ML25	97	18 ± 1	24 ± 2	189 ± 11	32 ± 10	
<b>Μέση τιμή</b>			<b>29,1 ± 0,4</b>	<b>42,1 ± 0,7</b>	<b>650 ± 5,8</b>	<b>42,2 ± 3,6</b>
<b>Σαρωνικός-Κυκλάδες</b>	A13	200	26 ± 3	28 ± 5	444 ± 16	36 ± 16
	A17	200	14 ± 3	19 ± 5	325 ± 20	23 ± 11
<b>Μέση τιμή</b>			<b>20 ± 2</b>	<b>23,5 ± 3,5</b>	<b>384,5 ± 12,8</b>	<b>29,5 ± 9,7</b>

(-): Δεν ανιχνεύτηκε το ραδιονουκλίδιο με την μέθοδο της φασματομετρίας-γ.

Οι συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιονουκλιδίων στη Μήλο και στην ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού-Πλατώ Κυκλάδων αποδίδονται στην ηφαιστειότητα της περιοχής, αφού ανήκει στο ηφαιστειακό τόξο των Κυκλάδων, με αποτέλεσμα τα ιζήματα να επηρεάζονται από πλήθος ορυκτών με φυσική ραδιενέργεια. Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται η ακόλουθη σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων:

$$^{40}\text{K} \gg ^{238}\text{U} \geq ^{232}\text{Th} \geq ^{226}\text{Ra}$$

Στην περιοχή του Βόρειου Αιγαίου παρουσιάζονται σχετικά υψηλές τιμές των συγκεντρώσεων, με αντίστοιχα όμως υψηλές αποκλίσεις. Η δειγματοληψία στο Βόρειο Αιγαίο έγινε στο Στρατόνι Χαλκιδικής, περιοχή με μεταλλωρυχεία, γεγονός που επιβαρύνει σημαντικά τα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας. Η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων διαμορφώνεται ως εξής σε αυτή την περίπτωση:

$$^{40}\text{K} \gg ^{238}\text{U} > ^{226}\text{Ra} > ^{232}\text{Th}$$



Εικόνα 6.4: Χάρτης της Ελλάδας με εμφανείς τις περιοχές που έγινε η δειγματοληψία στα θαλάσσια ιζήματα.

#### 6.2.4. Συγκεντρώσεις του $^{137}\text{Cs}$ στο Θαλάσσιο Περιβάλλον

Το  $^{137}\text{Cs}$  αποτελεί το πιο σημαντικό τεχνητό ραδιονουκλίδιο της ραδιενεργού επίπτωσης. Πριν το ατύχημα του Chernobyl, η ανίχνευσή του στο θαλάσσιο περιβάλλον οφειλόταν στο fallout των πυρηνικών δοκιμών. Μετά το Chernobyl, ο Ελλαδικός χώρος επιβαρύνθηκε με επιπλέον τεχνητή ραδιενέργεια, χωρίς όμως μεγάλες και ανησυχητικές διαφορές. Οι εξωτερικές λοιπόν δόσεις ραδιενέργειας που θα δεχτούν οι οργανισμοί από το  $^{137}\text{Cs}$  θα υπολογιστούν βάσει των μέγιστων παρατηρούμενων συγκεντρώσεων του στη θάλασσα, δηλαδή μετά το Chernobyl. Ειδικά στην περίπτωση των ιζημάτων, οι μετρούμενες τιμές είναι του 1987. Αυτό οφείλεται στη συμπεριφορά του ραδιοϊσοτόπου στα ιζήματα (βλ. Κεφ. 3.2.4.3), όπου αργεί να εναποτεθεί στον πυθμένα και καθιζάνει αργά, ανάλογα με τον ρυθμό μίξης των κυμάτων. Άρα είναι λογικό ένα χρόνο μετά το ατύχημα η μέτρηση να είναι πολύ πιο αξιόπιστη και μεγαλύτερη, από την αντίστοιχη αμέσως μετά το ατύχημα.

Στο θαλασσινό νερό οι συγκεντρώσεις του  $^{137}\text{Cs}$  έρχονται από δύο περιοχές και συγκεκριμένα:

- ο Περιοχή 1: Σαρωνικός (Πειραιάς)
- ο Περιοχή 2: Κυκλάδες (Μήλος)

Στα επιφανειακά ιζήματα εξετάστηκαν οι συγκεντρώσεις σε δύο περιοχές δειγματοληψίας:

- ο Περιοχή 1: Σαρωνικός- Πλατώ Κυκλάδων
- ο Περιοχή 2: Κυκλάδες (Μήλος)

Και σε αυτές τις μετρήσεις ισχύουν οι ίδιες παράμετροι με τα φυσικά νουκλίδια. Δηλαδή στο θαλασσινό νερό αναφερόμαστε σε δείγμα με βάθος από την επιφάνεια 0-30cm και στα επιφανειακά ιζήματα αναφερόμαστε στα πρώτα 0-10cm στρωμάτωσης [Φλώρου.92]. Παρακάτω παρατίθενται πίνακες με τις συγκεντρώσεις του  $^{137}\text{Cs}$ , με τα αντίστοιχα σφάλματα στο νερό και στο ίζημα (στους διάφορους σταθμούς και στα διαφορετικά βάθη):

➤ Θαλασσινό νερό

Πίνακας 6.15: Ειδική ενεργότητα  $^{137}\text{Cs}$  σε επιφανειακά δείγματα θαλασσινού νερού  
 $A_{sw} \pm \delta A_{sw}$  ( $10^{-3}$  Bq/l)

Περιοχή	$^{137}\text{Cs}$ ( $10^{-3}$ Bq/l)
ΣΑΡΩΝΙΚΟΣ (ΠΕΙΡΑΙΑΣ)	1,8 ± 1,2
ΚΥΚΛΑΔΕΣ (ΜΗΛΟΣ)	3,6 ± 1,8

➤ Επιφανειακά ιζήματα

Πίνακας 6.16: Ειδική ενεργότητα  $^{137}\text{Cs}$  σε επιφανειακά ιζήματα  
 $A_{ss} \pm \delta A_{ss}$  (Bq/kg)

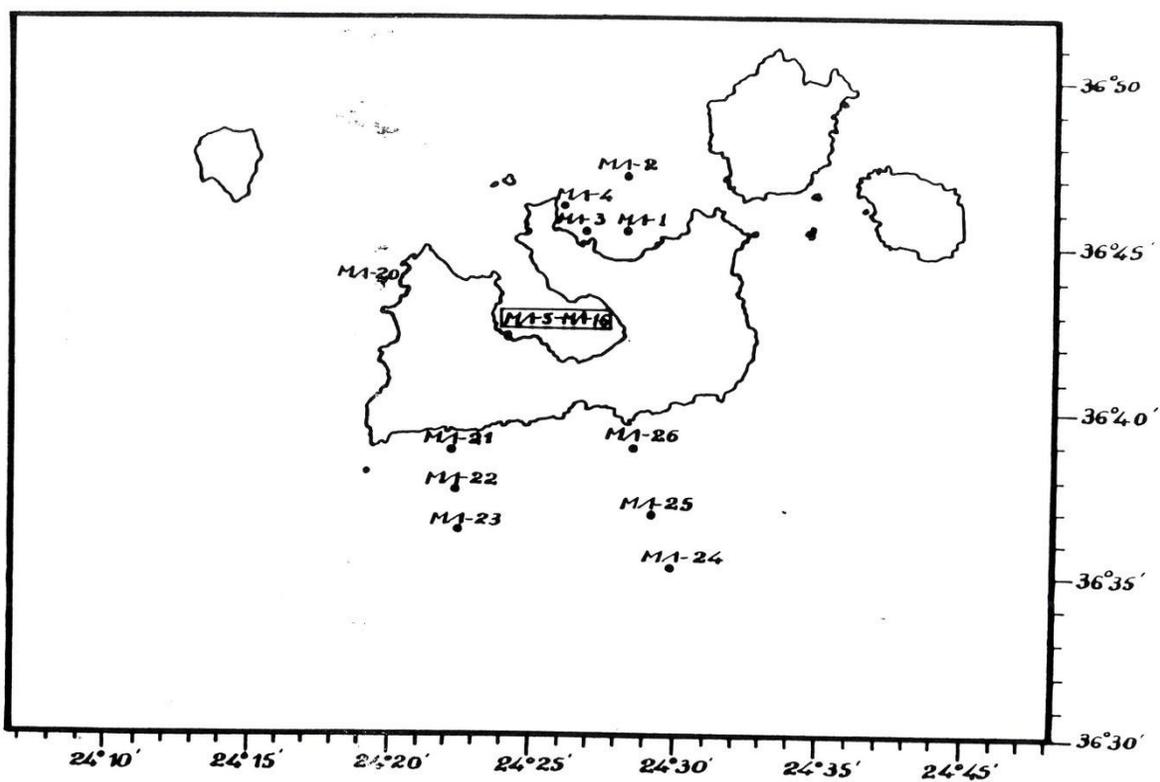
Περιοχή	Δειγματοληπτικός Σταθμός	Βάθος (m)	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
<b>ΣΑΡΩΝΙΚΟΣ-ΚΥΚΛΑΔΕΣ</b>	A01	51	3 ± 1
	A07	70	2 ± 1
	A11	30	4 ± 1
	A13	200	11 ± 6
	A15	190	4 ± 1
	A16	160	4 ± 1
	A17	200	2 ± 1
	A17β	20	4 ± 1
	A18	150	4 ± 1
	A19	91	3 ± 1
	A20	38	4 ± 1
	A21	90	5 ± 1
	A22	32	5 ± 2
	A24	22	4 ± 2
	A25	20	4 ± 1
	A26	130	4 ± 1
	A27	20	3 ± 1
	A28	210	4 ± 2
	A29	285	8 ± 2
	A30	380	5 ± 1
	A31	-	4 ± 2
	A31β	150	7 ± 1
	A32	75	4 ± 2

	A33	130	5 ± 2
	A34	150	6 ± 2
	A35	90	5 ± 1
	A36	80	4 ± 2
	A37	150	4 ± 1
	A38	150	6 ± 2
	A39	150	4 ± 2
	A40	120	3 ± 1
	A40β	20	1,0 ± 0,3
	A41	98	4 ± 1
<b>Μέση τιμή</b>			<b>4,36 ± 0,30</b>
<b>ΚΥΚΛΑΔΕΣ (ΜΗΛΟΣ)</b>	ΜΑ1	38	2,4 ± 1,1
	ΜΑ2	91	4,6 ± 0,9
	ΜΑ3	32	2,4 ± 0,9
	ΜΑ4	36	0,9 ± 0,2
	ΜΑ5	22	6,3 ± 1,3
	ΜΑ6	47	3,1 ± 1,0
	ΜΑ7	46	4,0 ± 1,2
	ΜΑ8	42	3,8 ± 0,9
	ΜΑ9	48	2,7 ± 1,0
	ΜΑ10	64	5,5 ± 1,4
	ΜΑ11	68	2,3 ± 0,8
	ΜΑ12	20	18,6 ± 1,7
	ΜΑ13	74	2,9 ± 0,9
	ΜΑ14	80	4,3 ± 0,7
	ΜΑ16	65	3,5 ± 0,7
	ΜΑ20	60	1,4 ± 0,6
	ΜΑ21	51	1,7 ± 0,5
	ΜΑ23	202	4,8 ± 1,0
	ΜΑ25	97	3,5 ± 0,7
<b>Μέση τιμή</b>			<b>4,14 ± 0,22</b>

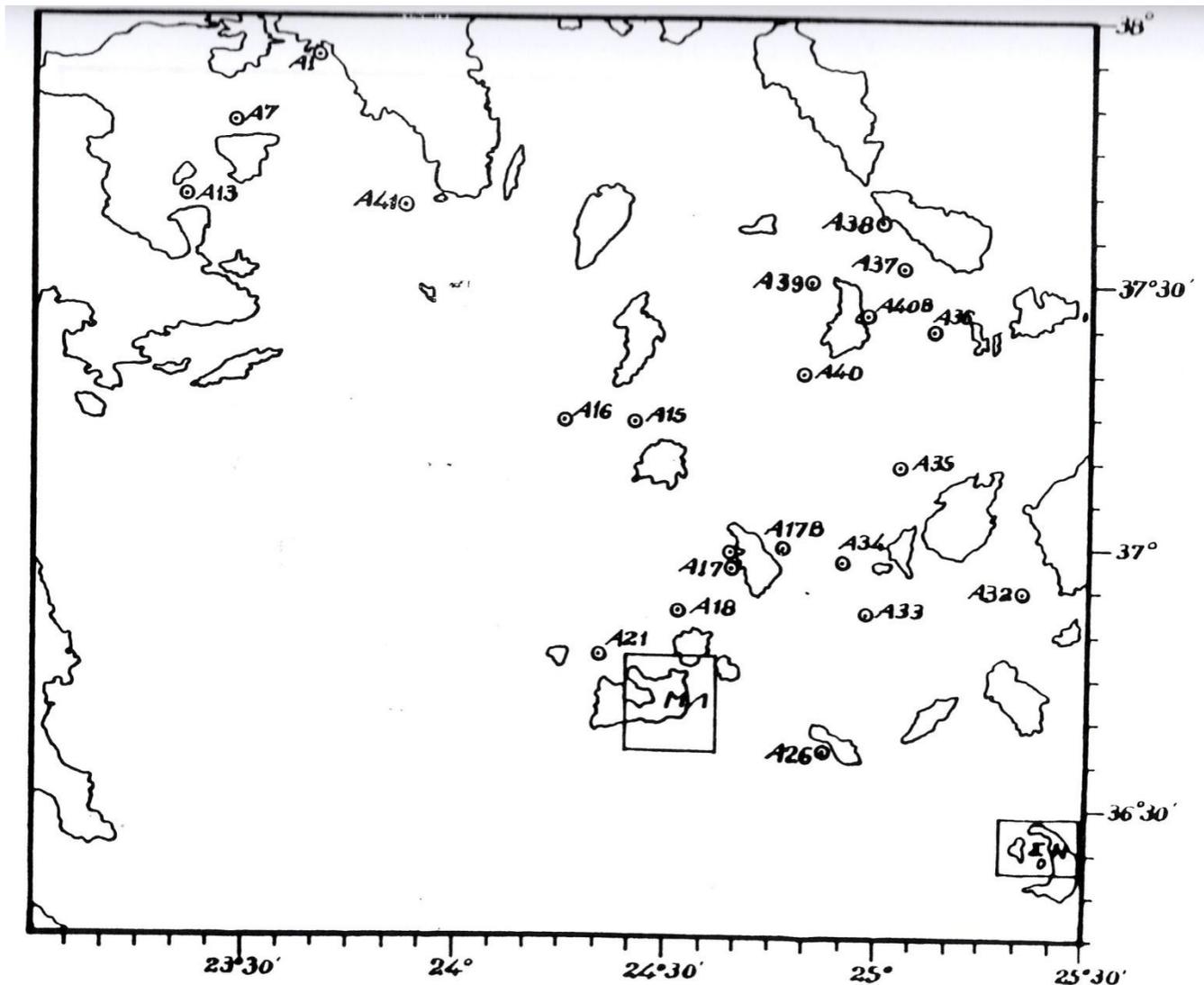
Το βασικό συμπέρασμα που εξάγεται από τις παραπάνω μετρήσεις είναι το ότι η συνεισφορά της τεχνητής ραδιενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι σχεδόν αμελητέα σε σχέση με αυτή της φυσικής, της οποίας η κύρια συνιστώσα δεν είναι άλλη από το  $^{40}\text{K}$  (Εικόνα 6.5).



Εικόνα 6.5: Καταμερισμός συγκεντρώσεων (Bq/kg) των φυσικών και τεχνητών ραδιοουκλιδίων εκπομπής- $\gamma$  σε επιφανειακά ιζήματα στην περιοχή της Μήλου.



Εικόνα 6.6: Χάρτης δειγματοληπτικών σταθμών επιφανειακών ιζημάτων στη Μήλο.[Φλώρου.92]



Εικόνα 6.7: Χάρτης δειγματοληπτικών σταθμών επιφανειακών ιζημάτων στον Σαρωνικό-Πλατώ Κυκλάδων.

[Φλόρου.92]

### **6.3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΜΕΛΕΤΗΘΕΝΤΕΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ**

---

Βασικός σκοπός της μελέτης είναι οι επιπτώσεις, μέσω των εξωτερικών δόσεων, της ραδιενέργειας, φυσικής και τεχνητής, στους θαλάσσιους οργανισμούς. Ο κάθε οργανισμός όμως παρουσιάζει ιδιαιτερότητες και διαφοροποιήσεις στον τόπο διαμονής του και στις συνήθειές του. Για να γίνει λοιπόν ο σωστός υπολογισμός του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης θα πρέπει να ταξινομηθούν οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων σε σχέση και με τις ειδικές συνθήκες διαβίωσης του κάθε οργανισμού καθώς αποτελούν την αποκλειστική πηγή εξωτερικής έκθεσης για τον ίδιο. Η ταξινόμηση αυτή γίνεται ανάλογα με το ενδιαίτημα ( habitat) του κάθε οργανισμού, σε τρεις κατηγορίες:

- *Συγκεντρώσεις των πελαγικών ειδών*
- *Συγκεντρώσεις των επιβενθικών-πελαγικών ειδών*
- *Συγκεντρώσεις των βενθικών ειδών*

Εκτός από το ενδιαίτημα σοβαρά υπόψιν θα πρέπει να ληφθεί και το βάθος στο οποίο ζει το κάθε ψάρι, καθώς οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων παρουσιάζουν διαφορετικές κατανομές στην κατακόρυφη στήλη νερού και ιζήματος. Συνεπώς έγινε επιλεκτική επιλογή εκείνων των μετρήσεων των οποίων η δειγματοληψία υλοποιήθηκε στο επιθυμητό βάθος για κάθε περίπτωση. Ακόμη για μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς, επιλέχθηκαν οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων θαλασσινού νερού-ιζήματος εκείνων των δειγμάτων που βρίσκονται στην πιο κοντινή γεωγραφική απόσταση.

Παρακάτω παρατίθενται πίνακες αρχικά με τα μελετηθέντα είδη και τα βάθη που συναντώνται στη θάλασσα και στη συνέχεια με τις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων (φυσικών - τεχνητών) ανά είδος, με τα αντίστοιχα στατιστικά σφάλματα.

Πίνακας 6.17: Κατηγορίες μελετηθέντων οργανισμών και βάθη διαβίωσης

Ενδιαίτημα (Habitat)	Επιστημονική ονομασία είδους	Βάθος διαβίωσης στη Θάλασσα (m)
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	From coast to 350m
	Spicara flexuosa	From coast to 130m
	Sardina pilchardus	From coast to 180m
	Trachurus-trachurus	100-200m to 600m
Επιβενθικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	20m-420m
	Mullus barbatus	10m-420m
Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	200m-400m

➤ Πελαγικά Είδη

Πίνακας 6.18: Ειδική ενεργότητα ραδιοουκλιδίων σε επιφανειακά δείγματα θαλασσινού νερού  
 $A_{sw} \pm \delta A_{sw}$  (Bq/m<sup>3</sup>)

Περιοχή Δειγματοληψίας	<sup>226</sup> Ra (Bq/m <sup>3</sup> )	<sup>228</sup> Ra (Bq/m <sup>3</sup> )	<sup>228</sup> Th (Bq/m <sup>3</sup> )	<sup>40</sup> K (Bq/m <sup>3</sup> )	<sup>238</sup> U (Bq/m <sup>3</sup> )	Περιοχή Δειγματοληψίας	<sup>137</sup> Cs (Bq/m <sup>3</sup> )
Βόρεια Κεντρικής Κρήτης	1,52 ± 0,15	2,91 ± 0,22	0,10 ± 0,01	10641 ± 637	38,30 ± 3,80	Σαρωνικός (Πειραιάς)	1,8 ± 1,2
Ανατολικά της Ρόδου	1,53 ± 0,15	3,41 ± 0,21	0,11 ± 0,01	10651 ± 641	39,30 ± 3,80	Κυκλάδες (Μήλος)	3,6 ± 1,8
Βόρεια της Λήμνου	1,56 ± 0,15	3,12 ± 0,21	0,08 ± 0,01	10689 ± 643	36,75 ± 3,40		
Μέση τιμή	1,53 ± 0,09	3,15 ± 0,12	0,10 ± 0,01	10660 ± 370	38,12 ± 2,10	Μέση τιμή	2,7 ± 1,1

➤ Επιβενθικά-Πελαγικά είδη

Πίνακας 6.19: Ειδική ενεργότητα ραδιοουκλιδίων σε επιφανειακά δείγματα θαλασσινού νερού  
 $A_{sw} \pm \delta A_{sw}$  (Bq/m<sup>3</sup>)

Περιοχή Δειγματοληψίας	<sup>226</sup> Ra (Bq/m <sup>3</sup> )	<sup>228</sup> Ra (Bq/m <sup>3</sup> )	<sup>228</sup> Th (Bq/m <sup>3</sup> )	<sup>40</sup> K (Bq/m <sup>3</sup> )	<sup>238</sup> U (Bq/m <sup>3</sup> )	Περιοχή Δειγματοληψίας	<sup>137</sup> Cs (Bq/m <sup>3</sup> )
Βόρειο Αιγαίο (Λήμνος)	1,56 ± 0,15	3,12 ± 0,21	0,08 ± 0,01	10689 ± 643	36,75 ± 3,40	Σαρωνικός (Πειραιάς)	1,8 ± 1,2
Νότιο Αιγαίο (μέση τιμή σταθμών Κρήτης-Ρόδου)	1,53 ± 0,11	3,16 ± 0,15	0,11 ± 0,01	10646 ± 452	38,80 ± 2,70	Κυκλάδες (Μήλος)	3,6 ± 1,8
Μέση τιμή	1,55 ± 0,11	3,14 ± 0,13	0,10 ± 0,01	10668 ± 393	37,78 ± 2,20	Μέση τιμή	2,7 ± 1,1

Πίνακας 6.20: Ειδική ενεργότητα ραδιονουκλιδίων σε επιφανειακά ιζήματα

$A_{ss} \pm \delta A_{ss} (\text{Bq/kg})$

Περιοχή Δειγματοληψίας	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)	$^{238}\text{U}$ (Bq/kg)	Περιοχή Δειγματοληψίας	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
Βόρειο Αιγαίο (Χαλκιδική)	50 ± 19	22 ± 12	627 ± 210	54 ± 20	Σαρωνικός-Κυκλάδες	4,36 ± 0,30
Νότιο Αιγαίο (Μήλος)	29,1 ± 0,4	42,1 ± 0,7	650 ± 5,8	42,2 ± 3,6	Κυκλάδες (Μήλος)	4,14 ± 0,22
Μέση τιμή	39,6 ± 9,5	32,1 ± 6	638,5 ± 105	48,1 ± 10,2	Μέση τιμή	4,25 ± 0,19

➤ Βενθικά είδη

Πίνακας 6.21: Ειδική ενεργότητα ραδιονουκλιδίων σε επιφανειακά ιζήματα

$A_{ss} \pm \delta A_{ss} (\text{Bq/kg})$

Περιοχή Δειγματοληψίας	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)	$^{238}\text{U}$ (Bq/kg)	Περιοχή Δειγματοληψίας	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
Κυκλάδες (Μήλος)	21 ± 1	25 ± 2	243 ± 20	29 ± 18	Σαρωνικός-Κυκλάδες	6,0 ± 1,4
Σαρωνικός-Κυκλάδες	20 ± 2	23,5 ± 3,5	384,5 ± 12,8	29,5 ± 9,7	Κυκλάδες (Μήλος)	4,8 ± 1,0
Μέση τιμή	20,5 ± 1,1	24,3 ± 2	313,8 ± 11,9	29,3 ± 10,2	Μέση τιμή	5,4 ± 0,9

Ορισμένες παρατηρήσεις για τους παραπάνω πίνακες:

- ✓ Για τα πελαγικά είδη, τα οποία στον ελλαδικό χώρο τα βρίσκουμε κατά πλειοψηφία σε μικρά βάθη από την ακτή, επιλέχθηκαν για τα φυσικά ραδιονουκλίδια, οι συγκεντρώσεις και των τριών περιοχών που είχαν αναφερθεί. Συνεπώς υπάρχουν δείγματα για όλη σχεδόν την περιοχή του Αιγαίου, χωρίς όμως να παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό έγκειται στο ότι το Αιγαίο είναι μία κλειστή και μικρή σε έκταση θάλασσα, με γεωγραφική θέση που παρέχει σχετική περιβαλλοντική και κλιματική σταθερότητα αφού δεν υπάρχουν πηγές ραδιολογικής επιβάρυνσης σε κοντινή γεωγραφική απόσταση. Για το  $^{137}\text{Cs}$  χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των δύο σταθμών (Πειραιάς-Μήλος) που εκπροσωπούν την περιοχή του κεντρικού Αιγαίου.

- ✓ Τα επιβενθικά-πελαγικά είδη αποτελούν πιο πολύπλοκους οργανισμούς καθώς ζουν στην διεπιφάνεια του θαλασσινού νερού και του ιζήματος. Στον υπολογισμό συνεπώς των εξωτερικών δόσεων είναι απαραίτητες οι τιμές και από τα δύο μέσα. Επειδή όμως στην βιβλιογραφία δεν βρέθηκαν τιμές θαλασσινού νερού-ιζήματος από τον ίδιο δειγματοληπτικό σταθμό, επιλέχθηκαν για μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία, δείγματα από περιοχές με τη μικρότερη σχετική απόσταση. Για τα φυσικά ραδιονουκλίδια χωρίστηκε το Αιγαίο σε δύο περιοχές, το Βόρειο και το Νότιο. Στο Βόρειο τμήμα χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από τα δείγματα της Λήμνου (νερό) και της Χαλκιδικής (ιζημα), ενώ στο Νότιο η μέση τιμή των μετρήσεων στους σταθμούς Κρήτης-Ρόδου (νερό) και της Μήλου (ιζημα).

Για το  $^{137}\text{Cs}$  χρησιμοποιήθηκαν και για τα δύο μέσα οι τιμές των δειγματοληπτικών περιοχών του Σαρωνικού και των Κυκλάδων (Μήλος). Πιο συγκεκριμένα στο ίζημα χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή όλων των σταθμών σε όλα τα βάθη και για τις δύο περιοχές. Αυτό έγινε με γνώμονα τα βάθη διαβίωσης των επιβενθικών-πελαγικών ψαριών (*Pagellus erythrinus*, *Mullus barbatus*), τα οποία μπορεί να ζουν σε όλη την κλίμακα βάθους που έγινε η δειγματοληψία.

- ✓ «Εκπρόσωπος» των βενθικών ειδών στη παρούσα μελέτη, είναι η *arnoglossus laterna*, ψάρι που ζει σε μεγάλα βάθη (των 200m και άνω), τρεφόμενη αποκλειστικά από το ίζημα. Για τα φυσικά ραδιονουκλίδια επιλέχθηκαν οι μετρήσεις της δειγματοληπτικής περιοχής των Κυκλάδων (Μήλος) και πιο συγκεκριμένα τις τιμές του σταθμού ML23 (βάθους 202m). Ως δεύτερη δειγματοληπτική περιοχή επιλέχθηκε αυτή του Σαρωνικού-Πλατώ Κυκλάδων και πιο συγκεκριμένα η μέση τιμή των μετρήσεων των σταθμών A13-A17 (βάθους 200m). Για το  $^{137}\text{Cs}$ , στην πρώτη περιοχή του Σαρωνικού, χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των συγκεντρώσεων των σταθμών A13-A17-A28-A29-A30 (με βάθη 200m και άνω) και στην δεύτερη περιοχή των Κυκλάδων(Μήλος), χρησιμοποιήθηκε η μέτρηση του σταθμού ML23 (βάθους 202m).

Συνοπτικά παρουσιάζονται οι τιμές των δειγματοληπτικών σταθμών  
επιλογής για τα βενθικά είδη στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 6.22: Ειδική ενεργότητα ραδιονουκλιδίων σε επιφανειακά ιζήματα για βενθικούς οργανισμούς  
 $A_{ss} \pm \delta A_{ss}$  (Bq/kg)

Περιοχή Δειγματοληψίας	Σταθμός	Βάθος (m)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>238</sup> U (Bq/kg)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)
Κυκλάδες(Μήλος)	ML23	202	21 ± 1	25 ± 2	243 ± 20	29 ± 18	4.8 ± 1.0
Σαρωνικός- Κυκλάδες	A13	200	26 ± 3	28 ± 5	444 ± 16	36 ± 16	11 ± 6
	A17	200	14 ± 3	19 ± 5	325 ± 20	23 ± 11	2 ± 1
	A28	210	-	-	-	-	4 ± 2
	A29	285	-	-	-	-	8 ± 2
	A30	380	-	-	-	-	5 ± 1
Μέση τιμή (Σαρωνικός)			20 ± 2	23,5 ± 3,5	384,5 ± 12,8	29,5 ± 9,7	6,0 ± 1,4

## ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ***

***Συγκριτικός υπολογισμός ρυθμού εξωτερικής έκθεσης σε  $(2\pi(A)+2\pi(B))$  και  $4\pi$  γεωμετρία στο θαλάσσιο περιβάλλον μέσω συμβατικών εξισώσεων και του RESRAD-BIOTA.***



### **7.1. ΡΥΘΜΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΟΣΕΩΝ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΜΕΣΩ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ)**

---

Οι θαλάσσιοι οργανισμοί εκτίθενται σε ακτινοβολίες φυσικής και τεχνητής προέλευσης από τα αβιοτικά στοιχεία του περιβάλλοντος τους, που είναι για τους προς μελέτη οργανισμούς, το θαλασσινό νερό και το θαλασσινό ίζημα. Οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στα περιβαλλοντικά δείγματα αποτελούν την βασική συνιστώσα για τον υπολογισμό των εξωτερικών δόσεων ακτινοβολίας-γ που δέχονται οι οργανισμοί. Στον Ελλαδικό χώρο, οι δόσεις αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο σε ακτινοβολίες υποβάθρου (background dose rates) εφόσον στη Ελλάδα δεν υπάρχουν πηγές έκλυσης ραδιενεργών αποβλήτων σε συστηματική βάση.

Για να υπολογισθεί ο ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα διάφορα ραδιονουκλίδια εκπομπής-γ, χρησιμοποιήθηκαν οι συμβατικές εξισώσεις υπολογισμού (Κεφ.4), στις οποίες αντικαταστάθηκαν οι παράμετροι υπολογισμού (Κεφ.6) και συγκεκριμένα τα ενεργειακά αθροίσματα και οι αντίστοιχες τιμές των συγκεντρώσεων, στο νερό και το ίζημα, των φυσικών ραδιονουκλιδίων και του  $^{137}\text{Cs}$ . Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών των εξωτερικών δόσεων (σε Gy/d) με τις ελάχιστες και μέγιστες διακυμάνσεις τους, ανάλογα με το είδος του θαλάσσιου οργανισμού και στις διαφορετικές περιοχές δειγματοληψίας. Συνεπώς θα προκύψουν τρεις κατηγορίες ρυθμού εξωτερικής δόσης ως προς το μέσο έκθεσης :

- **Στο νερό**, που αφορά τα πελαγικά είδη που ζουν και τρέφονται αποκλειστικά από το θαλάσσιο νερό (σχέση 4.11), σε γεωμετρία 4π.
- **Στο ίζημα**, που αφορά τα βενθικά είδη που ζουν και τρέφονται αποκλειστικά στο ίζημα (σχέση 4.11), σε γεωμετρία 4π.
- **Στην διαχωριστική επιφάνεια νερού-ιζήματος**, που αφορά τα βενθοπελαγικά είδη τα οποία διαβιούν στο υπόστρωμα (σχέση 4.12), σε γεωμετρία 2π+2π.

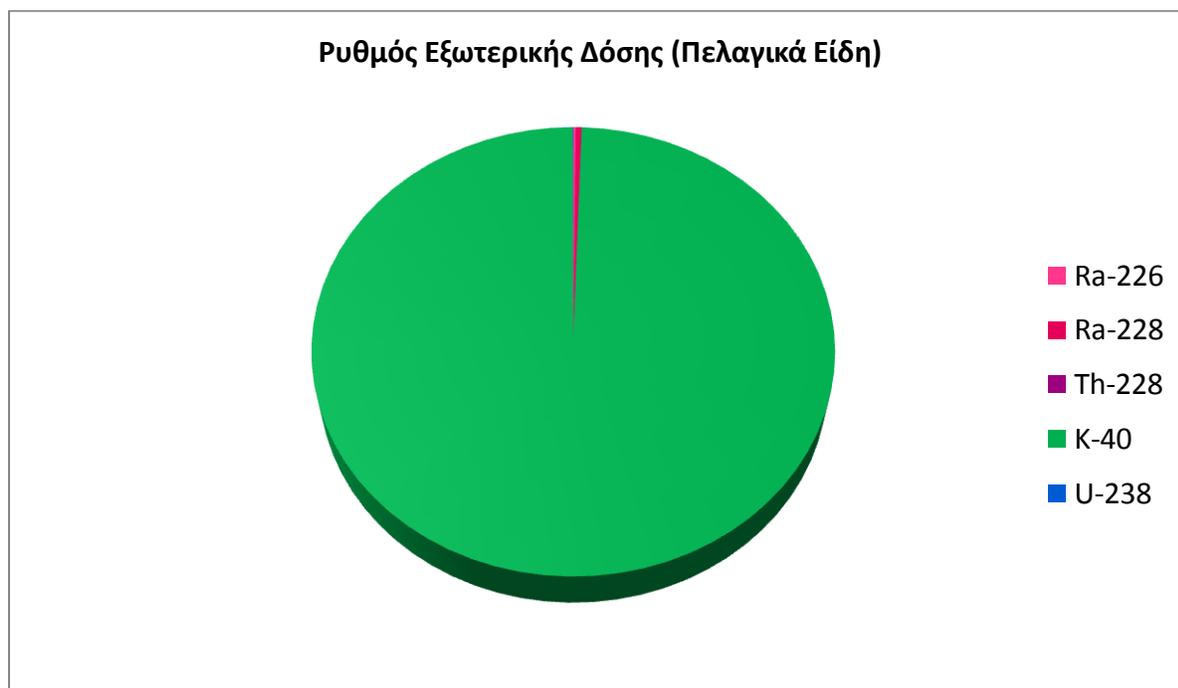
7.1.1. Για τα φυσικά ραδιονουκλίδια

ΠΕΛΑΓΙΚΑ ΕΙΔΗ (Γεωμετρία 4π)

Πίνακας 7.1: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε φυσική ραδιενέργεια από το θαλασσινό νερό (γεωμετρία 4π)

$D \pm \delta D$  (Gy/d)

Περιοχή Δειγματοληψίας	$^{226}\text{Ra}$ ( $10^{-11}$ Gy/d)	$^{228}\text{Ra}$ ( $10^{-11}$ Gy/d)	$^{228}\text{Th}$ ( $10^{-12}$ Gy/d)	$^{40}\text{K}$ ( $10^{-8}$ Gy/d)	$^{238}\text{U}$ ( $10^{-11}$ Gy/d)
Βόρεια Κεντρικής Κρήτης	3,46 ± 0,34	8,43 ± 0,64	1,97 ± 0,20	2,29 ± 0,14	1,03 ± 0,1
Ανατολικά της Ρόδου	3,49 ± 0,34	9,88 ± 0,60	2,16 ± 0,20	2,30 ± 0,14	1,05 ± 0,1
Βόρεια της Λήμνου	3,55 ± 0,34	9,04 ± 0,60	1,57 ± 0,20	2,30 ± 0,14	0,99 ± 0,09
Μέση τιμή	3,5 ± 0,2	9,1 ± 0,4	1,9 ± 0,1	2,3 ± 0,1	1,0 ± 0,1



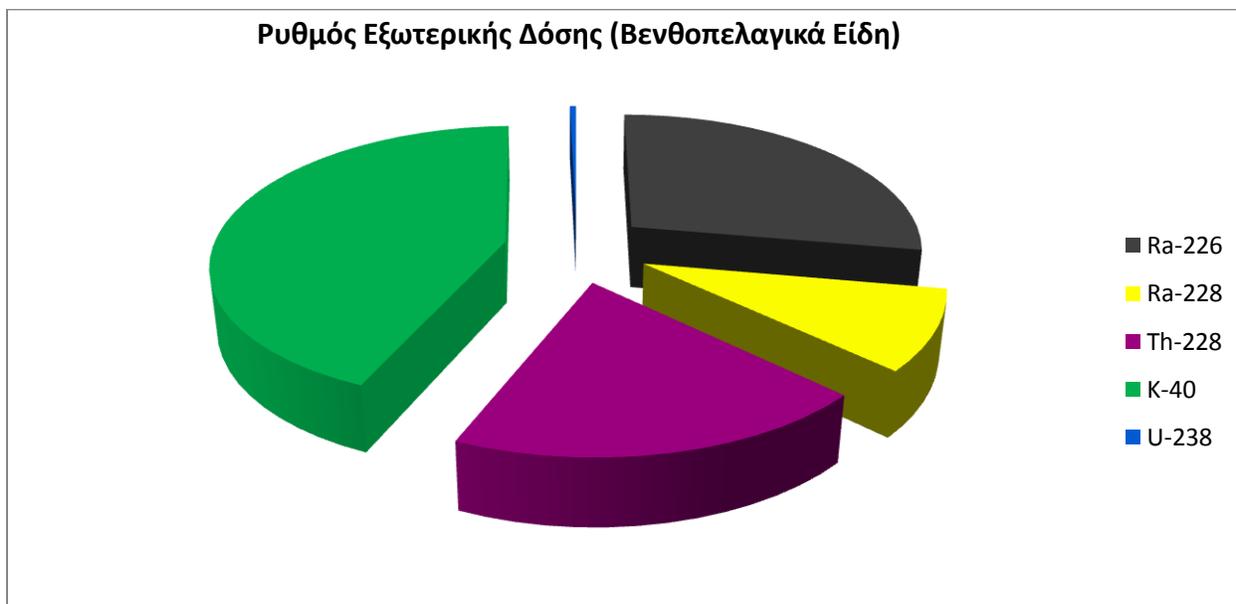
Εικόνα 7.1: Καταμερισμός ρυθμού μέσω των τιμών εξωτερικών δόσεων στα πελαγικά είδη για τα φυσικά ραδιονουκλίδια. Είναι εμφανής η μεγάλη συνεισφορά του K-40 στην εξωτερική δόση στα πελαγικά είδη ώστε η συνεισφορά από τα υπόλοιπα φυσικά ραδιονουκλίδια είναι σχεδόν αμελητέα.

*ΕΠΙΒΕΝΘΙΚΑ-ΠΕΛΑΓΙΚΑ ΕΙΔΗ (Γεωμετρία  $2\pi(A)+2\pi(B)$ )*

Πίνακας 7.2: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε φυσική ραδιενέργεια στην διεπιφάνεια θαλασσινού νερού-ιζήματος (γεωμετρία  $2\pi(A)+2\pi(B)$ )  $D\pm\delta D$  (Gy/d)

Περιοχή Δειγματοληψίας	$^{226}\text{Ra}$ ( $10^{-7}$ Gy/d)	$^{228}\text{Ra}$ ( $10^{-7}$ Gy/d)	$^{228}\text{Th}$ ( $10^{-7}$ Gy/d)	$^{40}\text{K}$ ( $10^{-7}$ Gy/d)	$^{238}\text{U}$ ( $10^{-9}$ Gy/d)
Βορειοανατολικό Αιγαίο	5,69 ± 2,16	1,02 ± 0,56	2,16 ± 1,18	6,87 ± 2,26	7,25 ± 2,68
Νότιο Αιγαίο	3,31 ± 0,05	1,96 ± 0,03	4,14 ± 0,07	7,12 ± 0,06	5,67 ± 0,48
Μέση τιμή	4,5 ± 1,1	1,49 ± 0,28	3,15 ± 0,59	7,0 ± 1,1	6,5 ± 1,4

Στην περίπτωση του Th-232 λόγω μη ύπαρξης ισορροπίας στο θαλασσινό νερό, λόγω κυρίως της διαφορετικής διαλυτότητας των θυγατρικών του (Ra-228&Th-228), δεν υπάρχει ισορροπία και οι συγκεντρώσεις στο νερό θα υπολογίζονται ξεχωριστά για το Ra-228 και ξεχωριστά για το Th-228. Στο θαλασσινό ίζημα οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών Th-228 και Ra-228 θεωρήθηκαν περίπου ίσες με την συγκέντρωση του μητρικού Th-232, έχοντας κάνει την παραδοχή πως είναι ισορροπημένα (δυναμική ισορροπία) με ό,τι αυτό συνεπάγεται.



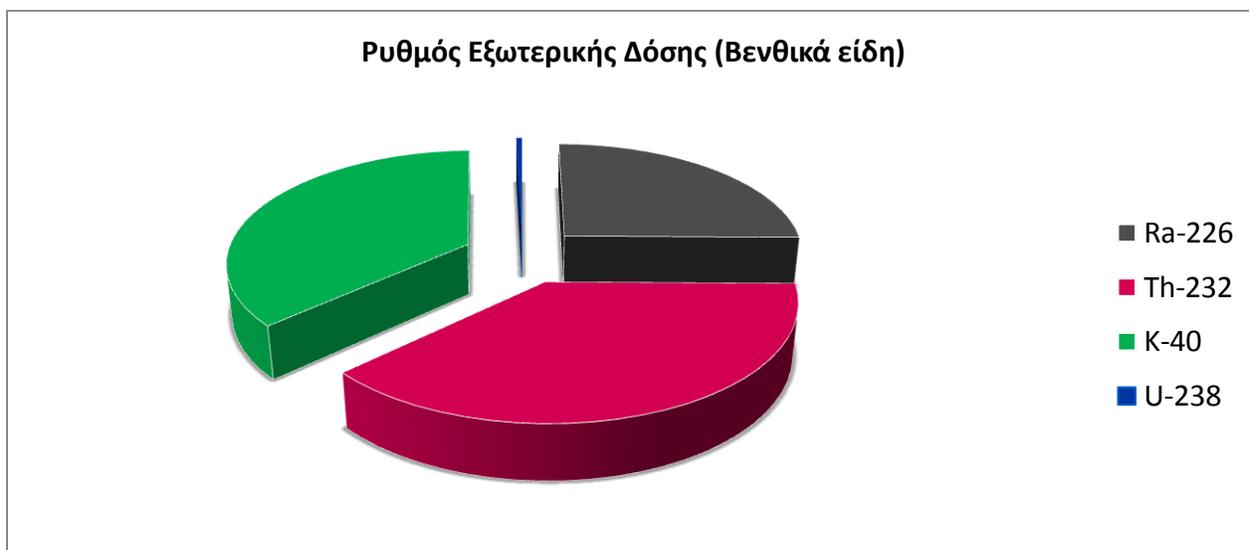
Εικόνα 7.2: Καταμερισμός ρυθμού μέσων τιμών εξωτερικών δόσεων στα βενθοπελαγικά είδη για τα φυσικά ραδιονουκλίδια.

*ΒΕΝΘΙΚΑ ΕΙΔΗ (Γεωμετρία 4π)*

Πίνακας 7.3: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε φυσική ραδιενέργεια από το θαλασσινό ίζημα (γεωμετρία 4π)

D±δD(Gy/d)

Περιοχή Δειγματοληψίας	<sup>226</sup> Ra (10 <sup>-7</sup> Gy/d)	<sup>232</sup> Th (10 <sup>-7</sup> Gy/d)	<sup>40</sup> K (10 <sup>-7</sup> Gy/d)	<sup>238</sup> U (10 <sup>-9</sup> Gy/d)
Κυκλάδες (Μήλος)	4,78 ± 0,23	7,24 ± 0,58	5,24 ± 0,43	7,78 ± 4,83
Σαρωνικός-Κυκλάδες	4,56 ± 0,46	6,81 ± 1,01	8,28 ± 0,28	7,91 ± 2,60
<b>Μέση τιμή</b>	<b>4,7 ± 0,3</b>	<b>7,0 ± 0,6</b>	<b>6,8 ± 0,3</b>	<b>7,9 ± 2,7</b>



Εικόνα 7.3: Καταμερισμός ρυθμού μέσων τιμών εξωτερικών δόσεων στα βενθικά είδη για τα φυσικά ραδιονουκλίδια.

7.1.2. Για το <sup>137</sup>Cs

Πίνακας 7.4: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε <sup>137</sup>Cs ανά είδος οργανισμού ως προς το ενδαιτήμα  
D±δD (Gy/d)

Περιοχή Δειγματοληψίας	ΠΕΛΑΓΙΚΑ (γεωμετρία 4π) <sup>137</sup> Cs (10 <sup>-11</sup> Gy/d)	ΒΕΝΘΙΠΕΛΑΓΙΚΑ (γεωμετρία 2π+2π) <sup>137</sup> Cs (10 <sup>-8</sup> Gy/d)	ΒΕΝΘΙΚΑ (γεωμετρία 4π) <sup>137</sup> Cs (10 <sup>-8</sup> Gy/d)
Σαρωνικός-Κυκλάδες	1,40 ± 0,93	1,70 ± 0,12	4,67 ± 1,09
Κυκλάδες-Μήλος	2,80 ± 1,40	1,61 ± 0,09	3,74 ± 0,78
<b>Μέση τιμή</b>	<b>2,1 ± 0,8</b>	<b>1,7 ± 0,1</b>	<b>4,2 ± 0,4</b>



Εικόνα 7.4: Καταμερισμός ρυθμού μέσων τιμών εξωτερικών δόσεων ανά είδος οργανισμού για το <sup>137</sup>Cs.

#### 7.1.3. *Παράδειγμα υπολογισμού ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης με τη χρήση συμβατικών εξισώσεων.*

Για να γίνει πιο κατανοητός πρακτικά ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι υπολογισμοί μέσω των κλασικών εξισώσεων, δίνεται ακολούθως αναλυτικό παράδειγμα σε βενθοπελαγικό οργανισμό, καθώς υπάρχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στους υπολογισμούς σε σχέση με τα άλλα δύο είδη καθώς βρίσκεται σε γεωμετρία  $2\pi+2\pi$  με 50% επιβάρυνση από το θαλασσινό νερό και 50% από το ίζημα.

Θεωρείται λοιπόν θαλάσσιο οικοσύστημα με βενθοπελαγικά είδη ψαριών, π.χ. *pagellus erithrynus* (λυθρίνι) τα οποία ζουν στην διεπιφάνεια νερού-ιζήματος και σε θαλάσσιο βάθος 20-420m. Στην διεπιφάνεια νερού-ιζήματος ο ρυθμός εξωτερικής δόσης που θα δεχτεί ο οργανισμός δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις, για κάθε ραδιονουκλίδιο (Κεφ.4):

$$\begin{aligned} \dot{D}(w, s)_{226Ra} &= 8 \times 10^{-17} \{ A_s(w)_{226Ra} \sum_i [I_i(w) E_{V_i}(w)]_{226Ra} + A_s(s)_{226Ra} \sum_i [I_i(s) E_{V_i}(s)]_{226Ra} \} \\ \dot{D}(w, s)_{228Ra} &= 8 \times 10^{-17} \{ A_s(w)_{228Ra} \sum_i [I_i(w) E_{V_i}(w)]_{228Ra} + A_s(s)_{228Ra} \sum_i [I_i(s) E_{V_i}(s)]_{228Ra} \} \\ \dot{D}(w, s)_{228Th} &= 8 \times 10^{-17} \{ A_s(w)_{228Th} \sum_i [I_i(w) E_{V_i}(w)]_{228Th} + A_s(s)_{228Th} \sum_i [I_i(s) E_{V_i}(s)]_{228Th} \} \\ \dot{D}(w, s)_{40K} &= 8 \times 10^{-17} \{ A_s(w)_{40K} \sum_i [I_i(w) E_{V_i}(w)]_{40K} + A_s(s)_{40K} \sum_i [I_i(s) E_{V_i}(s)]_{40K} \} \\ \dot{D}(w, s)_{238U} &= 8 \times 10^{-17} \{ A_s(w)_{238U} \sum_i [I_i(w) E_{V_i}(w)]_{238U} + A_s(s)_{238U} \sum_i [I_i(s) E_{V_i}(s)]_{238U} \} \\ \dot{D}(w, s)_{137Cs} &= 8 \times 10^{-17} \{ A_s(w)_{137Cs} \sum_i [I_i(w) E_{V_i}(w)]_{137Cs} + A_s(s)_{137Cs} \sum_i [I_i(s) E_{V_i}(s)]_{137Cs} \} \end{aligned}$$

με αντίστοιχο σφάλμα για το καθένα

$$\delta \dot{D}(w, s) = \pm 8 \times 10^{-17} \sqrt{\{ [\delta A_s(w)] \sum_i I_i(w) E_{V_i}(w) \}^2 + \{ [\delta A_s(s)] \sum_i I_i(s) E_{V_i}(s) \}^2}$$

. Στο θαλασσινό ίζημα οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών Th-228 και Ra-228 θεωρήθηκαν περίπου ίσες με την συγκέντρωση του μητρικού Th-232 (Πίνακας 6.20), θεωρώντας ότι βρίσκονται σε δυναμική ισορροπία.

Με αντικατάσταση λοιπόν στις παραπάνω εξισώσεις των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στο Κεφ.6, δηλαδή τα αθροίσματα ενεργειών (Πίνακας 6.10) και των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων στο νερό (Πίνακας 6.19) και στο ίζημα (Πίνακας 6.20) για τα βενθοπελαγικά είδη ψαριών, προκύπτουν οι τιμές ρυθμού εξωτερικής δόσης για φυσική (Πίνακας 7.2) και τεχνητή (Πίνακας 7.4) ραδιενέργεια. Με παρόμοια διαδικασία υπολογίσθηκαν όλες οι τιμές του ρυθμού εξωτερικής δόσης, μαζί με τα αντίστοιχα σφάλματά τους.

## 7.2. ΡΥΘΜΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΟΣΕΩΝ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ RESRAD-BIOTA)

Ο κώδικας RESRAD-BIOTA παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης ενός επιθυμητού θαλάσσιου οργανισμού όταν αυτός βρίσκεται σε άπειρο ομοιογενή ραδιενεργό χώρο. Στους θαλάσσιους οργανισμούς ο χώρος αυτός θα είναι είτε το θαλασσινό νερό είτε το ίζημα είτε το ενδιάμεσο στρώμα θαλασσινού νερού-ιζήματος. Ο χρήστης δύναται να εισαγάγει δεδομένα που αφορούν στην συγκέντρωση του επιλεγόμενου ραδιονουκλιδίου στον κατάλληλο ραδιενεργό χώρο και να ορίσει τον επιθυμητό οργανισμό μαζί με τα βιομετρικά χαρακτηριστικά του και τα χαρακτηριστικά που αφορούν το ενδιαίτημά του (habitat). Ο κώδικας συνδυάζει τις προκαθορισμένες παραμέτρους του με τις εισαγόμενες τιμές και με MC(Monte Carlo) εξάγει τους παράγοντες εξωτερικής δόσης (DCF<sub>ext</sub>) μέσω των οποίων γίνεται ο τελικός υπολογισμός του ρυθμού εξωτερικής δόσης από τη σχέση:

$$\dot{D}_{ext} = A_{medium} \times DCF_{ext}$$

όπου:  $\dot{D}_{ext}$  ο ρυθμός εξωτερικής δόσης (σε Gy/d),  $A_{medium}$  η συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου στο επιθυμητό ραδιενεργό μέσο (σε Bq/kg για το ίζημα και Bq/m<sup>3</sup>) για το θαλασσινό νερό) και  $DCF_{ext}$  ο συντελεστής εξωτερική δόσης που υπολογίζει ο RESRAD (σε  $\frac{Gy}{y} / \frac{Bq}{kg}$ ).

Σε αντίθεση με τις συμβατικές εξισώσεις, όπου για τον υπολογισμό του ρυθμού εξωτερικής δόσης απαιτούνται η ενέργεια εκπομπής-γ του κάθε ραδιονουκλιδίου και η συγκέντρωσή του στο μέσον έκθεσης, στο RESRAD απαραίτητη είναι και η εισαγωγή των βιομετρικών χαρακτηριστικών του εκτιθέμενου οργανισμού.

Οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων που εισάγονται στον κώδικα αφορούν στις μέσες τιμές όλων των περιοχών δειγματοληψίας (Κεφ.6) ανά ενδιαίτημα(habitat) εκτιθέμενου οργανισμού.

### 7.2.1. Σχέση μήκους θαλάσσιου οργανισμού και υπολογιζόμενου ρυθμού εξωτερικής δόσης από τον RESRAD-BIOTA.

Η παρούσα μελέτη αφορά στην εξαγωγή εξωτερικών δόσεων για συγκεκριμένους θαλάσσιους οργανισμούς με γνωστά βιομετρικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά διαβίωσης (ενδιαίτημα και βάθος στη θάλασσα). Στις κλασικές εξισώσεις ο υπολογισμός του τελικού ρυθμού εξωτερικής δόσης είναι ανεξάρτητος από τα βιομετρικά χαρακτηριστικά (συγκεκριμένα τη μάζα) (Κεφ. 4) του οργανισμού συνεπώς ο υπολογισμός βασίστηκε αποκλειστικά στο μέσον έκθεσης του οργανισμού (νερό, ίζημα ή διεπιφάνεια) και στα φυσικά χαρακτηριστικά του ραδιονουκλιδίου μελέτης σε αυτό (ειδική ενεργότητα και ενέργεια εκπομπής-γ). Ακόμη στην μελέτη συνυπολογίστηκε και το βάθος διαβίωσης του ψαριού στη θάλασσα, ώστε να γίνει η σωστή ταξινόμηση και επιλογή των δειγμάτων συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων. Σε αντίθεση, το πρόγραμμα στον υπολογισμό των παραγόντων εξωτερικής δόσης εκτός των άλλων κοινών παραμέτρων υπολογισμού, χρησιμοποιεί και τον όγκο του ψαριού, ο οποίος καθορίζεται με τη μορφή κλίμακας, από το 1-8 με αντίστοιχες διαστάσεις:

Πίνακας 7.5: Κλίμακα με τη γεωμετρία του οργανισμού που ορίζει ο RESRAD-BIOTA (cm<sup>3</sup>)

Κλίμακα όγκου οργανισμού RESRAD-BIOTA	Αντιστοιχία όγκου οργανισμού στην κλίμακα (cm <sup>3</sup> )
1	0,2×0,2×0,2
2	2,5×1,2×0,62
3	10×2×2
4	45×8,7×4,9
5	50×26×13
6	100×42×33
7	270×66×48
8	220×100×100

Από το μετρημένο (σε cm) μήκος των ψαριών που μελετώνται (Πίνακας 7.16) παρατηρείται πως οι τιμές κυμαίνονται στα επίπεδα 2, 3 και 4 της κλίμακας μεγέθους που προτείνει ο RESRAD-BIOTA. Συνεπώς για πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα θα πρέπει να γίνει σωστός συσχετισμός μεταξύ των τριών επιπέδων μεγέθους της κλίμακας του RESRAD και του

μήκους που έχει μετρηθεί, ώστε να βρεθούν οι τελικές τιμές των εξωτερικών δόσεων για τους επιθυμητούς οργανισμούς με το συγκεκριμένο μετρημένο μήκος. Για να γίνει αυτή η υλοποίηση αρχικά υπολογίσθηκαν στο RESRAD-BIOTA ο ρυθμός εξωτερικής δόσης όλων των ραδιονουκλιδίων, ανά ενδιαίτημα οργανισμού, και για τις τρεις κλίμακες μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα, διατηρώντας σταθερές όλες τις παραμέτρους υπολογισμού (συγκέντρωση ραδιοϊσοτόπου και μέσον έκθεσης) και μεταβάλλοντας μόνο την κλίμακα του όγκου, παρατηρήθηκε η διασπορά των τιμών του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μέγεθος του ψαριού (για απλοποίηση χρησιμοποιήθηκε μόνο το μήκος). Η μοντελοποίηση της σχέσης της εξαρτημένης μεταβλητής του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με την ανεξάρτητη μεταβλητή του μήκους (όπως αυτό ορίζεται από την κλίμακα του RESRAD) του εκτεθειμένου οργανισμού υλοποιήθηκε μέσω απλής γραμμικής παλινδρόμησης (simple linear regression). Από την εξίσωση που προκύπτει γίνεται αντικατάσταση του μετρούμενου μήκους των ψαριών της δειγματοληψίας για κάθε είδος που μελετάται, ώστε να βρεθεί ο τελικός ρυθμός εξωτερικής δόσης για τους επιθυμητούς οργανισμούς.

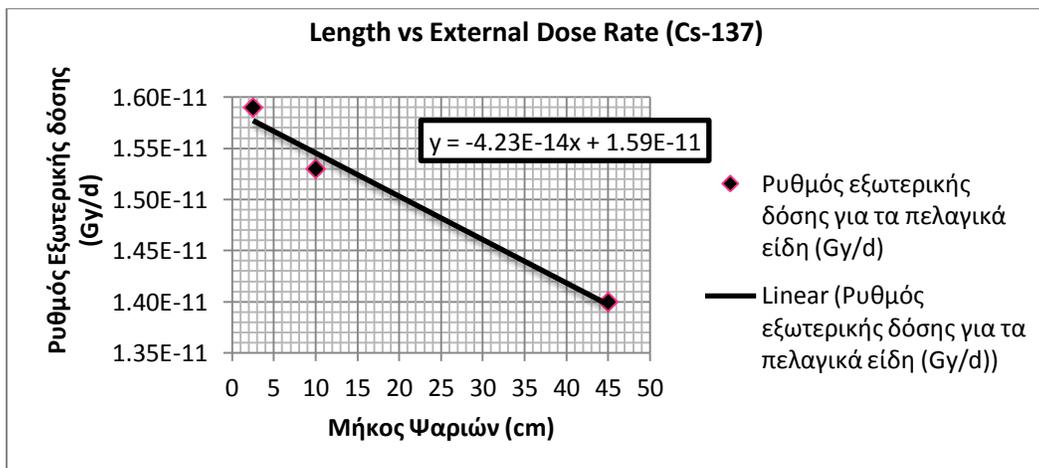
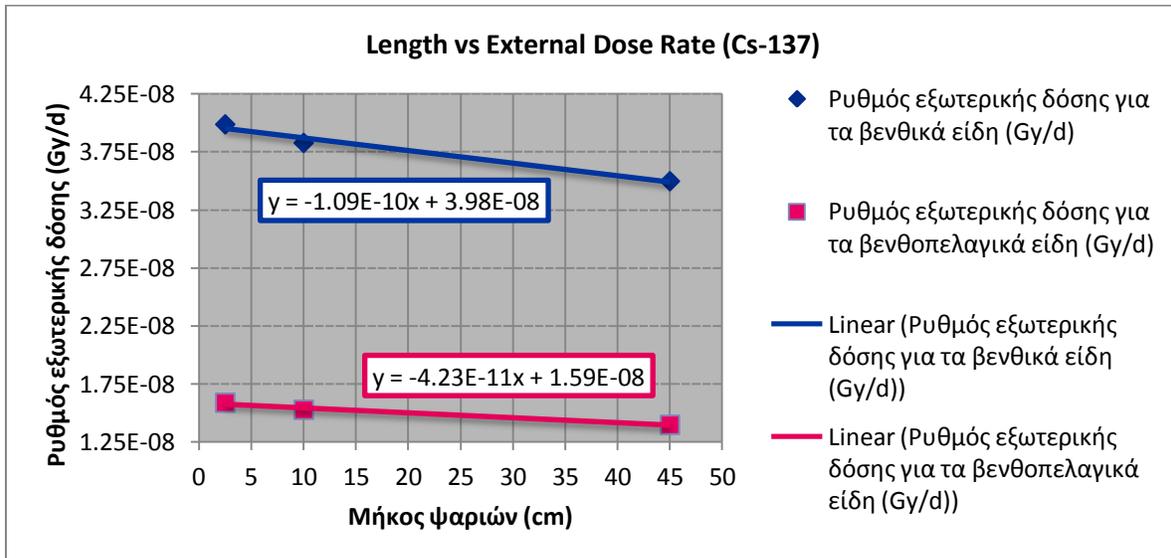
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα διασποράς των τιμών ρυθμού εξωτερικής δόσης-μήκους οργανισμού μαζί με τις αντίστοιχες εξισώσεις. Η υλοποίηση έγινε, όπως προαναφέρθηκε, για κάθε ραδιονουκλίδιο, σε κάθε μία από τις τρεις κατηγορίες διαβίωσης (habitat) και για τα τρία μεγέθη (2,3&4) της κλίμακας του RESRAD-BIOTA. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές των μηκών των ψαριών, που μετρήθηκαν από τη δειγματοληψία, όπου με αντικατάσταση στις αντίστοιχες πρωτοβάθμιες εξισώσεις θα προκύψουν και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ρυθμού εξωτερικής δόσης για τον εκάστοτε οργανισμό

7.2.1.1. Ταξινόμηση διαγραμμάτων γραμμικής παλινδρόμησης ανά ραδιονουκλίδιο.

• Cs-137

Πίνακας 7.6: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε <sup>137</sup>Cs ανά είδος οργανισμού ως προς το ενδιαίτημα, στην κλίματα μήκους, όπως προκύπτει από τον RESRAD-BIOTA (Gy/d).

Γεωμετρία ψαριού (μήκος L (cm))	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθικά ψάρια (Gy/d)	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθοπελαγικά ψάρια (Gy/d)	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα πελαγικά ψάρια (Gy/d)
2,5	3,99E-08	1,59E-08	1,59E-11
10	3,83E-08	1,53E-08	1,53E-11
45	3,50E-08	1,40E-08	1,40E-11

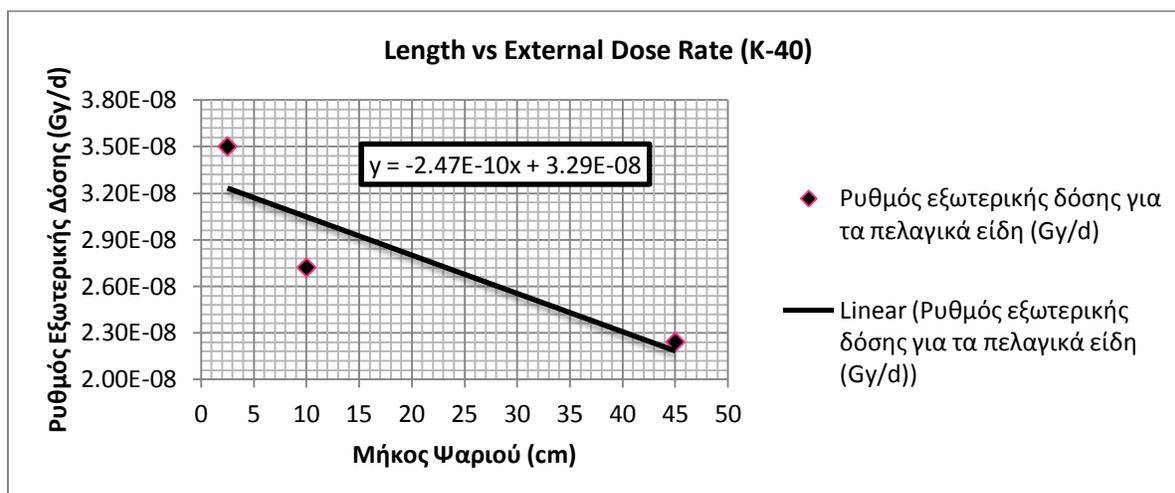
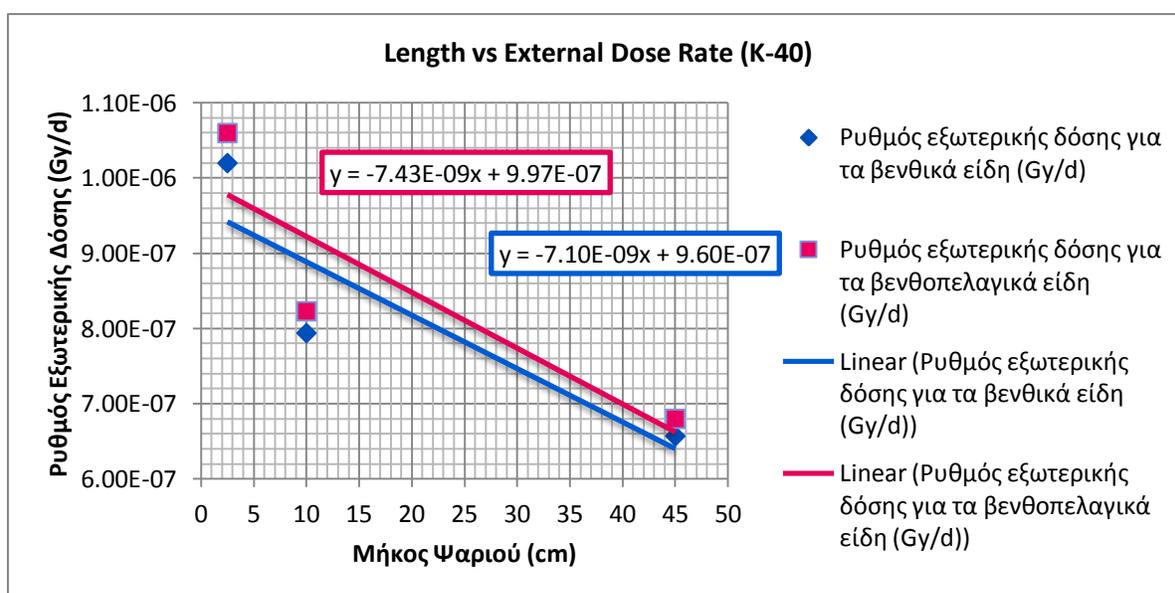


Εικόνα 7.5: Γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μήκος για το Cs-137.

• **K-40**

Πίνακας 7.7: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε <sup>40</sup>K ανά είδος οργανισμού ως προς το ενδιαίτημα, στην κλίματα μήκους, όπως προκύπτει από τον RESRAD-BIOTA (Gy/d).

Γεωμετρία ψαριού (μήκος L (cm))	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθικά ψάρια (Gy/d)	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθοπελαγικά ψάρια (Gy/d)	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα πελαγικά ψάρια (Gy/d)
2,5	1,02E-06	1,06E-06	3,50E-08
10	7,94E-07	8,23E-07	2,72E-08
45	6,57E-07	6,80E-07	2,24E-08

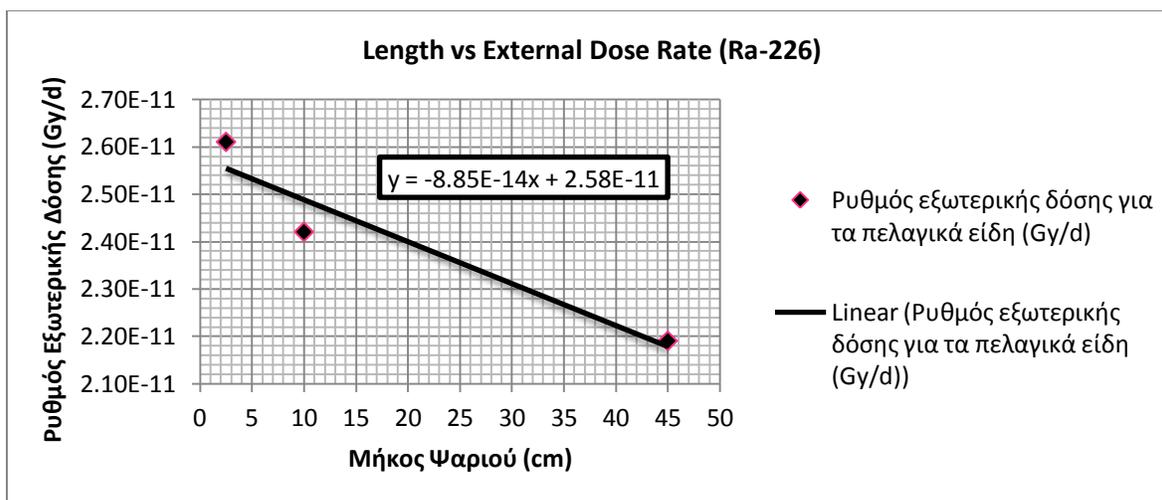
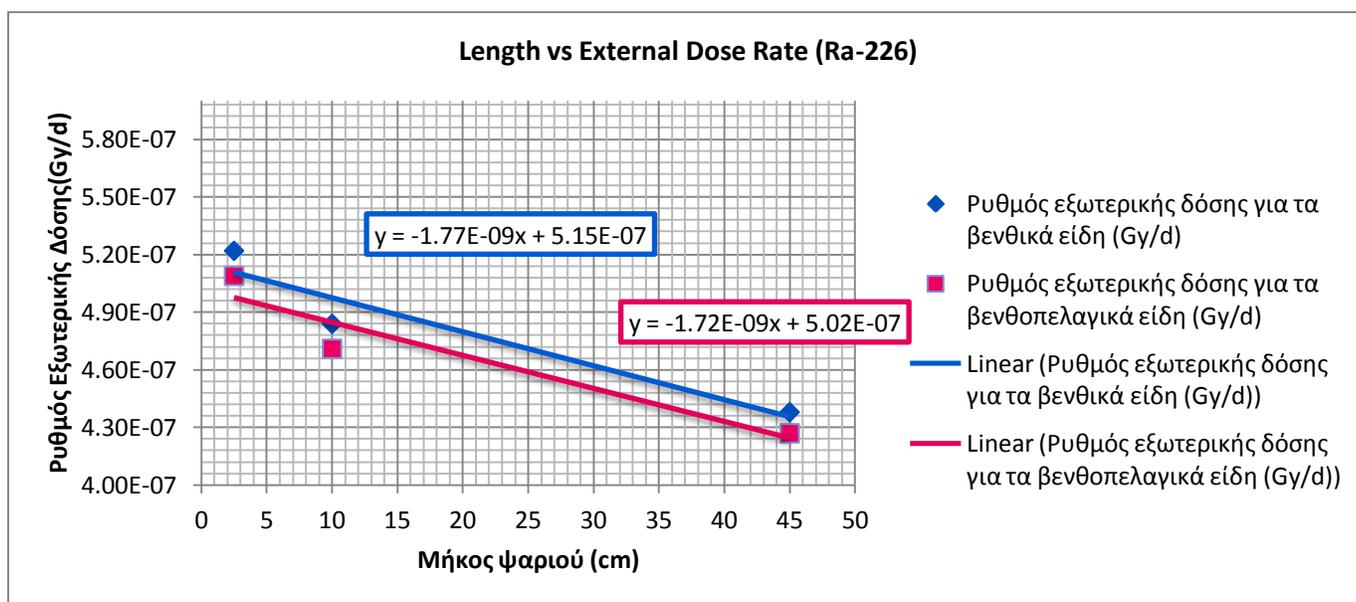


Εικόνα 7.6: Γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μήκος για το K-40.

• **Ra-226**

Πίνακας 7.8: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε <sup>226</sup>Ra ανά είδος οργανισμού ως προς το ενδιαίτημα, στην κλίμακα μήκους, όπως προκύπτει από τον RESRAD-BIOTA (Gy/d).

Γεωμετρία ψαριού (μήκος L (cm))	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθικά είδη (Gy/d)	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθοπελαγικά είδη (Gy/d)	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα πελαγικά είδη (Gy/d)
2,5	5,22E-07	5,09E-07	2,61E-11
10	4,84E-07	4,71E-07	2,42E-11
45	4,38E-07	4,27E-07	2,19E-11

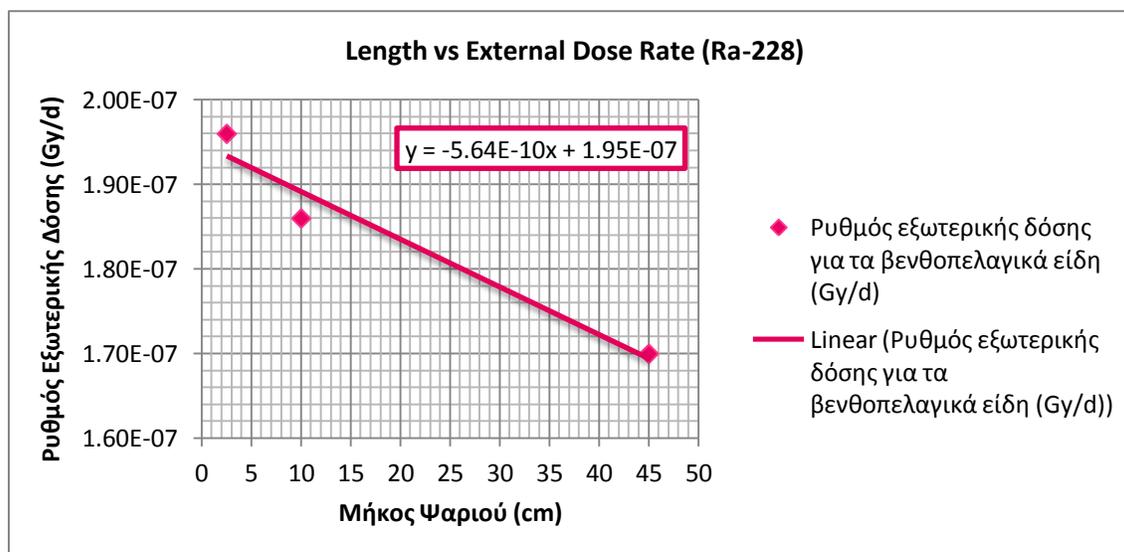
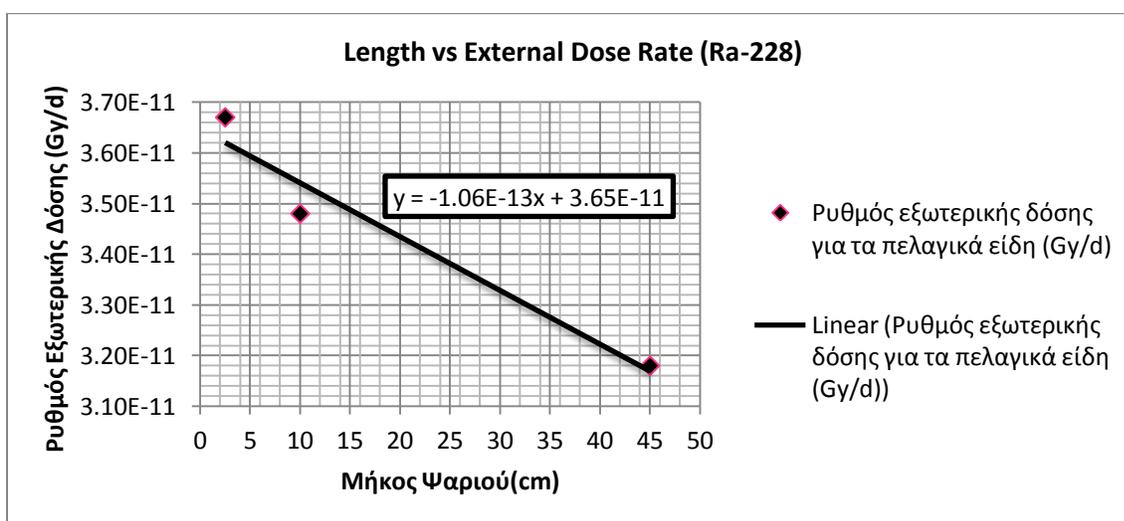


Εικόνα 7.7: Γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μήκος για το Ra-226.

• **Ra-228**

Πίνακας 7.9: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε <sup>228</sup>Ra για τα πελαγικά και βενθοπελαγικά είδη, στην κλίματα μήκους, όπως προκύπτει από τον RESRAD-BIOTA (Gy/d).

Γεωμετρία ψαριού (μήκος L (cm))	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα πελαγικά είδη (Gy/d)	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθοπελαγικά είδη (Gy/d)
2,5	3,67E-11	1,96E-07
10	3,48E-11	1,86E-07
45	3,18E-11	1,70E-07

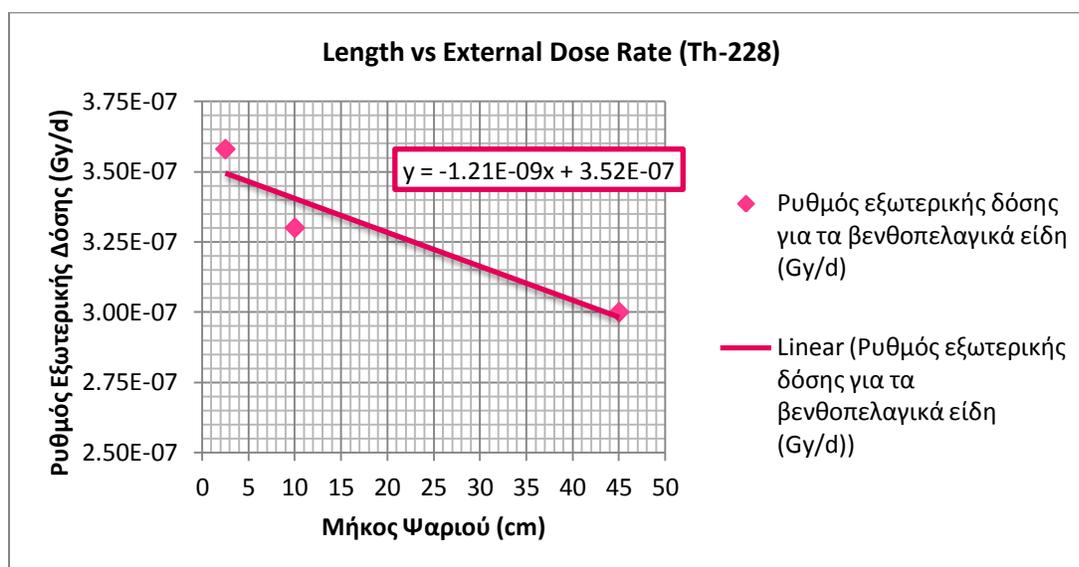


Εικόνα 7.8: Γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μήκος για το Ra-228 στα πελαγικά και βενθοπελαγικά ψάρια.

- **Th-228**

Πίνακας 7.10: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε <sup>228</sup>Th στα πελαγικά και βενθοπελαγικά είδη, στην κλίματα μήκους, όπως προκύπτει από τον RESRAD-BIOTA (Gy/d).

Γεωμετρία ψαριού (μήκος L (cm))	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα πελαγικά είδη (Gy/d)	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθοπελαγικά είδη (Gy/d)
2,5	0,00E+00	3,58E-07
10	0,00E+00	3,30E-07
45	0,00E+00	3,00E-07

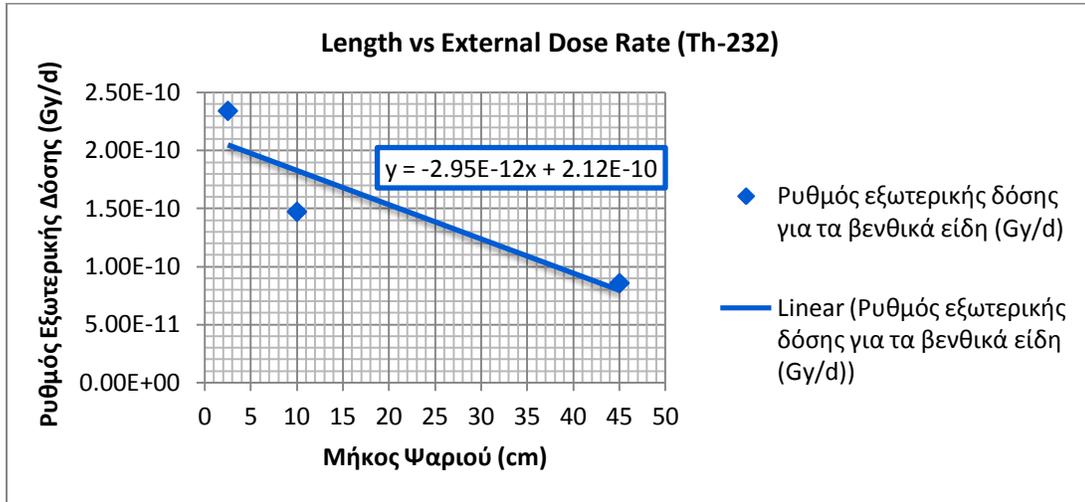


Εικόνα 7.9: Γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μήκος για το Th-228 για τα βενθοπελαγικά ψάρια.

- **Th-232 (Για τα βενθικά είδη μόνο)**

Πίνακας 7.11: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε <sup>232</sup>Th για τα βενθικά είδη, στην κλίματα μήκους, όπως προκύπτει από τον RESRAD-BIOTA (Gy/d).

Γεωμετρία ψαριού (μήκος L (cm))	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθικά είδη (Gy/d)
2,5	2,34E-10
10	1,47E-10
45	8,55E-11

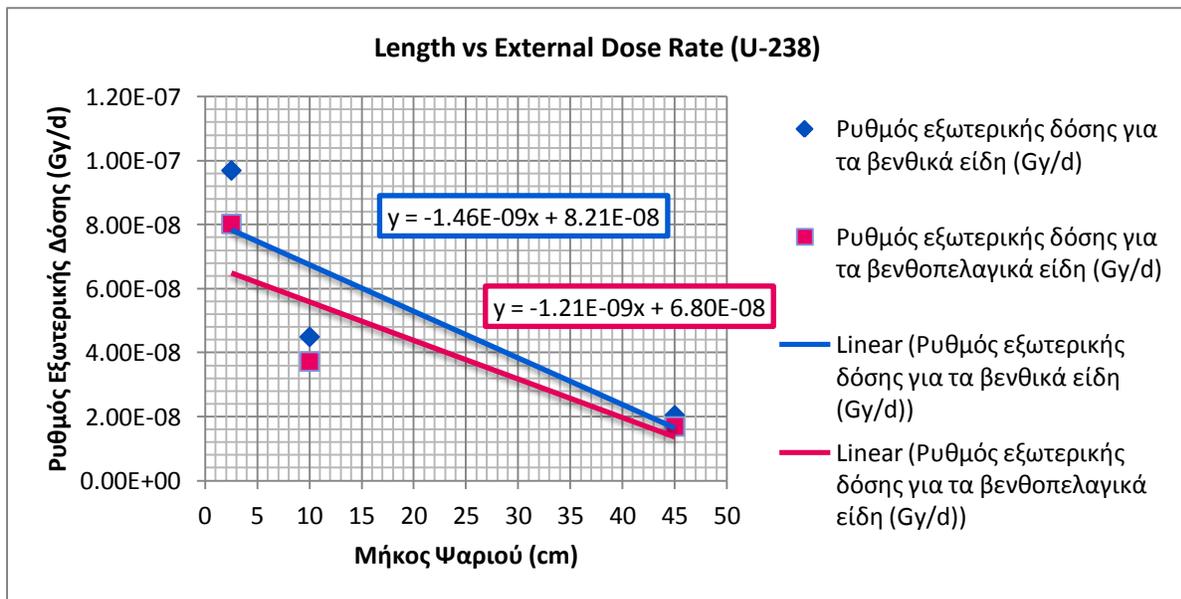


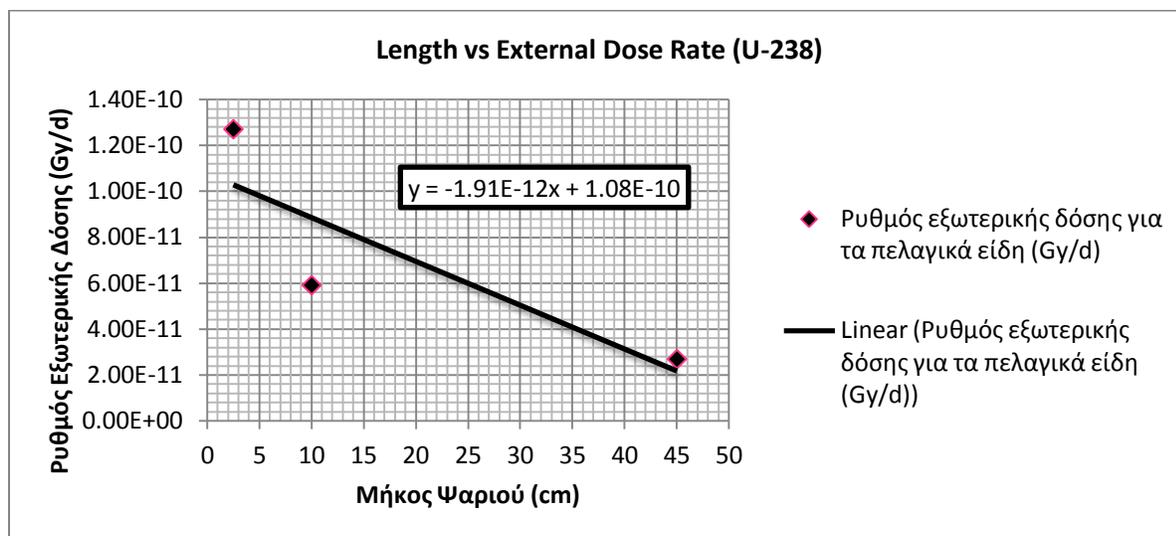
Εικόνα 7.10: Γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μήκος για το Th-232 για τα βενθικά ψάρια.

• **U-238**

Πίνακας 7.12: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε <sup>238</sup>U ανά είδος οργανισμού ως προς το ενδιαίτημα, στην κλίμακα μήκους, όπως προκύπτει από τον RESRAD-BIOTA (Gy/d).

Γεωμετρία ψαριού (μήκος L (cm))	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθικά είδη (Gy/d)	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα βενθοπελαγικά είδη (Gy/d)	Ρυθμός εξωτερικής δόσης για τα πελαγικά είδη (Gy/d)
2,5	9,70E-08	8,03E-08	1,27E-10
10	4,50E-08	3,73E-08	5,90E-11
45	2,05E-08	1,70E-08	2,68E-11





Εικόνα 7.11: Γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μήκος για το U-238.

Ορισμένες παρατηρήσεις-επισυμάνσεις σχετικά με τα παραπάνω γραφήματα:

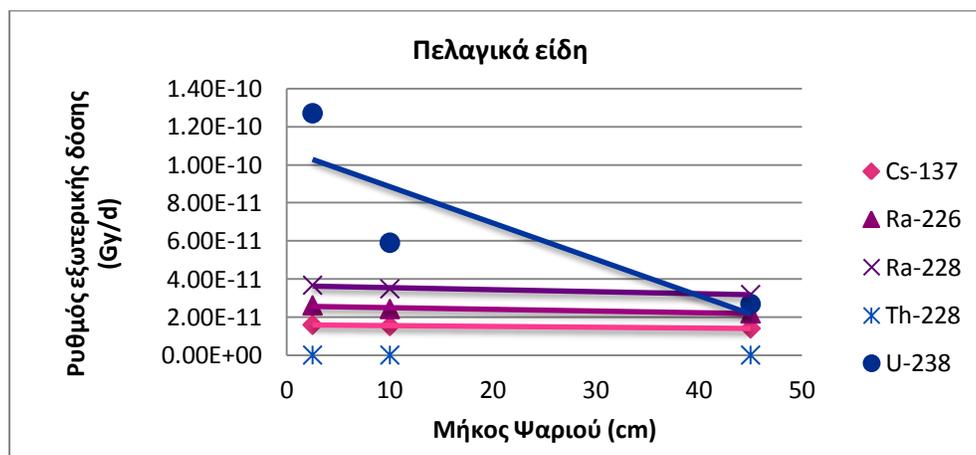
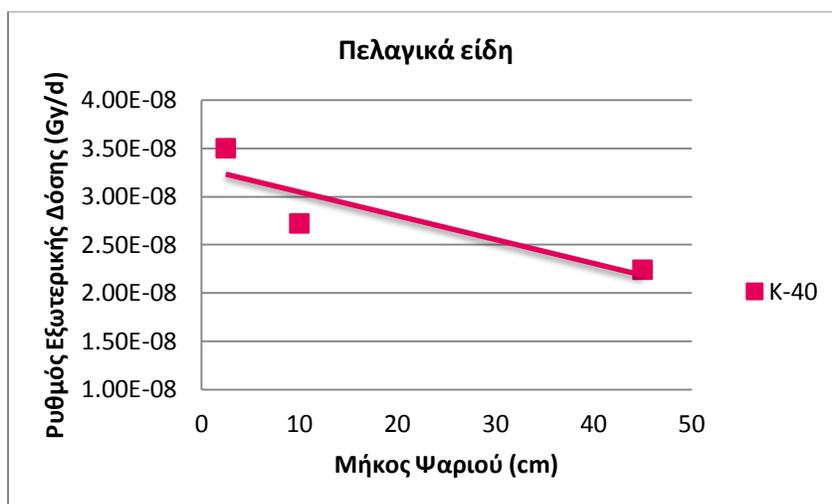
1. Για καλύτερη απεικόνιση, στο ίδιο διάγραμμα προστέθηκαν αποτελέσματα που βρίσκονταν στην ίδια τάξη μεγέθους.
2. Για καλύτερη ανάγνωση των διαγραμμάτων, τα δεδομένα που αφορούν στα βενθικά είδη είναι σημειωμένα με μπλε χρώμα, αυτά που αφορούν στα βενθοπελαγικά με κόκκινο και όσα αφορούν στα πελαγικά με μαύρο.

### 7.2.1.2. Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης ανά ενδιαίτημα οργανισμού.

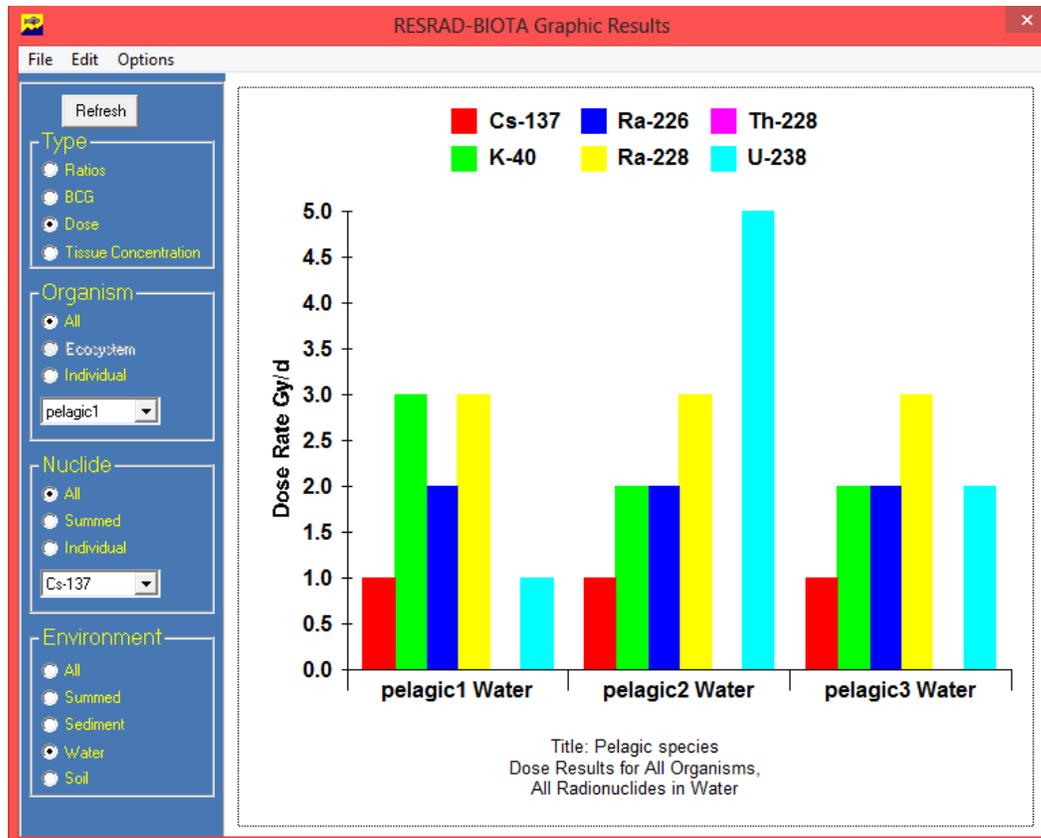
- *Πελαγικά Είδη (Pelagic Species)*

Πίνακας 7.13: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε φυσική και τεχνητή ιοντίζουσα ακτινοβολία για τα πελαγικά είδη ψαριών, στην κλίματα μήκους, όπως προκύπτει από τον RESRAD-BIOTA (Gy/d).

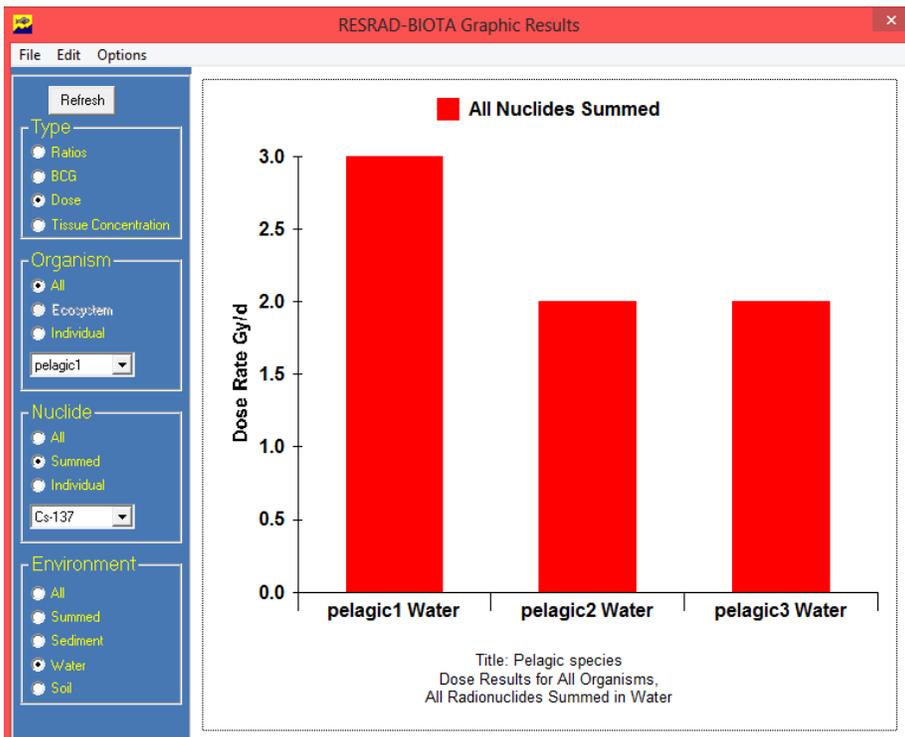
Γεωμετρία ψαριού (μήκος L (cm))	Cs-137 (Gy/d)	K-40 (Gy/d)	Ra-226 (Gy/d)	Ra-228 (Gy/d)	Th-228 (Gy/d)	U-238 (Gy/d)
2,5	1,59E-11	3,50E-08	2,61E-11	3,67E-11	0,00E+00	1,27E-10
10	1,53E-11	2,72E-08	2,42E-11	3,48E-11	0,00E+00	5,90E-11
45	1,40E-11	2,24E-08	2,19E-11	3,18E-11	0,00E+00	2,68E-11



Εικόνα 7.12: Γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μήκος για τα πελαγικά είδη ψαριών.



Εικόνα 7.13: Γράφημα του RESRAD-BIOTA με τα αποτελέσματα του ρυθμού εξωτερικής δόσης ανά επιλεγόμενη γεωμετρία οργανισμού για τα Πελαγικά Ψάρια.

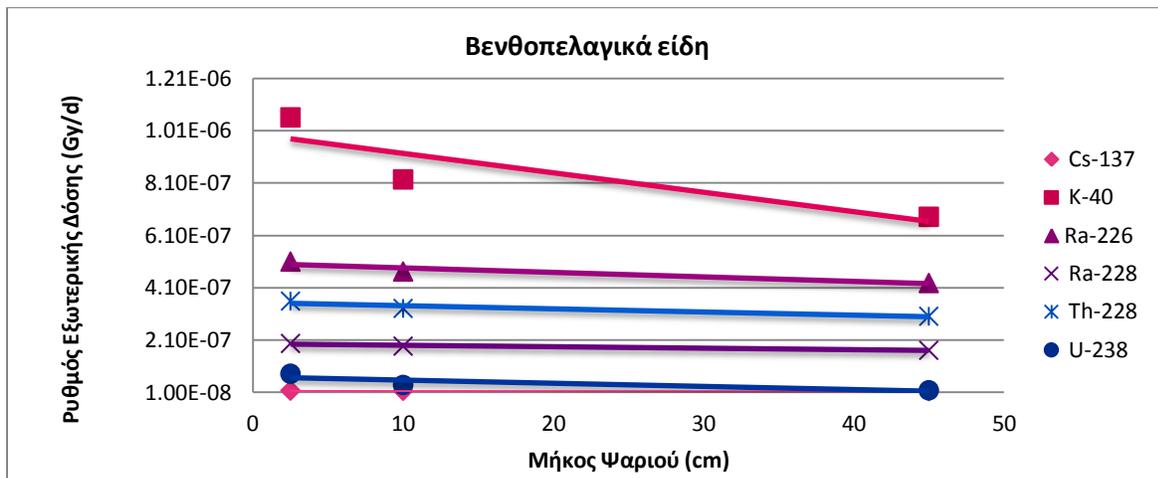


Εικόνα 7.14: Γράφημα του RESRAD-BIOTA με τα αποτελέσματα του ρυθμού της ολικής εξωτερικής δόσης ανά επιλεγόμενη γεωμετρία οργανισμού για τα Πελαγικά Ψάρια.

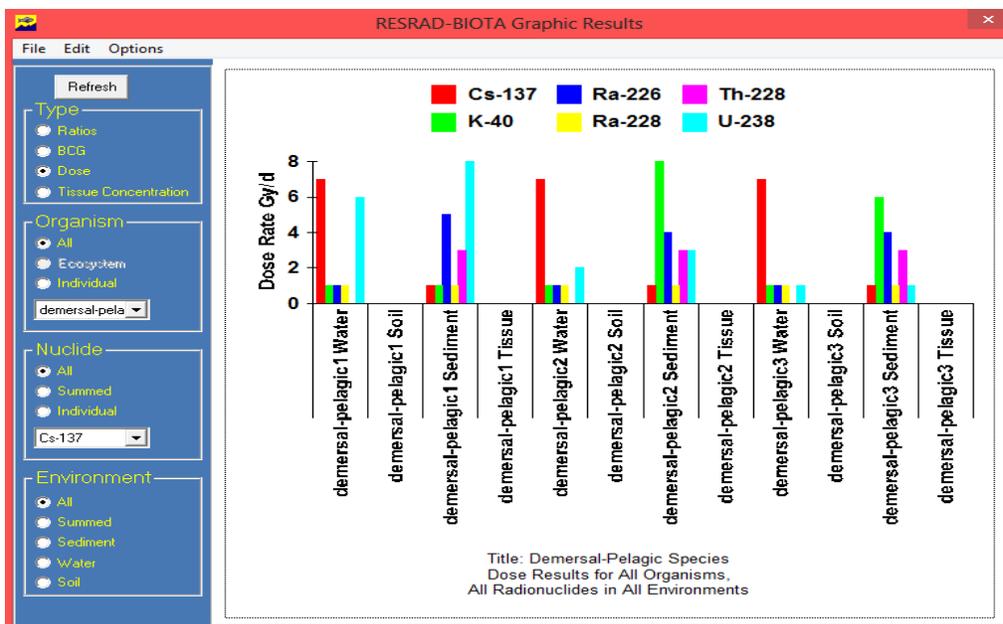
• *Βενθοπελαγικά Είδη (Demersal-Pelagic Species)*

Πίνακας 7.14: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε φυσική και τεχνητή ιοντίζουσα ακτινοβολία για τα βενθοπελαγικά είδη ψαριών, στην κλίματα μήκους, όπως προκύπτει από τον RESRAD-BIOTA (Gy/d).

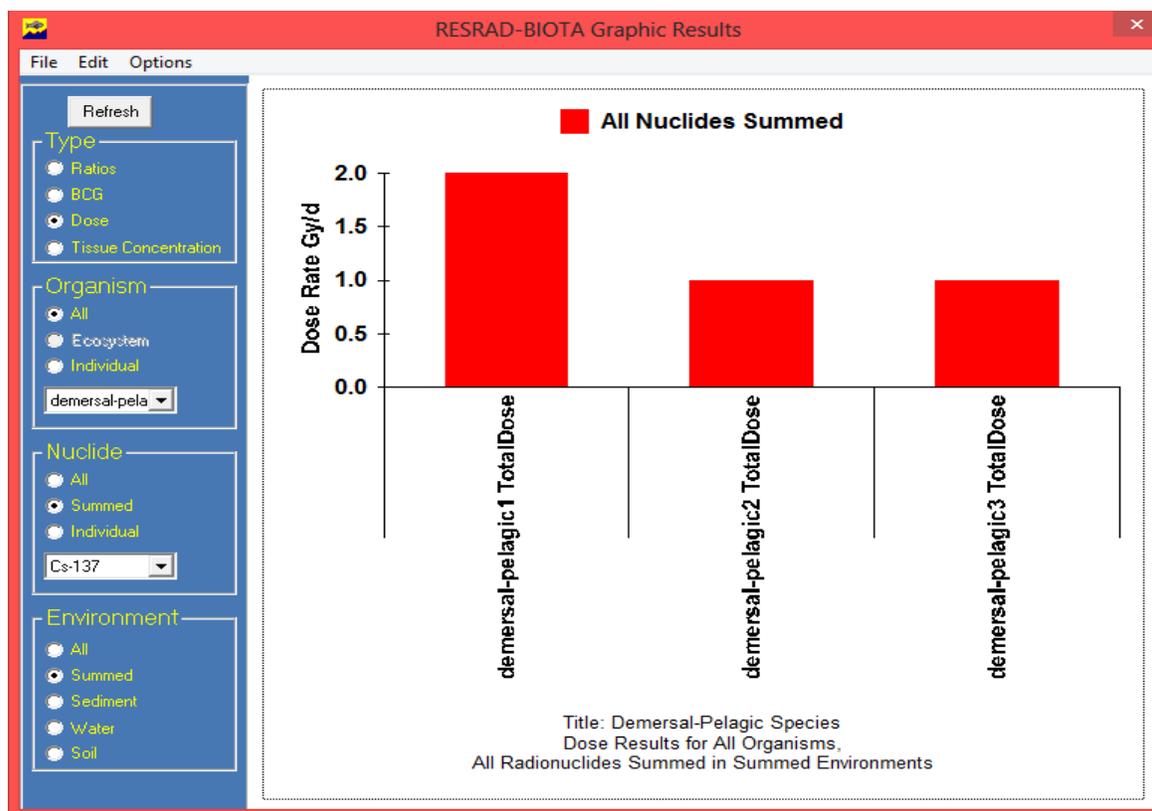
Γεωμετρία ψαριού (μήκος L (cm))	Cs-137 (Gy/d)	K-40 (Gy/d)	Ra-226 (Gy/d)	Ra-228 (Gy/d)	Th-228 (Gy/d)	U-238 (Gy/d)
2,5	1,59E-08	1,06E-06	5,09E-07	1,96E-07	3,58E-07	8,03E-08
10	1,53E-08	8,23E-07	4,71E-07	1,86E-07	3,30E-07	3,73E-08
45	1,40E-08	6,80E-07	4,27E-07	1,70E-07	3,00E-07	1,70E-08



Εικόνα 7.15: Γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μήκος για τα βενθοπελαγικά είδη ψαριών.



Εικόνα 7.16: Γράφημα του RESRAD-BIOTA με τα αποτελέσματα του ρυθμού εξωτερικής δόσης ανά επιλεγόμενη γεωμετρία οργανισμού για τα Βενθοπελαγικά Ψάρια.

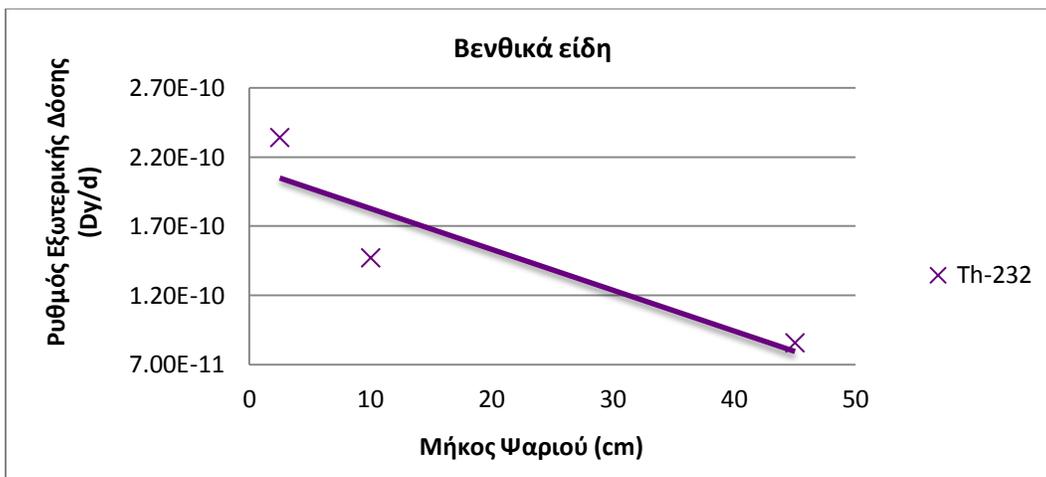
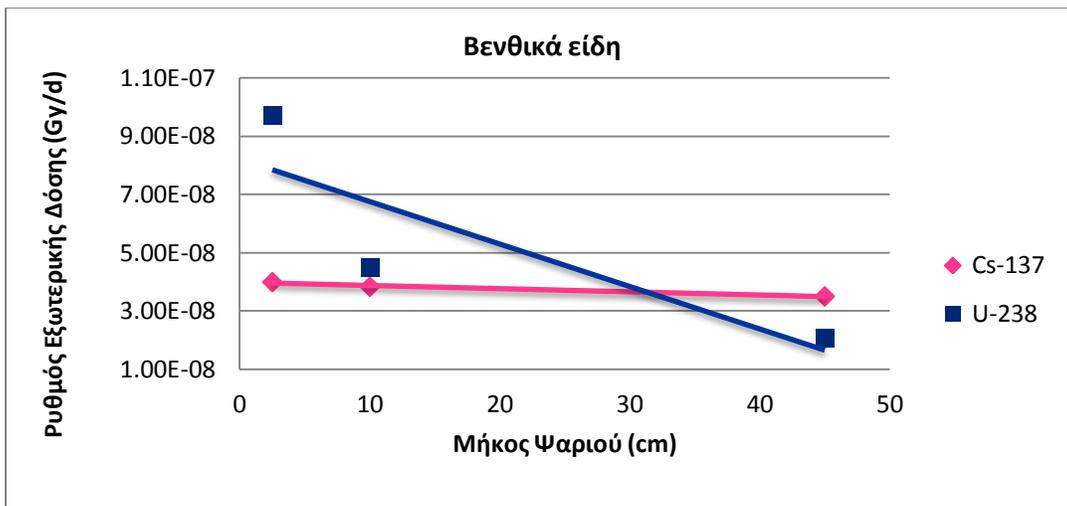
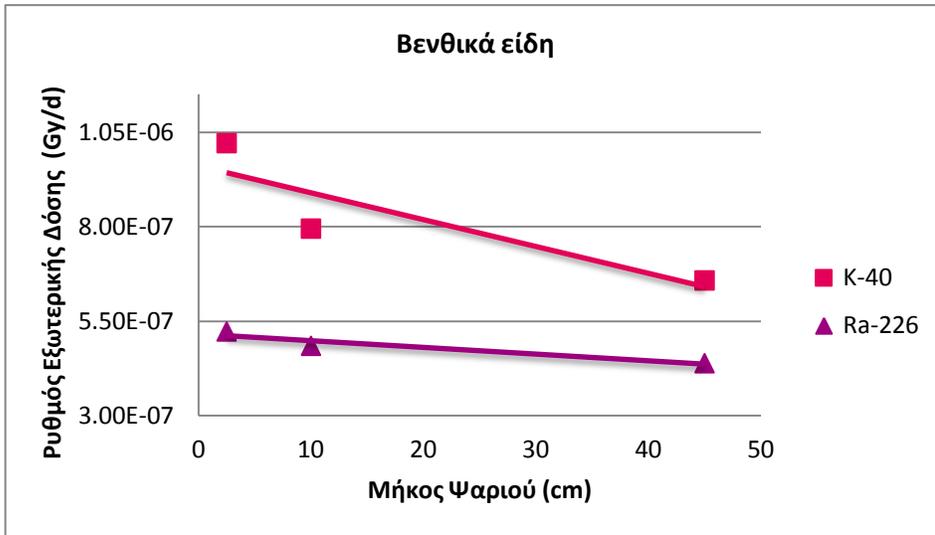


Εικόνα 7.17: Γράφημα του RESRAD-BIOTA με τα αποτελέσματα του ρυθμού της ολικής εξωτερικής δόσης ανά επιλεγόμενη γεωμετρία οργανισμού για τα Βενθοπελαγικά Ψάρια.

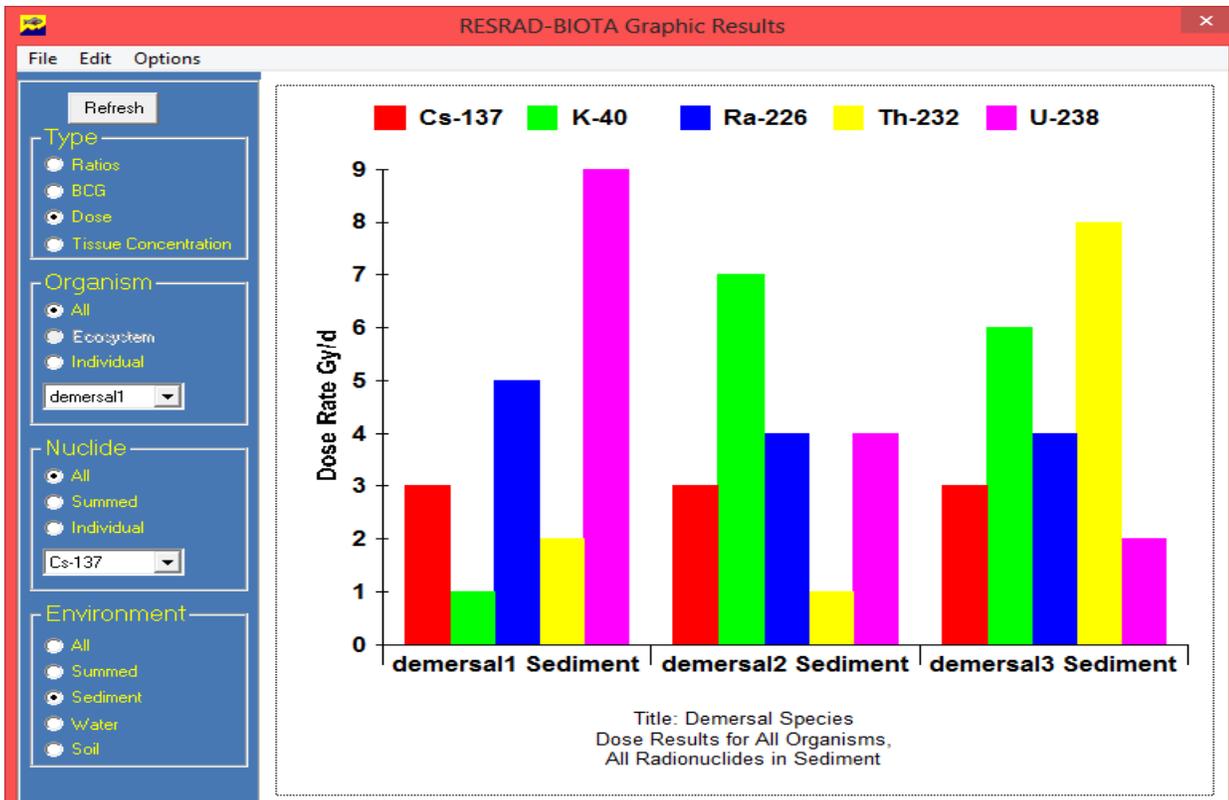
- **Βενθικά Είδη (Demersal Species)**

Πίνακας 7.15: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης σε φυσική και τεχνητή ιοντίζουσα ακτινοβολία για τα βενθικά είδη ψαριών, στην κλίματα μήκους, όπως προκύπτει από τον RESRAD-BIOTA (Gy/d).

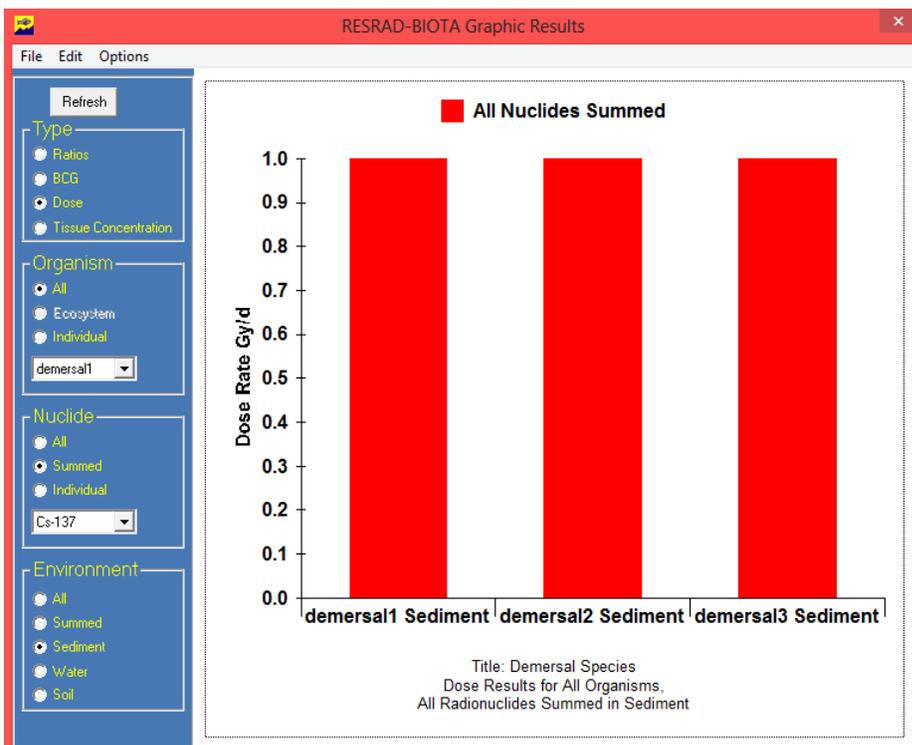
Γεωμετρία ψαριού (μήκος L (cm))	Cs-137 (Gy/d)	K-40 (Gy/d)	Ra-226 (Gy/d)	Th-232 (Gy/d)	U-238 (Gy/d)
2,5	3,99E-08	1,02E-06	5,22E-07	2,34E-10	9,70E-08
10	3,83E-08	7,94E-07	4,84E-07	1,47E-10	4,50E-08
45	3,50E-08	6,57E-07	4,38E-07	8,55E-11	2,05E-08



Εικόνα 7.18: Γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε σχέση με το μήκος για τα βενθικά είδη ψαριών.



Εικόνα 7.19: Γράφημα του RESRAD-BIOTA με τα αποτελέσματα του ρυθμού εξωτερικής δόσης ανά επιλεγόμενη γεωμετρία οργανισμού για τα Βενθικά Ψάρια.



Εικόνα 7.20: Γράφημα του RESRAD-BIOTA με τα αποτελέσματα του ρυθμού της ολικής εξωτερικής δόσης ανά επιλεγόμενη γεωμετρία οργανισμού για τα Βενθικά Ψάρια.

### 7.2.2. Υπολογισμός του μέγιστου και ελάχιστου ρυθμού εξωτερικής δόσης των μελετηθέντων θαλάσσιων οργανισμών μέσω του RESRAD-BIOTA.

Ο RESRAD-BIOTA δεν επιτρέπει στον χρήστη την εισαγωγή συγκεκριμένων τιμών που αφορούν στο μέγεθος του οργανισμού, παρά μόνο προσεγγιστικά μέσω κλίμακας (Πίνακας 7.5). Μέσω λοιπόν των εξισώσεων, ανά είδος διαβίωσης οργανισμού και ανά ραδιονουκλίδιο, που προέκυψαν από την γραμμική παλινδρόμηση που υλοποιήθηκε, υπολογίζονται οι ρυθμοί εξωτερικής δόσης για κάθε ψάρι, ανάλογα με το ενδιαίτημά του, και στο μέγεθος που προέκυψε από τη δειγματοληψία. Παρακάτω παρατίθενται πίνακες με τα μεγέθη (συγκεκριμένα το μήκος σε cm) των επιθυμητών ψαριών και στη συνέχεια ο ρυθμός εξωτερικής δόσης που προέκυψε στο συγκεκριμένο μήκος, για κάθε ραδιονουκλίδιο χωριστά. Τα μήκη που θα χρησιμοποιηθούν προέκυψαν από βιβλιοθήκη δεδομένων από δείγματα ψαριών από διάφορες περιοχές της θάλασσας του Αιγαίου [ERL web].

Πίνακας 7.16: Τα είδη των ψαριών του Αιγαίου που μελετώνται μαζί με τη διακύμανση του ολικού τους μήκους (ελάχιστο-μέγιστο) σε cm.

Ενδιαίτημα (Habitat)	Όνομα Είδους	Κοινό Ελληνικό Όνομα	Ολικό μήκος ( min.-max.) (cm)
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	Γόπα	11,4-15,7
	Spicara flexuosa	Μαρίδα	14-18
	Sardina pilchardus	Σαρδέλα	12,8-15,2
	Trachurus-trachurus	Σαφρίδι	23,7-25,5
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	Λυθρίνι	24-30
	Mullus barbatus	Κουτσομούρα	10,8-14,6
Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	Γλώσσα	13-16

✓ **Cs-137**

Πίνακας 7.17: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού για το <sup>137</sup>Cs (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	Όνομα Είδους	Ολικό μήκος (min.-max.) (cm)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	11,4-15,7	1,542 - 1,524 ( $\times 10^{-11}$ )
	Spicara flexuosa	14-18	1,531 - 1,514 ( $\times 10^{-11}$ )
	Sardina pilchardus	12,8-15,2	1,536 - 1,526 ( $\times 10^{-11}$ )
	Trachurus-trachurus	23,7-25,5	1,490 - 1,482 ( $\times 10^{-11}$ )
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	24-30	1,488 - 1,436 ( $\times 10^{-8}$ )
	Mullus barbatus	10,8-14,6	1,544 - 1,528 ( $\times 10^{-8}$ )
Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	13-16	3,838 - 3,806 ( $\times 10^{-8}$ )

✓ **K-40**

Πίνακας 7.18: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού για το <sup>40</sup>K (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	Όνομα Είδους	Ολικό μήκος (min.-max.) (cm)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	11,4-15,7	3,008 - 2,902 ( $\times 10^{-8}$ )
	Spicara flexuosa	14-18	2,944 - 2,845 ( $\times 10^{-8}$ )
	Sardina pilchardus	12,8-15,2	2,974 - 2,915 ( $\times 10^{-8}$ )
	Trachurus-trachurus	23,7-25,5	2,705 - 2,660 ( $\times 10^{-8}$ )
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	24-30	8,187 - 7,741 ( $\times 10^{-7}$ )
	Mullus barbatus	10,8-14,6	9,168 - 8,885 ( $\times 10^{-7}$ )
Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	13-16	8,677 - 8,464 ( $\times 10^{-7}$ )

✓ **Ra-226**

Πίνακας 7.19: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού για το  $^{226}\text{Ra}$  (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	Όνομα Είδους	Ολικό μήκος (min.-max.) (cm)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	11,4-15,7	2,479 - 2,441 ( $\times 10^{-11}$ )
	Spicara flexuosa	14-18	2,456 - 2,421 ( $\times 10^{-11}$ )
	Sardina pilchardus	12,8-15,2	2,467 - 2,445 ( $\times 10^{-11}$ )
	Trachurus-trachurus	23,7-25,5	2,370 - 2,354 ( $\times 10^{-11}$ )
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	24-30	4,607 - 4,504 ( $\times 10^{-7}$ )
	Mullus barbatus	10,8-14,6	4,834 - 4,769 ( $\times 10^{-7}$ )
Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	13-16	4,920 - 4,867 ( $\times 10^{-7}$ )

✓ **Ra-228**

Πίνακας 7.20: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού για το  $^{228}\text{Ra}$  (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	Όνομα Είδους	Ολικό μήκος (min.-max.) (cm)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	11,4-15,7	3,529 - 3,484 ( $\times 10^{-11}$ )
	Spicara flexuosa	14-18	3,502 - 3,459 ( $\times 10^{-11}$ )
	Sardina pilchardus	12,8-15,2	3,514 - 3,489 ( $\times 10^{-11}$ )
	Trachurus-trachurus	23,7-25,5	3,399 - 3,380 ( $\times 10^{-11}$ )
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	24-30	1,815 - 1,781 ( $\times 10^{-7}$ )
	Mullus barbatus	10,8-14,6	1,889 - 1,868 ( $\times 10^{-7}$ )
Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	13-16	-

✓ **Th-228**

Πίνακας 7.21: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού για το  $^{228}\text{Th}$  (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	Όνομα Είδους	Ολικό μήκος (min.-max.) (cm)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	11,4-15,7	0
	Spicara flexuosa	14-18	0
	Sardina pilchardus	12,8-15,2	0
	Trachurus-trachurus	23,7-25,5	0
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	24-30	3,230 - 3,157 ( $\times 10^{-7}$ )
	Mullus barbatus	10,8-14,6	3,389 - 3,343 ( $\times 10^{-7}$ )
Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	13-16	-

✓ **Th-232**

Πίνακας 7.22: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού για το  $^{232}\text{Th}$  (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	Όνομα Είδους	Ολικό μήκος (min.-max.) (cm)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	11,4-15,7	-
	Spicara flexuosa	14-18	-
	Sardina pilchardus	12,8-15,2	-
	Trachurus-trachurus	23,7-25,5	-
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	24-30	-
	Mullus barbatus	10,8-14,6	-
Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	13-16	1,737 - 1,648 ( $\times 10^{-10}$ )

(-) δεν υφίσταται μέτρηση για το συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο στο συγκεκριμένο μέσο

✓ **U-238**

Πίνακας 7.23: Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού για το  $^{238}\text{U}$  (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	Όνομα Είδους	Ολικό μήκος (min.-max.) (cm)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	11,4-15,7	8,623 - 7,801 ( $\times 10^{-11}$ )
	Spicara flexuosa	14-18	8,126 - 7,362 ( $\times 10^{-11}$ )
	Sardina pilchardus	12,8-15,2	8,355 - 7,897 ( $\times 10^{-11}$ )
	Trachurus-trachurus	23,7-25,5	6,273 - 5,930 ( $\times 10^{-11}$ )
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	24-30	3,896 - 3,170 ( $\times 10^{-8}$ )
	Mullus barbatus	10,8-14,6	5,493 - 5,033 ( $\times 10^{-8}$ )
Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	13-16	6,312 - 5,874 ( $\times 10^{-8}$ )

✓ **Ολική εξωτερική δόση ιοντίζουσας ακτινοβολίας**

Πίνακας 7.24: Ρυθμός ολικής δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	Όνομα Είδους	Ολικό μήκος (min.-max.) (cm)	Ρυθμός ολικής δόσης εξωτερικής έκθεσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο-μέγιστο μετρούμενο μήκος του οργανισμού (Gy/d)	Ποσοστιαία μείωση της μέγιστης τιμής του ρυθμού ολικής εξωτερικής δόσης κατ'αντιστοιχία με το ελάχιστο μήκος του ψαριού.
Πελαγικά (Pelagic)	Boops-boops	11,4-15,7	3,024 - 2,917 ( $\times 10^{-08}$ )	3,54%
	Spicara flexuosa	14-18	2,960 - 2,860 ( $\times 10^{-08}$ )	3,38%
	Sardina pilchardus	12,8-15,2	2,990 - 2,930 ( $\times 10^{-08}$ )	2,01%
	Trachurus-trachurus	23,7-25,5	2,719 - 2,673 ( $\times 10^{-08}$ )	1,69%
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	Pagellus erythrinus	24-30	1,838 - 1,764 ( $\times 10^{-06}$ )	4,03%
	Mullus barbatus	10,8-14,6	1,998 - 1,952 ( $\times 10^{-06}$ )	2,30%

Βενθικά (Demersal)	Arnoglossus laterna	13-16	1,461 - 1,430 ( $\times 10^{-06}$ )	2,12%
--------------------	------------------------	-------	-------------------------------------	-------

Από τα διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης όσο και από τα τελικά αποτελέσματα του ρυθμού εξωτερικής δόσης σε συνάρτηση με το μετρούμενο μήκος του ψαριού προκύπτει μία αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ των δύο παραμέτρων. Μάλιστα υπολογίστηκε για την ολική δόση πώς η μείωση της μέγιστης τιμής του ρυθμού εξωτερικής δόσης που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος ψαριού, κυμαίνεται κατά μέση τιμή στο 2,72% (Πίνακας 7.24). Για να είναι πιο εμφανής η παραπάνω διαπίστωση η παράθεση των αποτελεσμάτων έγινε με την διατήρηση τεσσάρων σημαντικών ψηφίων. Από την αντίστροφη σχέση που προέκυψε μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την λογική με την οποία ο RESRAD υπολογίζει τις εξωτερικές δόσεις. Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της εξωτερικής δόσης ιονίζουσας ακτινοβολίας βασίζεται στην υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής της σε όλο τον όγκο του οργανισμού που βρίσκεται βυθισμένος στο ραδιενεργό μέσο χωρίς να υπάρχουν διαφορές στην πυκνότητα. Με δεδομένο πως το μέσον είναι ομοιόμορφα ραδιενεργό, δηλαδή σε κάθε μονάδα μάζας του η ενεργότητα του ραδιονουκλιδίου είναι ίδια, τότε όσο μεγαλώνει ο όγκος του βυθιζόμενου οργανισμού τόσο θα μικραίνει η εξωτερική δόση που θα λαμβάνει από το μέσον εάν αυτό θεωρηθεί σημειακή ραδιενεργός πηγή.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με την μέση τιμή ελάχιστων-μέγιστων διακυμάνσεων ρυθμού εξωτερικής δόσης όπως και η μέση τιμή του ρυθμού εξωτερικής δόσης των ψαριών που ανήκουν στο ίδιο ενδιαίτημα.

**Πίνακας 7.25: Μέση τιμή ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης ανά ραδιονουκλίδιο και ενδιαίτημα (Gy/d)**

Ενδιαίτημα (Habitat)	<sup>137</sup> Cs (Gy/d)	<sup>40</sup> K (Gy/d)	<sup>226</sup> Ra (Gy/d)	<sup>228</sup> Ra (Gy/d)	<sup>228</sup> Th (Gy/d)	<sup>232</sup> Th (Gy/d)	<sup>238</sup> U (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	$1,5 \times 10^{-11}$	$2,9 \times 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-11}$	$3,5 \times 10^{-11}$	0	-	$7,5 \times 10^{-11}$
Επιβενθικά- Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	$1,5 \times 10^{-8}$	$8,5 \times 10^{-7}$	$4,7 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$3,3 \times 10^{-7}$	-	$4,4 \times 10^{-8}$
Βενθικά (Demersal)	$3,8 \times 10^{-8}$	$8,6 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-7}$	-	-	$1,7 \times 10^{-10}$	$6,1 \times 10^{-8}$

(-) δεν υφίσταται μέτρηση για το συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο στο συγκεκριμένο μέσο

### **7.3. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΡΥΘΜΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΟΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ RESRAD-BIOTA.**

---

Στις δύο μεθόδους που αναλύθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν κοινά ραδιολογικά στοιχεία στο ίδιο περιβάλλον διαβίωσης, για τους ίδιους οργανισμούς. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του ρυθμού εξωτερικής δόσης ξεχωριστά για κάθε ραδιονουκλίδιο μελέτης, αλλά και αθροιστικά για την ολική δόση, που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους θα υλοποιήσει τρεις βασικούς στόχους:

1. Να γίνουν διαπιστώσεις σχετικά με τις διαφοροποιήσεις που παρουσιάζει ο κώδικας σε σχέση με την κλασική μελέτη και πώς αυτές επιβαρύνουν τα τελικά αποτελέσματα.
2. Να ελεγχθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του κώδικα.
3. Να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά και κατανομή των ραδιονουκλιδίων στο Αιγαίο, αλλά και για την ραδιολογική επιβάρυνση που θα προκύψει από τις εξωτερικές δόσεις.

Ο υπολογισμός των εξωτερικών δόσεων με τη χρήση των εξισώσεων εξαρτάται εκτός από τα φυσικά χαρακτηριστικά της ιοντίζουσας ακτινοβολίας και από το περιβάλλον που ζει ο εκτεθειμένος οργανισμός από το οποίο θα λάβει και τη δόση. Αντίστοιχα κριτήρια χρησιμοποιούνται και για τον υπολογισμό των εξωτερικών δόσεων μέσω του RESRAD με την διαφορά πως σε αυτή την περίπτωση συνυπολογίζεται στην τελική δόση και ο όγκος του ψαριού. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων θα γίνει για κάθε ραδιονουκλίδιο αλλά και για την ολική δόση που προκύπτει από το συνολικό άθροισμα των εξωτερικών δόσεων των ραδιονουκλιδίων της μελέτης και για τις δύο μεθόδους.

Αρχικά παρατίθενται πίνακες με τα συνολικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους:

✓ **Μέθοδος εξισώσεων:**

**Πίνακας 7.26:** Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων τιμών ρυθμού εξωτερικής δόσης ανά ενδιαίτημα οργανισμού μέσω της μεθόδου των συμβατικών εξισώσεων (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	<sup>137</sup> Cs (Gy/d)	<sup>40</sup> K (Gy/d)	<sup>226</sup> Ra (Gy/d)	<sup>228</sup> Ra (Gy/d)	<sup>228</sup> Th (Gy/d)	<sup>232</sup> Th (Gy/d)	<sup>238</sup> U (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	2,1×10 <sup>-11</sup>	2,3×10 <sup>-8</sup>	3,5×10 <sup>-11</sup>	9,1×10 <sup>-11</sup>	1,9×10 <sup>-12</sup>	-	1,0×10 <sup>-11</sup>
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	1,7×10 <sup>-8</sup>	7,0×10 <sup>-7</sup>	4,5×10 <sup>-7</sup>	1,5×10 <sup>-7</sup>	3,2×10 <sup>-7</sup>	-	6,5×10 <sup>-9</sup>
Βενθικά (Demersal)	4,2×10 <sup>-8</sup>	6,8×10 <sup>-7</sup>	4,7×10 <sup>-7</sup>	-	-	7,0×10 <sup>-7</sup>	7,9×10 <sup>-9</sup>

(-) δεν υφίσταται μέτρηση για το συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο στο συγκεκριμένο μέσο

**Πίνακας 7.27:** Ρυθμός ολικής δόσης εξωτερικής έκθεσης ανά ενδιαίτημα οργανισμού με την μέθοδο των εξισώσεων (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	Ρυθμός ολικής δόσης εξωτερικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	2,3×10 <sup>-8</sup>
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	1,6×10 <sup>-6</sup>
Βενθικά (Demersal)	1,9×10 <sup>-6</sup>

✓ **Μέθοδος RESRAD-BIOTA:**

Πίνακας 7.28: Συγκεντρωτικός πίνακας μέσω των τιμών ρυθμού εξωτερικής δόσης ανά ενδιαίτημα οργανισμού με την μέθοδο του RESRAD-BIOTA (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	<sup>137</sup> Cs (Gy/d)	<sup>40</sup> K (Gy/d)	<sup>226</sup> Ra (Gy/d)	<sup>228</sup> Ra (Gy/d)	<sup>228</sup> Th (Gy/d)	<sup>232</sup> Th (Gy/d)	<sup>238</sup> U (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	1,5×10 <sup>-11</sup>	2,9×10 <sup>-8</sup>	2,4×10 <sup>-11</sup>	3,5×10 <sup>-11</sup>	0	-	7,5×10 <sup>-11</sup>
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	1,5×10 <sup>-8</sup>	8,5×10 <sup>-7</sup>	4,7×10 <sup>-7</sup>	1,8×10 <sup>-7</sup>	3,3×10 <sup>-7</sup>	-	4,4×10 <sup>-8</sup>
Βενθικά (Demersal)	3,8×10 <sup>-8</sup>	8,6×10 <sup>-7</sup>	4,9×10 <sup>-7</sup>	-	-	1,7×10 <sup>-10</sup>	6,1×10 <sup>-8</sup>

(-) δεν υφίσταται μέτρηση για το συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο στο συγκεκριμένο μέσο

Πίνακας 7.29: Ρυθμός ολικής δόσης εξωτερικής έκθεσης ανά ενδιαίτημα οργανισμού με την μέθοδο του RESRAD-BIOTA (Gy/d)

Ενδιαίτημα (Habitat)	Ρυθμός ολικής δόσης εξωτερικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία (Gy/d)
Πελαγικά (Pelagic)	2,9×10 <sup>-8</sup>
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	1,9×10 <sup>-6</sup>
Βενθικά (Demersal)	1,4×10 <sup>-6</sup>

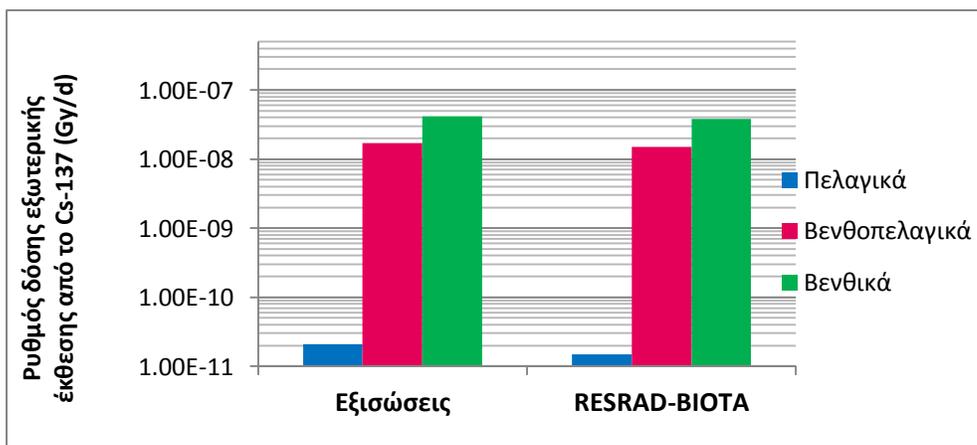
### 7.3.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων

Για να είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις διαφοροποιήσεις που παρουσιάζει ο υπολογισμός μέσω του κώδικα σε σχέση με τον υπολογισμό μέσω των συμβατικών εξισώσεων θα υπολογιστεί η διαφοροποίηση που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών του RESRAD-BIOTA σε σχέση με τα αποτελέσματα της συμβατικής μεθόδου υπολογισμού, μέσω των λόγων των αποτελεσμάτων του ρυθμού εξωτερικής έκθεσης: Μέθοδος RESRAD-BIOTA/Μέθοδος εξισώσεων (ratios). Η διαδικασία θα υλοποιηθεί τόσο για το αποτέλεσμα που προέκυψε για κάθε ραδιονουκλίδιο ανά ενδιαίτημα όσο και για το αποτέλεσμα της ολικής δόσης ανά ενδιαίτημα .

#### ✓ Cs-137

Πίνακας 7.30: Λόγος των τιμών υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικής δόσης μέσω του RESRAD-BIOTA σε σχέση με αυτές των συμβατικών εξισώσεων για το Cs-137.

Ενδιαίτημα (Habitat)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω εξισώσεων για το Cs-137 (Gy/d)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω RESRAD-BIOTA για το Cs-137 (Gy/d)	Ratios RESRAD-BIOTA/Εξισώσεις
Πελαγικά (Pelagic)	$2,1 \times 10^{-11}$	$1,5 \times 10^{-11}$	0,71
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	$1,7 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	0,88
Βενθικά (Demersal)	$4,2 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-8}$	0,90

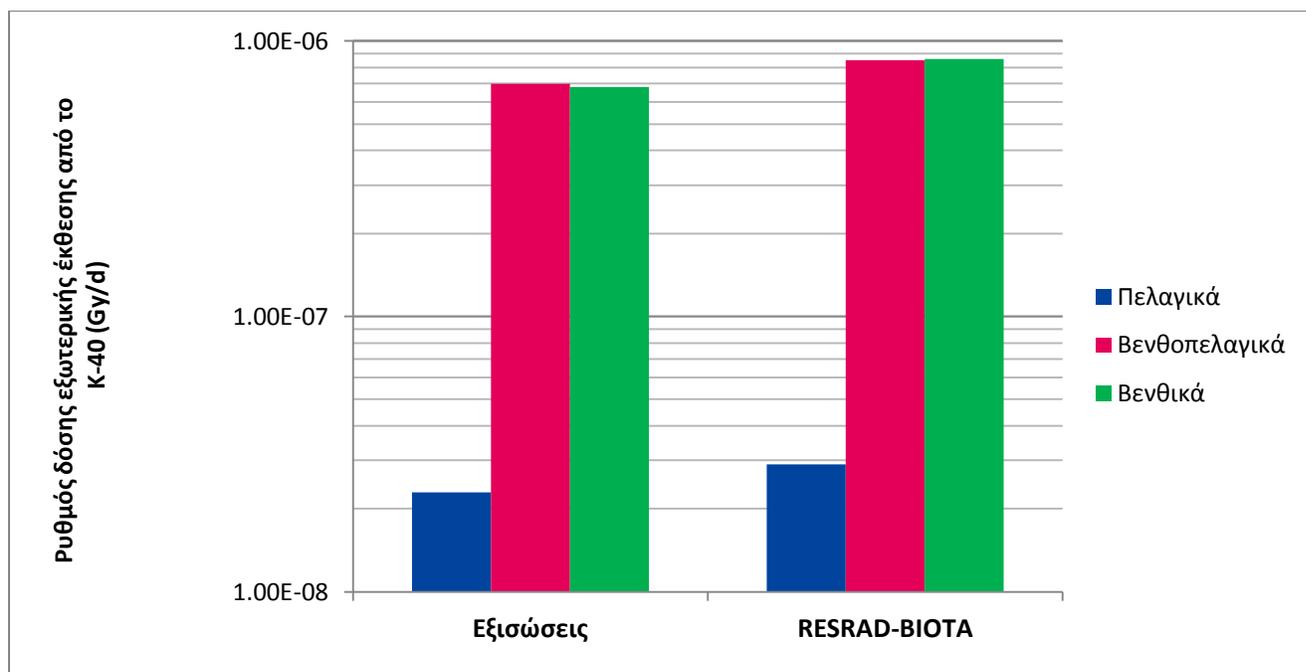


Εικόνα 7.21: Συγκριτικό γράφημα των αποτελεσμάτων του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης από το Cs-137 με τις δύο μεθόδους σε λογαριθμική κλίμακα.

✓ K-40

Πίνακας 7.31: Λόγος των τιμών υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικής δόσης μέσω του RESRAD-BIOTA σε σχέση με αυτές των συμβατικών εξισώσεων για το K-40.

Ενδιαίτημα (Habitat)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω εξισώσεων για το K-40 (Gy/d)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω RESRAD-BIOTA για το K-40 (Gy/d)	Ratios RESRAD-BIOTA/Εξισώσεις
Πελαγικά (Pelagic)	$2,3 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$	1,26
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	$7,0 \times 10^{-7}$	$8,5 \times 10^{-7}$	1,21
Βενθικά (Demersal)	$6,8 \times 10^{-7}$	$8,6 \times 10^{-7}$	1,26

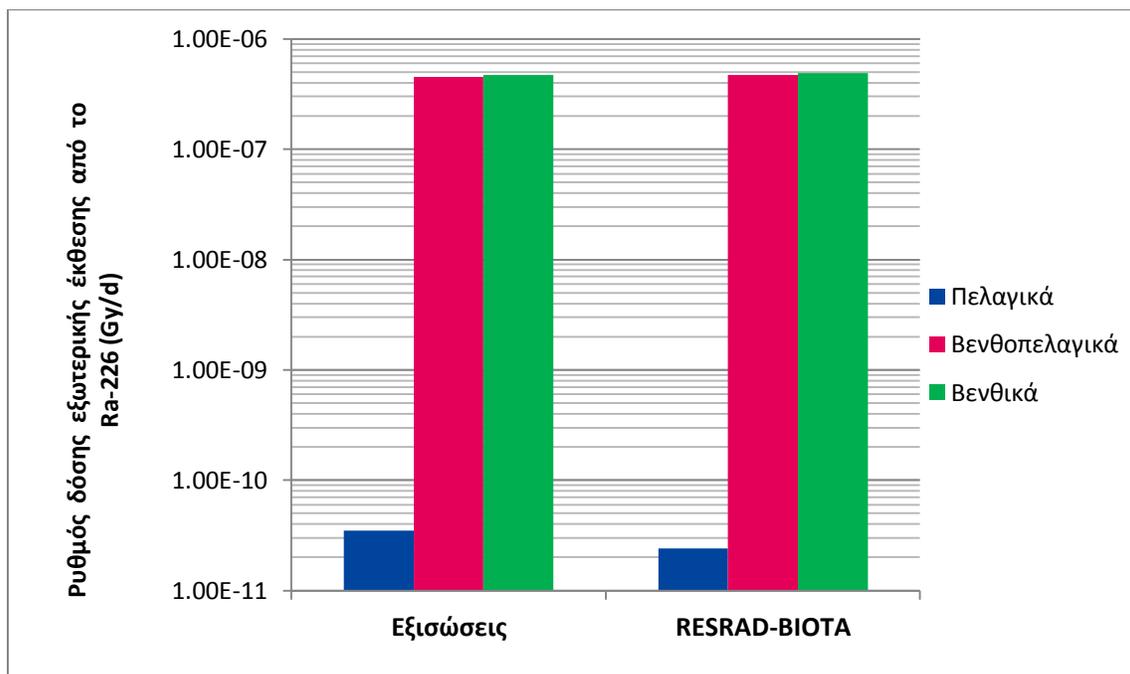


Εικόνα 7.22: Συγκριτικό γράφημα των αποτελεσμάτων του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης από το K-40 με τις δύο μεθόδους σε λογαριθμική κλίμακα.

✓ Ra-226

Πίνακας 7.32: Λόγος των τιμών υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικής δόσης μέσω του RESRAD-BIOTA σε σχέση με αυτές των συμβατικών εξισώσεων για το Ra-226.

Ενδιαίτημα (Habitat)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω εξισώσεων για το Ra-226 (Gy/d)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω RESRAD-BIOTA για το Ra-226 (Gy/d)	Ratios RESRAD-BIOTA/Εξισώσεις
Πελαγικά (Pelagic)	$3,5 \times 10^{-11}$	$2,4 \times 10^{-11}$	0,69
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	$4,5 \times 10^{-7}$	$4,7 \times 10^{-7}$	1,04
Βενθικά (Demersal)	$4,7 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-7}$	1,04

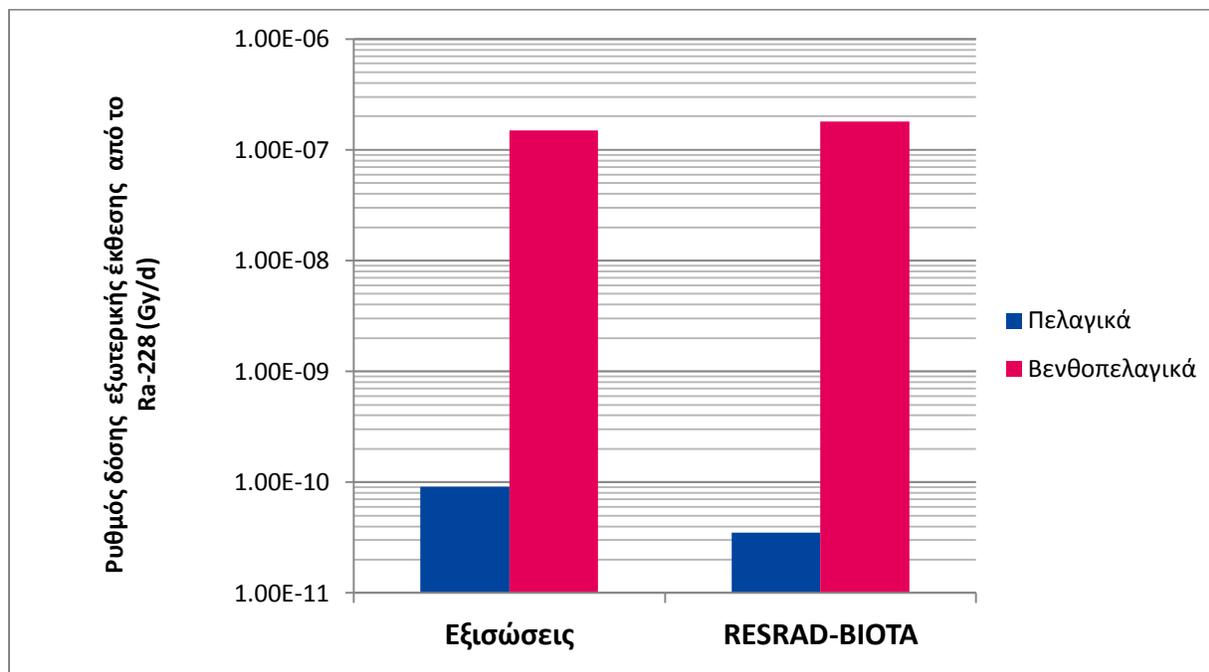


Εικόνα 7.23: Συγκριτικό γράφημα των αποτελεσμάτων του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης από το Ra-226 με τις δύο μεθόδους σε λογαριθμική κλίμακα.

✓ Ra-228

Πίνακας 7.33: Λόγος των τιμών υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικής δόσης μέσω του RESRAD-BIOTA σε σχέση με αυτές των συμβατικών εξισώσεων για το Ra-228.

Ενδιαίτημα (Habitat)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω εξισώσεων για το Ra-228 (Gy/d)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω RESRAD-BIOTA για το Ra-228 (Gy/d)	Ratios RESRAD-BIOTA/Εξισώσεις
Πελαγικά (Pelagic)	$9,1 \times 10^{-11}$	$3,5 \times 10^{-11}$	0,38
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	1,20

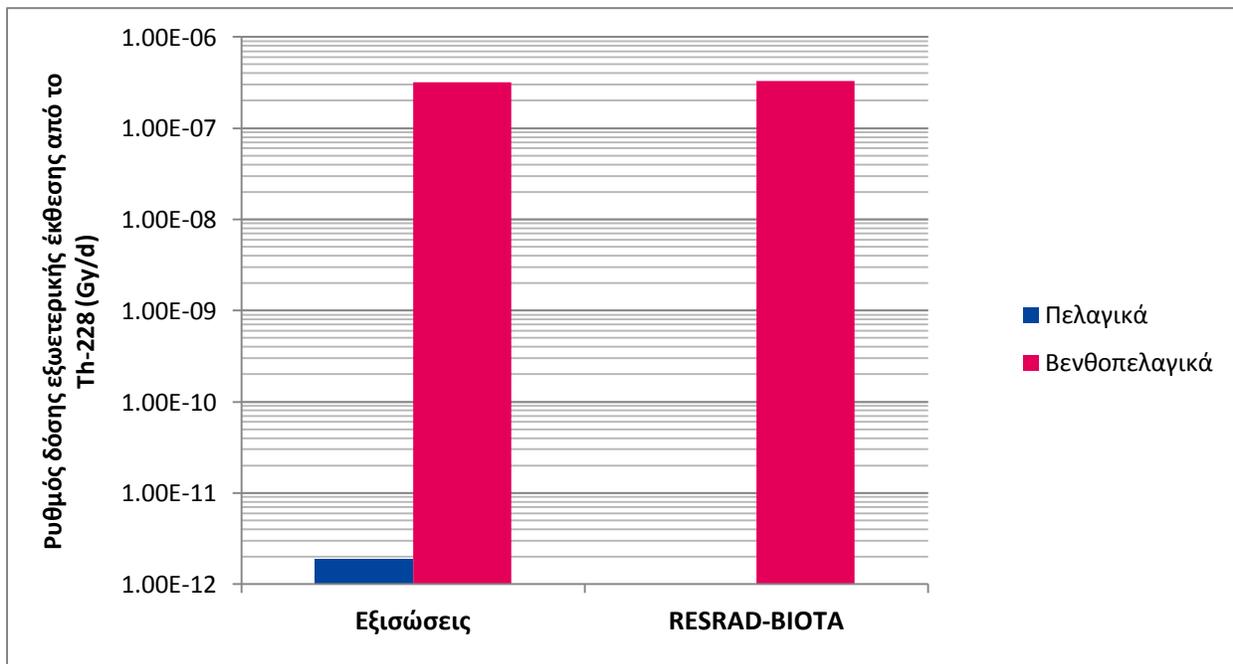


Εικόνα 7.24: Συγκριτικό γράφημα των αποτελεσμάτων του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης από το Ra-228 με τις δύο μεθόδους σε λογαριθμική κλίμακα.

✓ Th-228

Πίνακας 7.34: Λόγος των τιμών υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικής δόσης μέσω του RESRAD-BIOTA σε σχέση με αυτές των συμβατικών εξισώσεων για το Th-228.

Ενδιαιτήμα (Habitat)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω εξισώσεων για το Th-228 (Gy/d)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω RESRAD-BIOTA για το Th-228 (Gy/d)	Ratios RESRAD-BIOTA/Εξισώσεις
Πελαγικά (Pelagic)	$1,9 \times 10^{-12}$	0	0
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	$3,2 \times 10^{-7}$	$3,3 \times 10^{-7}$	1,03

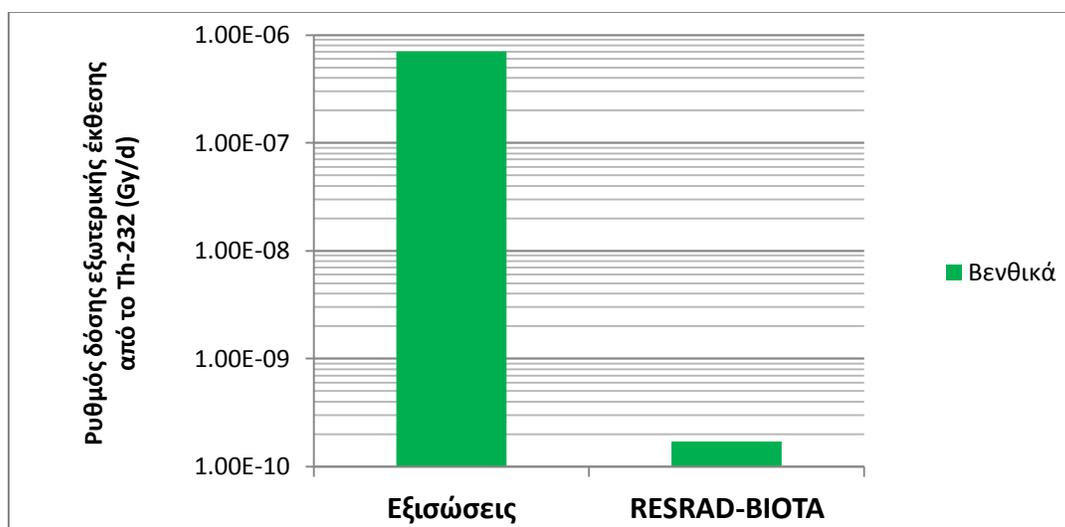


Εικόνα 7.25: Συγκριτικό γράφημα των αποτελεσμάτων του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης από το Th-228 με τις δύο μεθόδους σε λογαριθμική κλίμακα.

✓ Th-232

Πίνακας 7.35: Λόγος των τιμών υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικής δόσης μέσω του RESRAD-BIOTA σε σχέση με αυτές των συμβατικών εξισώσεων για το Th-232.

Ενδιαίτημα (Habitat)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω εξισώσεων για το Th-232 (Gy/d)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω RESRAD-BIOTA για το Th-232 (Gy/d)
Βενθικά (Demersal)	$7,0 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-10}$



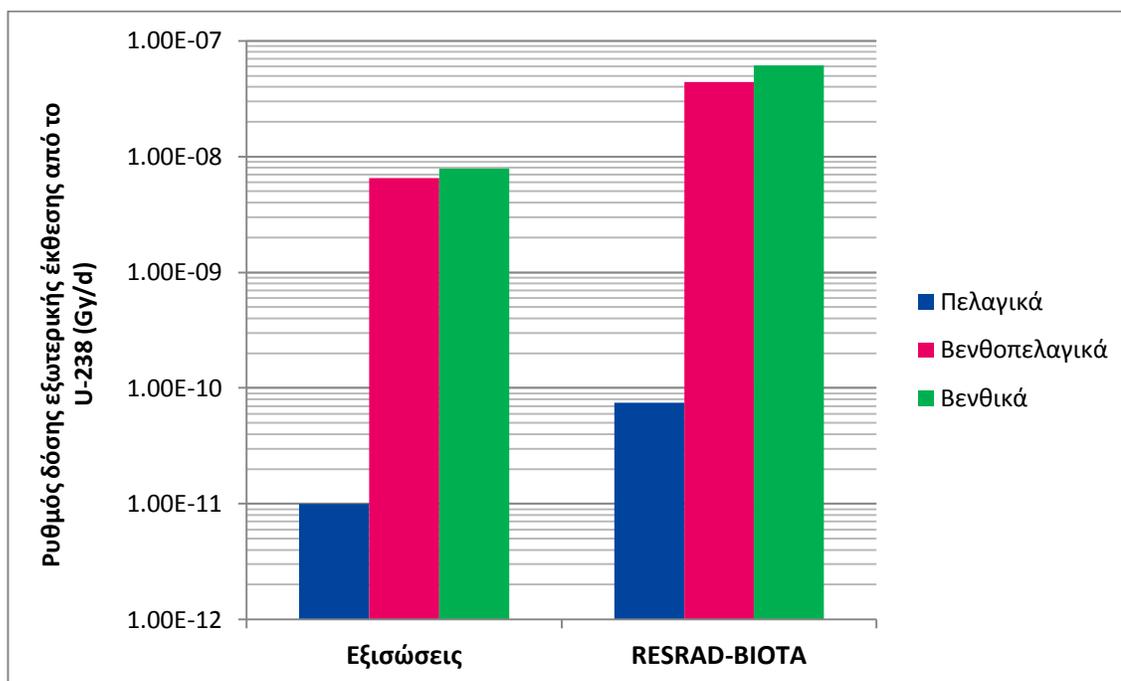
Εικόνα 7.26: Γράφημα των αποτελεσμάτων του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης από το Th-232 με τις δύο μεθόδους σε λογαριθμική κλίμακα.

Στην περίπτωση του μητρικού του Th-232, στην μέθοδο των εξισώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ενέργειες εκπομπής-γ όλων των θυγατρικών του (Πίνακας 6.9) όπου σε συνδυασμό με τις μετρημένες συγκεντρώσεις του στο ίζημα (οι οποίες λόγω ισορροπίας υπολογίστηκαν από τις συγκεντρώσεις των θυγατρικών του Ra-228&Th-228) υπολογίστηκε ο ρυθμός εξωτερικής δόσης. Σε αντιδιαστολή με την μέθοδο των εξισώσεων, ο RESRAD-BIOTA στις προκαθορισμένες ενέργειες για το Th-232 δίνει μόνο τις ενέργειες εκπομπής-β του μητρικού, ενώ τα θυγατρικά του τα παίρνει χωριστά (Πίνακες 5.1, 5.2). Συνεπώς στην περίπτωση του Th-232 δεν γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των εξωτερικών δόσεων που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους παρά απλή παράθεση των τιμών και επισήμανση του προβλήματος που διαπιστώθηκε.

✓ U-238

Πίνακας 7.36: Λόγος των τιμών υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικής δόσης μέσω του RESRAD-BIOTA σε σχέση με αυτές των συμβατικών εξισώσεων για το U-238.

Ενδιαίτημα (Habitat)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω εξισώσεων για το U-238 (Gy/d)	Ρυθμός δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω RESRAD-BIOTA για το U-238 (Gy/d)	Ratios RESRAD-BIOTA/Εξισώσεις
Πελαγικά (Pelagic)	$1,0 \times 10^{-11}$	$7,5 \times 10^{-11}$	7,50
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	$6,5 \times 10^{-9}$	$4,4 \times 10^{-8}$	6,77
Βενθικά (Demersal)	$7,9 \times 10^{-9}$	$6,1 \times 10^{-8}$	7,72

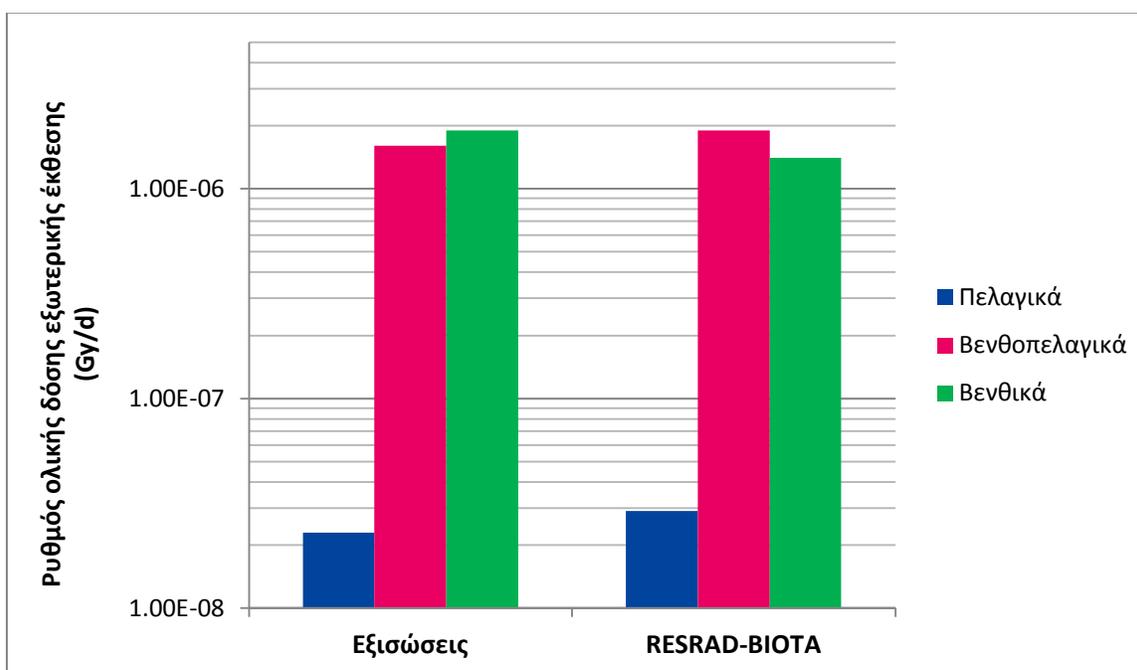


Εικόνα 7.27: Συγκριτικό γράφημα των αποτελεσμάτων του ρυθμού δόσης εξωτερικής έκθεσης από το U-238 με τις δύο μεθόδους σε λογαριθμική κλίμακα.

✓ <sup>8</sup>Ολική δόση

Πίνακας 7.37: Λόγος των τιμών υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικής δόσης μέσω του RESRAD-BIOTA σε σχέση με αυτές των συμβατικών εξισώσεων για την ολική δόση ιονίζουσας ακτινοβολίας.

Ενδιαίτημα (Habitat)	Ρυθμός ολικής δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω των εξισώσεων (Gy/d)	Ρυθμός ολικής δόσης εξωτερικής έκθεσης μέσω του RESRAD-BIOTA (Gy/d)	Ratios RESRAD-BIOTA/Εξισώσεις
Πελαγικά (Pelagic)	$2,3 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$	1,26
Επιβενθικά-Πελαγικά (Demersal-Pelagic)	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-6}$	1,19
Βενθικά (Demersal)	$1,9 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$	0,74



Εικόνα 7.28: Συγκριτικό γράφημα των αποτελεσμάτων του ρυθμού ολικής δόσης εξωτερικής έκθεσης με τις δύο μεθόδους σε λογαριθμική κλίμακα.

<sup>8</sup> Ως ολική δόση εξωτερικής έκθεσης στην παρούσα εργασία θεωρείται το άθροισμα των επιμέρους εξωτερικών δόσεων του εκάστοτε ραδιονουκλιδίου που μελετάται, ανά ενδιαίτημα οργανισμού.

### 7.3.2. Εκτίμηση της ραδιολογικής επιβάρυνσης του θαλάσσιου οικοσυστήματος με βάση την κλίμακα Polikarpon.

Ανάλογα με τον ρυθμό εξωτερικής δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας που δέχεται ένας οργανισμός ενός οικοσυστήματος από έναν ραδιενεργό ρυπαντή ή στρεσογόνο παράγοντα, έχουν θεσπιστεί κάποιες ζώνες «βιο-αντίδρασης» οι οποίες καταγράφουν τα όρια της ραδιολογικής επιβάρυνσης του οικοσυστήματος μελέτης. Οι ζώνες αυτές παρουσιάζονται παρακάτω, σε αύξουσα κλίμακα [Polikarpon.98]:

- ✓ Αβεβαιότητα ραδιολογικής εκτίμησης :

$$<0.00001-0.00004 \text{ Gy/y} = 2.74 \times 10^{-8} - 1.10 \times 10^{-7} \text{ Gy/d}$$

- ✓ Φυσικό υπόβαθρο-Ικανοποιητική διαβίωση:

$$0.00004-0.005 \text{ Gy/y} = 1.10 \times 10^{-7} - 1.37 \times 10^{-5} \text{ Gy/d}$$

- ✓ Φυσιολογική κάλυψη σε επίπεδο οργανισμού:

$$0.005-0.05 \text{ Gy/y} = 1.37 \times 10^{-5} - 1.37 \times 10^{-4} \text{ Gy/d}$$

- ✓ Κάλυψη σε επίπεδο οικοσυστήματος:

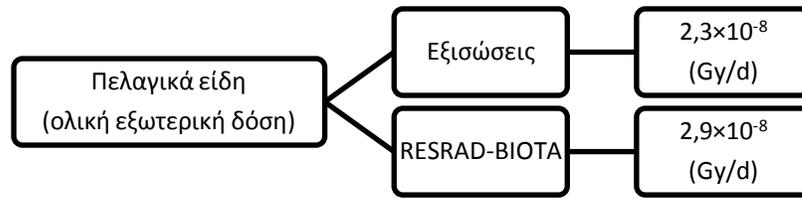
$$0.05-4 \text{ Gy/y} = 1.37 \times 10^{-4} - 1.10 \times 10^{-2} \text{ Gy/d}$$

- ✓ Φανερή αντίδραση σε οικοσύστημα:

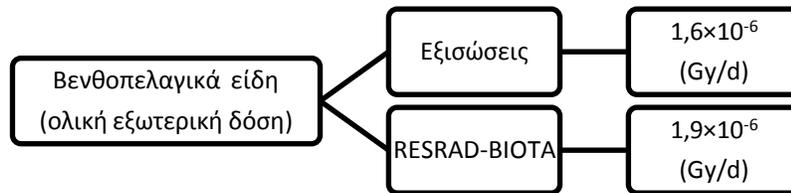
$$4- >3000 \text{ Gy/y} = 1.10 \times 10^{-2} - 8.21 \text{ Gy/d}$$

#### 7.3.2.1. Εκτίμηση ολικής εξωτερικής δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

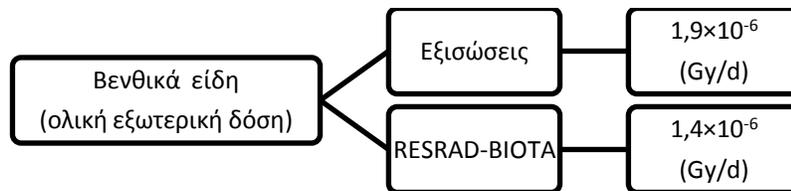
Η ραδιο-οικολογική εκτίμηση των υπολογισμένων εξωτερικών δόσεων που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους θα γίνει μέσω της ολικής δόσης που έλαβε αθροιστικά ο οργανισμός από τα ραδιονουκλίδια που μελετήθηκαν.



Οι τιμές του ρυθμού ολικής εξωτερικής δόσης από τα ραδιονουκλίδια (φυσικά και τεχνητά) της συγκεκριμένης μελέτης, που λαμβάνει ένας οργανισμός από το θαλασσινό νερό στο οικοσύστημα της θάλασσας του Αιγαίου υπολογίστηκε στη ζώνη ραδιολογικής αβεβαιότητας και από τις δύο μεθόδους.



Οι τιμές του ρυθμού ολικής εξωτερικής δόσης από τα ραδιονουκλίδια (φυσικά και τεχνητά) της συγκεκριμένης μελέτης, που λαμβάνει ένας οργανισμός από την διεπιφάνεια θαλασσινού νερού-ιζήματος στο οικοσύστημα της θάλασσας του Αιγαίου υπολογίστηκε στη ζώνη φυσικού υποβάθρου. Μάλιστα η ακτινοβολία που δέχονται τα επιβενθικά-πελαγικά είδη από το νερό είναι σχεδόν μη υπολογίσιμη σε σχέση με αυτή που δέχονται από το ίζημα. Η δόση μάλιστα αυξάνεται με την αύξηση του βάθους στο ίζημα όπου ζει ο οργανισμός.

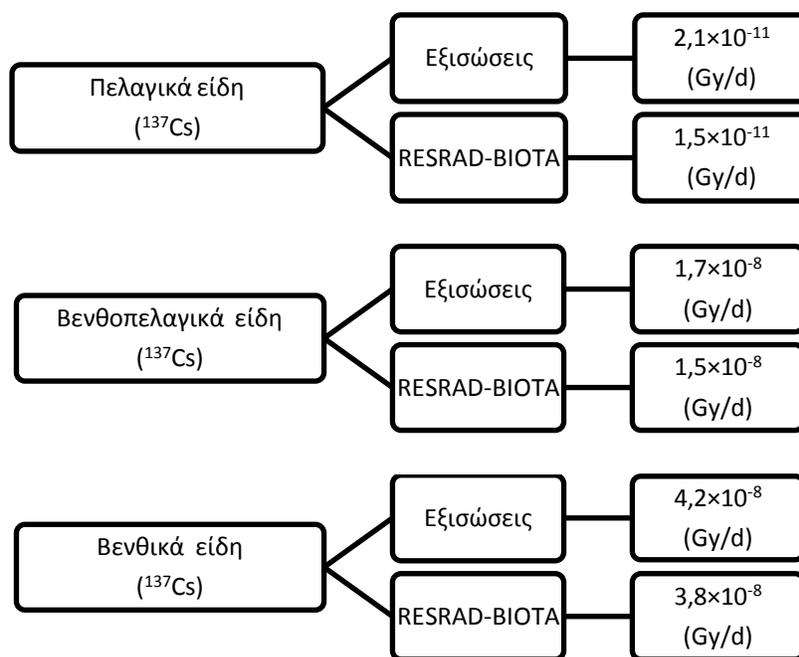


Οι τιμές του ρυθμού ολικής εξωτερικής δόσης από τα ραδιονουκλίδια (φυσικά και τεχνητά) της συγκεκριμένης μελέτης, που λαμβάνει ένας οργανισμός από το θαλασσινό ίζημα στο οικοσύστημα της θάλασσας του Αιγαίου υπολογίστηκε στη ζώνη φυσικού υποβάθρου. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενα αυξημένο σε σχέση με των

πελαγικών αφού τα βενθικά δέχονται αποκλειστικά την ακτινοβολία του ιζήματος που είναι σημαντικός δείκτης ραδιολογικής ρύπανσης, γεγονός που ισχύει και στην περίπτωση των βενθοπελαγικών ειδών.

### 7.3.2.2. Εκτίμηση εξωτερικής δόσης από το $^{137}\text{Cs}$ .

Σημαντικός παράγοντας για την επιβίωση ενός οικοσυστήματος είναι η ραδιολογική επιβάρυνση που δέχεται από τα τεχνητής προέλευσης ραδιονουκλίδια, όπου στη συγκεκριμένη μελέτη είναι το Cs-137.



Παρατηρείται πως και με τις δύο μεθόδους, και στα τρία είδη θαλάσσιων οργανισμών, η επιβάρυνση της εξωτερικής δόσης από το Cs-137 στο θαλάσσιο οικοσύστημα του Αιγαίου κυμαίνεται στα πολύ χαμηλά επίπεδα της αβεβαιότητας ραδιολογικής εκτίμησης, αποτέλεσμα ιδιαίτερα σημαντικό λόγω της υψηλής επικινδυνότητας του ραδιονουκλιδίου. Μάλιστα στα πελαγικά είδη το αποτέλεσμα είναι κάποιες τάξεις μεγέθους χαμηλότερο από αυτό της κλίμακας της αβεβαιότητας.

#### 7.4. ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

---

1. Από τις εξωτερικές δόσεις που υπολογίζονται και από τις δύο μεθόδους παρατηρείται πως οι υψηλότερες τιμές προέρχονται από την ακτινοβολία του θαλάσσιου ιζήματος, γεγονός που επιβεβαιώνει την θεώρησή του ως σημαντικό δείκτη ραδιολογικής ρύπανσης. Συνεπώς τα βενθικά ψάρια που ζουν αποκλειστικά στο ίζημα δέχονται και την υψηλότερη δόση από εξωτερική έκθεση. Οι επιβενθικοί οργανισμοί, που ζουν στην διεπιφάνεια θαλασσινού νερού-ιζήματος δέχονται κατ'αντιστοιχία την υψηλότερη δόση από το ίζημα, ενώ η επίδραση του θαλασσινού νερού στην δόση είναι σχεδόν αμελητέα. Οι μικρότερες δόσεις εξωτερικής έκθεσης υπολογίστηκαν στα πελαγικά ψάρια, που ζουν αποκλειστικά στο θαλασσινό νερό και δέχονται την μικρότερη ραδιολογική επιβάρυνση σε σχέση με τα άλλα δύο είδη (Πίνακες 7.26, 7.27, 7.28, 7.29).

2. Στον υπολογισμό της εξωτερικής δόσης από τον κώδικα RESRAD-BIOTA αποδεικνύεται μία αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ του μήκους του εκτεθιμένου οργανισμού και του τελικού ρυθμού εξωτερικής δόσης (Κεφ. 7.2.1.). Μάλιστα υπολογίστηκε για την ολική δόση πως η μείωση της μέγιστης τιμής του ρυθμού της εξωτερικής δόσης που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος του οργανισμού κυμαίνεται κατά μέση τιμή στο 2,72%. (Πίνακας 7.24).

Η παραπάνω απόδειξη οδηγεί σε συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικών δόσεων από τον κώδικα.. Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της εξωτερικής δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας βασίζεται στην υπόθεση της σημειακής πηγής εκπομπής και της ομοιόμορφης κατανομής της δόσης σε όλο τον όγκο του οργανισμού που βρίσκεται βυθισμένος στο ραδιενεργό μέσο χωρίς να υπάρχουν διαφορές στην πυκνότητα. Με δεδομένο πως το μέσον είναι ομοιόμορφα ραδιενεργό, δηλαδή σε κάθε μονάδα μάζας του η ενεργότητα του ραδιονουκλιδίου είναι ίδια, τότε όσο μεγαλώνει ο όγκος του βυθιζόμενου οργανισμού τόσο θα μικραίνει η εξωτερική δόση που θα λαμβάνει από το μέσον εάν αυτό θεωρηθεί σημειακή ραδιενεργός πηγή.

3. Από τα συγκριτικά κλάσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων προκύπτουν διαφοροποιήσεις στο ρυθμό των εξωτερικών δόσεων ανά ραδιονουκλίδιο. Σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε στο U-238 η οποία αγγίζει τη μία τάξη μεγέθους στους επιβενθικούς και βενθικούς οργανισμούς (Πίνακας 7.36). Στην περίπτωση της ολικής δόσης, που είναι το άθροισμα των δόσεων όλων των ραδιονουκλιδίων μελέτης προκύπτει πως οι διαφορές των δύο μεθόδων είναι σχετικά μικρές, αποτέλεσμα που πιστοποιεί την αξιοπιστία των μετρήσεων του κώδικα (Πίνακας 7.37).
4. Από την μελέτη ελέγχου ραδιολογικής επιβάρυνσης των αποτελεσμάτων με βάση την κλίμακα Polikarpon, προέκυψε για τις εξωτερικές μόνο δόσεις των φυσικών ραδιονουκλιδίων και των δύο μεθόδων, πως τα θαλάσσια οικοσυστήματα του Αιγαίου βρίσκονται στην ζώνη της αβεβαιότητας ραδιολογικής εκτίμησης για τα πελαγικά είδη ψαριών, ενώ για τα επιβενθικά και βενθικά είδη στην ζώνη του φυσικού υποβάθρου-ικανοποιητικής διαβίωσης (Κεφ. 7.3.2.1).
5. Τα αποτελέσματα του ρυθμού εξωτερικής δόσης που προέκυψαν και από τις δύο μεθόδους για το τεχνητό  $^{137}\text{Cs}$  κυμαίνονται σε επίπεδα χαμηλότερα της αβεβαιότητας ραδιολογικής εκτίμησης με βάση την κλίμακα Polikarpon (Κεφ. 7.3.2.2). Μάλιστα η συνεισφορά του στην ολική δόση σύμφωνα με τα αποτελέσματα του RESRAD-BIOTA είναι: α) για τα βενθικά ψάρια 2,6% κατά μέσο όρο, β) για τα επιβενθικά-πελαγικά ψάρια 0,8% κατά μέσο όρο και γ) για τα πελαγικά ψάρια 0.05% κατά μέσο όρο.
6. Η διαφοροποίηση στα αποτελέσματα υπολογισμού του ρυθμού εξωτερικών δόσεων με τις δύο μεθόδους οφείλεται κυρίως στα ακόλουθα:
  - Την διαφορά των ενεργειών εκπομπής που χρησιμοποιεί η κάθε μέθοδος. Ο RESRAD-BIOTA συμπεριλαμβάνει στον υπολογισμό και τις ενέργειες που προκύπτουν από την εκπομπή των σωματιδίων β ενώ στις συμβατικές εξισώσεις υπολογίζονται μόνο οι ενέργειες εκπομπής-γ (Πίνακας Παρ.1, Πίνακας Παρ.2).

- Στο ενδιαίτημα των βενθικών ψαριών στο Th-232 (Πίνακας 7.35) παρουσιάζεται διαφορά έως και τρεις τάξεις μεγέθους στον υπολογισμό του ρυθμού εξωτερικής δόσης με τις δύο μεθόδους. Αυτό οφείλεται στο ότι ο κώδικας χρησιμοποιεί μόνο τις ενέργειες εκπομπής-β του Th-232 χωρίς να συνυπολογίζει και την συνεισφορά των θυγατρικών του τα οποία και καταγράφονται ξεχωριστά.

7. Ο κώδικας RESRAD-BIOTA αποτελεί ένα δοσιμετρικό μοντέλο το οποίο προσφέρει σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Παρότι τα αποτελέσματα που εξάγει είναι αρκετά συντηρητικά, η ταχύτητα των υπολογισμών του είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς προσφέρει μία αρχική εκτίμηση ειδικά όταν υπάρχει κάποιο συμβάν. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στον ερευνητή να έχει μία αρχική αν και υπερεκτιμημένη αντίληψη της ραδιολογικής επιβάρυνσης-καταστροφής, ώστε να λάβει τα απαραίτητα μέτρα προστασίας και αντιμετώπισης. Συνεπώς ο RESRAD-BIOTA είναι ένα σημαντικό χρηστικό συμπληρωματικό εργαλείο σε περιπτώσεις ραδιολογικών συμβάντων και πρόληψης, χωρίς όμως να αντικαθιστά την συμβατική μέθοδο, η οποία παρέχει περισσότερες δυνατότητες παρέμβασης ειδικά στην περίπτωση της διεπιφάνειας νερού-ιζήματος.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄**

### **ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ**

---

Η σύγχρονη επιστήμη της ραδιοικολογίας έχει συμβάλει σε καθοριστικό βαθμό στη μετάβαση από την ανθρωποκεντρική προσέγγιση της δοσιμετρίας από ιοντίζουσες ακτινοβολίες στην οικο-κεντρική προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα ο άνθρωπος έχει φύγει από το επίκεντρο του ενδιαφέροντος και των μελετών σχετικά με τις επιπτώσεις των δόσεων ιοντίζουσας ακτινοβολίας και τοποθετείται σαν μέλος ενός ευρύτερου οικοσυστήματος. Η ραδιολογική επιβάρυνση κάθε μέλους του οικοσυστήματος αυτού, από τον πιο μικρό οργανισμό (φυτικό ή ζωικό) μέχρι τον πιο μεγάλο, είναι ιδιαίτερα σημαντική και άξια μελέτης, καθώς θα έχει άμεση επίπτωση στον άνθρωπο ως ενεργό μέλος αυτού του οικοσυστήματος. Επειδή όμως κάθε οργανισμός παρουσιάζει ιδιαιτερότητες βιολογικής και φυσικοχημικής φύσης, είναι πρακτικά αδύνατο να γίνει μία μελέτη όπου θα αναλύεται η επίπτωση του κάθε ραδιονουκλιδίου στον κάθε ζωντανό οργανισμό ξεχωριστά. Αυτή η δυσκολία αντιμετωπίστηκε σε ικανοποιητικό βαθμό με τα μοντέλα δοσιμετρίας. Στα μοντέλα αυτά οι οργανισμοί ενός οικοσυστήματος χωρίζονται σε κατηγορίες-γκρουπ, ανάλογα με κάποια κοινά τους χαρακτηριστικά τα οποία σχετίζονται κατά κύριο λόγο με τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος στο οποίο ζουν και λαμβάνουν την τροφή τους και κάποια κοινά βιομετρικά τους χαρακτηριστικά. Ανάλογα με τον οργανισμό που μελετάται, γίνεται η κατάταξη στις κατηγορίες που ορίζει το δοσιμετρικό μοντέλο και με την εισαγωγή των παραμέτρων που αφορούν στα φυσικά χαρακτηριστικά της ιοντίζουσας ακτινοβολίας γίνεται ο τελικός υπολογισμός της δόσης που δέχεται.

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η κατανόηση και η αξιολόγηση των σύγχρονων μοντέλων δοσιμετρίας και πιο συγκεκριμένα του RESRAD-BIOTA. Για να είναι όμως δυνατή η παραπάνω επιδίωξη θα πρέπει πρώτα να υλοποιηθεί μία μελέτη ραδιολογικής επιβάρυνσης ενός συγκεκριμένου οικοσυστήματος μέσω μίας γνωστής και αξιόπιστης μεθόδου που είναι οι γνωστές εξισώσεις της εξωτερικής έκθεσης για φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια σε

ένα θαλάσσιο οικοσύστημα. Για να είναι αξιόπιστη η τελική σύγκριση των δύο μεθόδων ελήφθησαν οι ακόλουθες κοινές παράμετροι:

1. Χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο μεθόδους τα ίδια ραδιονουκλίδια και οι εκτιθέμενοι οργανισμοί είχαν όμοια χαρακτηριστικά (βιομετρικά και ενδιαίτημα).
2. Χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο μεθόδους δείγματα από τις ίδιες περιοχές ελέγχου με τις ίδιες συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στο εκάστοτε μέσο.

Συνεπώς όλες οι φυσικές και βιολογικές μεταβλητές ήταν κοινές και για τις δύο μεθόδους. Παρά ταύτα παρουσιάστηκαν διαφοροποιήσεις στην τελική εξωτερική δόση και σε μερικές περιπτώσεις η διαφοροποίηση αυτή ξεπερνούσε και τη μία τάξη μεγέθους.

Κάποιες αιτιάσεις της διαφοροποίησης κάποιων τελικών αποτελεσμάτων είναι οι ακόλουθες:

1. Όλα τα μοντέλα δοσιμετρίας στοχεύουν στην εύρεση συντηρητικών αποτελεσμάτων ώστε σε περίπτωση ξαφνικής ραδιολογικής επιβάρυνσης ενός οικοσυστήματος να είναι σε θέση να δώσουν γρήγορα αποτελέσματα που αντιπροσωπεύουν το χειρότερο σενάριο επιβάρυνσης, ώστε να ληφθούν τα βέλτιστα μέτρα αντιμετώπισης και προστασίας.
1. Όπως είναι γνωστό απαραίτητες για τον υπολογισμό των δόσεων είναι οι ενέργειες εκπομπής του κάθε ραδιονουκλιδίου. Στις εξισώσεις εισήχθησαν οι ενέργειες εκπομπής- $\gamma$  του κάθε ραδιονουκλιδίου με τη συνεισφορά των θυγατρικών του όπου αυτό ήταν επιβεβλημένο. Ο κώδικας στις προκαθορισμένες ενέργειες εκπομπής συμπεριλαμβάνει και την σωματιδιακή εκπομπή- $\beta$  αθροιστικά με την  $\gamma$ . Σε αντίθεση στις συμβατικές εξισώσεις η ακτινοβολία  $\beta$  θεωρείται αμελητέας συνεισφοράς καθώς αποκόπτεται από την επιδερμίδα και τα λέπια του ψαριού κατά την επαφή του με την ραδιενεργό πηγή. Η διαφοροποίηση στις ενέργειες εκπομπής για κάθε ραδιονουκλίδιο που χρησιμοποιήθηκαν στην μέθοδο των εξισώσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες προκαθορισμένες του RESRAD-BIOTA παρατίθεται στον ακόλουθο πίνακα:

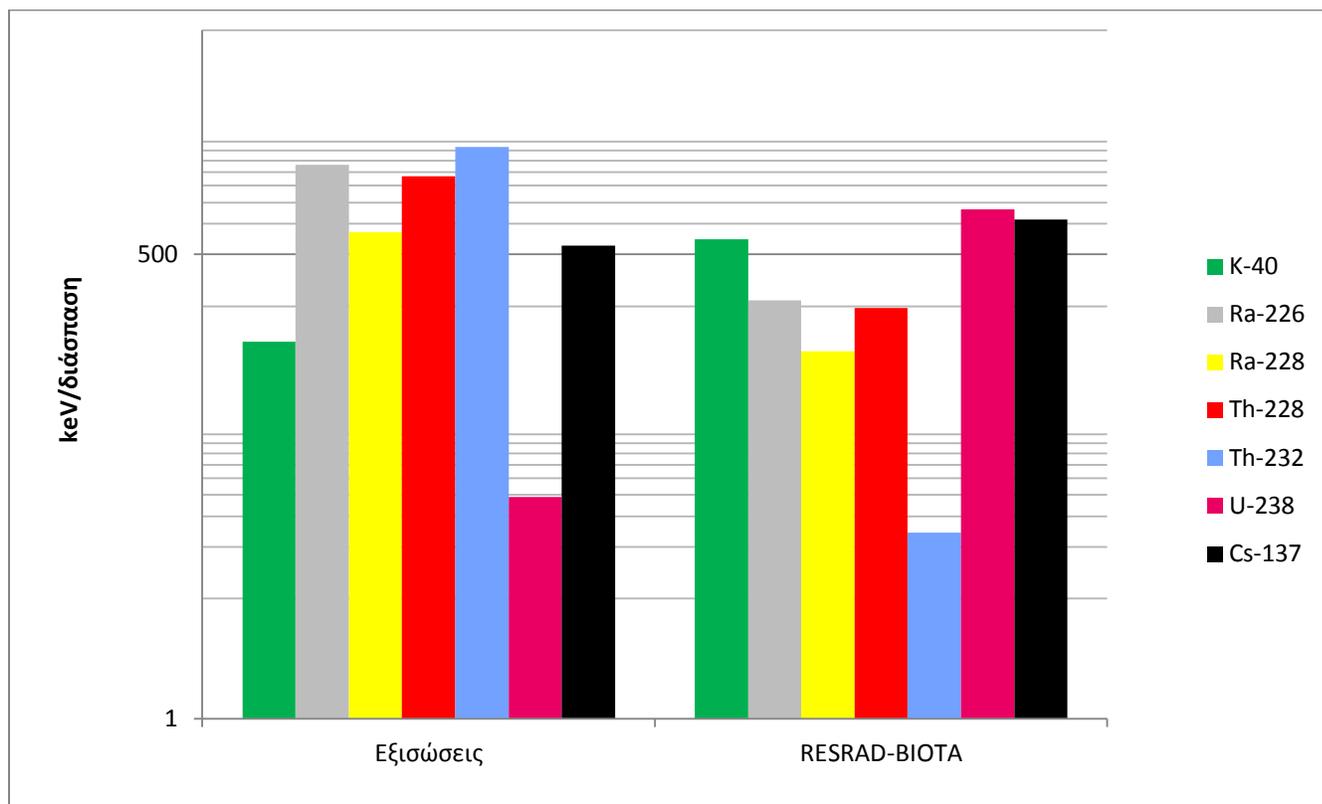
Πίνακας Παρ.1: Λόγος των τιμών των προκαθορισμένων ενεργειών εκπομπής β+γ που χρησιμοποιεί ο RESRAD-BIOTA σε σχέση με τις τιμές των ενεργειών εκπομπής-γ που βρέθηκαν για την μέθοδο των εξισώσεων

Ραδιονουκλίδιο	Μέθοδος εξισώσεων (γ) $\sum_i I_i E_{\nu_i}$ (keV/διάσπαση)	RESRAD-BIOTA (β+γ) $\sum_i I_i E_{\nu_i}$ (keV/διάσπαση)	Ratios RESRAD-BIOTA/Εξισώσεις
<sup>137</sup> Cs	563,1	796,6	1,41
<sup>40</sup> K	155,9	610,4	3,92
<sup>226</sup> Ra	1647,8	2702,3	1,64
<sup>228</sup> Ra (νερό)	672,4	1367,7	2,03
<sup>228</sup> Th (νερό)	1423,2	2431	1,71
<sup>232</sup> Th (ίζημα)	2095,6	12,1	Δεν γίνεται σύγκριση
<sup>238</sup> U	19,4	915,4	47,19

Παρατηρούνται συνεπώς σημαντικές διαφοροποιήσεις στις ενέργειες εκπομπής που χρησιμοποιούνται από τις δύο μεθόδους γεγονός που αιτιολογεί τα διαφορετικά αποτελέσματα στον ρυθμό εξωτερικών δόσεων που σε μερικές περιπτώσεις αγγίζουν και κάποιες τάξεις μεγέθους.

Πίνακας Παρ.2: Συγκριτικός πίνακας των θυγατρικών ραδιονουκλιδίων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ενέργειες εκπομπής στις δύο μεθόδους.

Μητρικό Ραδιονουκλίδιο	Θυγατρικά ραδιονουκλίδια που συνυπολογίζονται στην ενέργεια εκπομπής γ με την μέθοδο των εξισώσεων.	Θυγατρικά ραδιονουκλίδια που συνυπολογίζονται στην ενέργεια εκπομπής β+γ με την μέθοδο του RESRAD-BIOTA.
<sup>137</sup> Cs	-	<sup>137m</sup> Ba
<sup>40</sup> K	-	-
<sup>226</sup> Ra	<sup>214</sup> Pb+ <sup>214</sup> Bi+ <sup>210</sup> Pb	<sup>222</sup> Rn+ <sup>214</sup> Pb+ <sup>214</sup> Bi+ <sup>214</sup> Po
<sup>228</sup> Ra (νερό)	<sup>228</sup> Ac	<sup>228</sup> Ac
<sup>228</sup> Th (νερό)	<sup>224</sup> Ra+ <sup>212</sup> Pb+ <sup>212</sup> Bi+ <sup>208</sup> Tl	<sup>224</sup> Ra+ <sup>220</sup> Rn+ <sup>212</sup> Pb+ <sup>212</sup> Bi+ <sup>208</sup> Tl
<sup>232</sup> Th (ίζημα)	<sup>228</sup> Ac+ <sup>229</sup> Ac+ <sup>228</sup> Th+ <sup>224</sup> Ra+ <sup>212</sup> Pb+ <sup>212</sup> Bi+ <sup>208</sup> Tl	Τα θυγατρικά του καταγράφονται ξεχωριστά
<sup>238</sup> U	<sup>234</sup> Th+ <sup>234</sup> Pa	<sup>234</sup> Th+ <sup>234</sup> Pa



Εικόνα Παρ.1:Συγκριτικό γράφημα των αποτελεσμάτων των ενεργειών εκπομπής που χρησιμοποιούνται στις δύο μεθόδους σε λογαριθμική κλίμακα.

Στην περίπτωση του μητρικού του Th-232, στην μέθοδο των εξισώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ενέργειες εκπομπής-γ όλων των θυγατρικών του (Πίνακας 6.9) όπου σε συνδυασμό με τις μετρημένες συγκεντρώσεις του στο ίζημα (οι οποίες λόγω ισορροπίας υπολογίστηκαν από τις συγκεντρώσεις των θυγατρικών του Ra-228&Th-228) υπολογίστηκε ο ρυθμός εξωτερικής δόσης. Σε αντιδιαστολή με την μέθοδο των εξισώσεων, ο RESRAD-BIOTA στις προκαθορισμένες ενέργειες για το Th-232 δίνει μόνο τις ενέργειες εκπομπής-β του μητρικού, ενώ παίρνει ξεχωριστά τις ενέργειες εκπομπής του κάθε θυγατρικού του (Πίνακες Παρ.1, Παρ.2). Συνεπώς στην περίπτωση του Th-232 δεν γίνεται σύγκριση των ενεργειών που χρησιμοποιούνται στις δύο μεθόδους, παρά απλή παράθεση των τιμών και επισήμανση του προβλήματος που διαπιστώθηκε.

2. Στο RESRAD-BIOTA στον υπολογισμό των τελικών συντελεστών ρυθμού εξωτερικής δόσης (DCF<sub>s</sub>) μέσω των οποίων υπολογίζεται ο τελικός ρυθμός εξωτερικής δόσης, λαμβάνονται υπόψη και τα βιομετρικά χαρακτηριστικά του

οργανισμού και πιο συγκεκριμένα ο όγκος του ψαριού στην περίπτωση της εξωτερικής δόσης, ενώ στην μέθοδο των εξισώσεων λαμβάνεται υπόψιν μόνο το ενδιαίτημα του οργανισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι τελικές εξωτερικές δόσεις που υπολογίζονται με τις δύο μεθόδους να εμφανίζονται διαφοροποιημένες.

Παρά τις θετικές του προεκτάσεις, ο κώδικας RESRAD-BIOTA παρουσίασε κάποιους περιοριστικούς παράγοντες ως προς την χρήση του στην εύρεση των εξωτερικών δόσεων. Πιο συγκεκριμένα:

- Ο RESRAD χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό των εξωτερικών δόσεων προκαθορισμένες τιμές των ενεργειών εκπομπής β&γ αθροιστικά για το κάθε ραδιονουκλίδιο. Ο συνυπολογισμός της β στις ενέργειες εκπομπής δημιουργεί ερωτηματικό στο κατά πόσο είναι σημαντική η εισαγωγή της β ή θα πρέπει να δίνεται η δυνατότητα να εξαιρείται, ώστε η προσέγγιση να είναι πιο ρεαλιστική.
- Σε περιπτώσεις σαν αυτή του Th-232 όπου δεν αναγνωρίζεται στον κώδικα ραδιενεργός ισορροπία με αποτέλεσμα την ξεχωριστή καταγραφή όλων των θυγατρικών του δημιουργώντας πρόβλημα στην εύρεση εξωτερικής δόσης στο ίζημα, θα μπορούσε σαν μελλοντική εξέλιξη του κώδικα να δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέγει την ραδιενεργό ισορροπία για κάθε μητρικό ραδιονουκλίδιο, ανάλογα με τις συνθήκες του συστήματος μελέτης, στον υπολογισμό των δόσεων.
- Ο κώδικας δεν παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει συγκεκριμένα στοιχεία που αφορούν τα βιομετρικά χαρακτηριστικά (μήκος οργανισμού) του οργανισμού που μελετάται, παρά μόνο την επιλογή του όγκου μέσω κλίμακας. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να επιλυθεί με την δυνατότητα εισαγωγής του μετρούμενου μήκους του οργανισμού όπως αυτό προέκυψε από τη δειγματοληψία ή μέσω της διεύρυνσης της κλίμακας όγκου του RESRAD-BIOTA, ώστε να περιλαμβάνει περισσότερους προκαθορισμένους οργανισμούς.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### *Ξένη Βιβλιογραφία*

---

[Amiro.97] B.D. Amiro, 1997, “*Radiological Dose Conversion Factors for Generic Non-Human Biota Used for Screening Potential Ecological Impacts*” *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. (35): 37-51

[Beresford.08] N.A. Beresford et.al, 2008, “*An International comparison of models and approaches for the estimation of the radiological exposure of non-human biota*” *Applied Radiation and Isotopes*, Vol.66: 1745-1749

[Blaylock.93] B.G. Blaylock, M.L. Frank, B.R. O’Neal, 1993, “*Methology for Estimating Radiation Dose Rates to Freshwater Biota Exposed to Radionuclides in the Environment*”, U.S.Department of Energy.

[Bowen.79] H. Bowen, 1979, “*Environmental Chemistry of the Elements*”, Academic Press, London.

[Bowler.73] M.G. Bowler, 1973, “*Nuclear Physics*”, Oxford.

[Carr.12] S.M. Carr, 2012, “*Ioniing Radiation and Life*”, Memorial University of Newfoundland, Canada.

[Cottingham.95] W.N. Cottingham, D.A.Greenwood, 1995, “Εισαγωγή στην Πορηνική Φυσική”, Εκδόσεις τυπωθήτο-Γιώργος Δαρδάνος, Αθήνα.

[DOE.02] U.S. Department of Energy (DOE) 2002 “A Graded Approach for Evaluating Radiation Dose to Aquatic and Terrestrial Biota”, Voluntary Consensus Technical Standard DOE-STD-1153-2002, Washington D.C.

[DOE 5400.5] DOE Order 5400.5, 1990, “Radiation Protection of the Public and the Environment”, DOE, 1990a.

[DOE 5400.1] DOE Order 5400.1, 1990, “General Environmental Protection Program”, DOE, 1990b.

[DOE.93] U.S. Department of Energy, 1993, “10 CFR 834, Radiation Protection of the Public and the Environment; Proposed Rule” Federal Register 1993, Vol. 58, No 56: 16268-16322

[Evangeliou.12] N. Evangeliou, H. Florou, P. Kritidis, 2012, “Distribution of low-level natural radioactivity in a populated marine region of the eastern Mediterranean Sea”, Radiation Protection Dosimetry: 345-360.

[Evangeliou.05] N. Evangeliou, H. Florou, E. Dasenakis, M. Scoullou, 2005, “Activity concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  in marine environment: Dispersion and distribution in the water column.” 2<sup>nd</sup> Environmental Conference of Macedonia, Thessaloniki.

- [Etter.65] L.E. Etter, 1965, *“The science of ionizing radiation”*, Springfield III, C.C Thomas.
- [FASSET.03] Framework for Assessment of Environmental Impact (FASSET), 2003, *“Dosimetric models and data for assessing radiation exposures to biota”*, FASSET.
- [Florou.10] H. Florou, G. Nikolaou, N. Evangeliou, 2010, *“The concentration of <sup>137</sup>Cs in the surface of the Greek marine environment”*, Journal of Environmental Radiation, Vol(101):654-657.
- [Florou.08] H. Florou, P. Kritidis, 2008, *“Ionizing radiations and aquatic environment: A non-anthropocentric radioecological approach”*, Summer school NCSR.D.
- [Florou.96] H. Florou, 1996, *“<sup>137</sup>-Cs inventory in abiotic component and biota from the Aegean and the Ionian Sea-Greece”*, Chem. Ecol.12: 253-258.
- [Florou.91] H. Florou, P. Kritidis, 1991, *“Natural radioactivity in environmental samples from an island of volcanic origin (Milos, Aegean Sea)”*, Marine pollution Bulletin, Vol(22), No.8: 417-419.
- [Florou.83] H. Florou, 1983, *“Effects of artificial radioactivity in the marine environment”*, I Panhellenic Symposium of Biology, pp: 12-20, Athens.

**[Florou.82]** H. Florou, J. Kollas, 1982, “*Effects of radioactivity in the environment*”,  
7<sup>nd</sup> Panhellenic Symposium of Chemistry, Vol.A: 536-546, Ioannina,.

**[Friedl.05]** B. Friedlander, M. Gochfeld, J. Burger, C. Powers, 2005, “*Radionuclides  
in the marine environment*”, CRESA Science Review.

**[Higley.03]** K.A. Higley et. al. 2003, “*Derivation of a screening methodology for  
evaluating radiation dose to aquatic and terrestrial biota*” Journal of Environmental  
Radioactivity, Vol. 66(2003): 41-59.

**[Hosseini.05]** A. Hosseini, J. Brown, H. Thørring, P. Børretzen, 2005, “*Environmental  
impact assessment in Arctic environments*”, Norwegian Radiation Protection Authority.

**[IAEA.92]** International Atomic Energy Agency (IAEA), 1992, “*Effects of Ionizing  
Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards*”,  
Technical Report Series No 332, IAEA, Vienna, Austria.

**[ICRP.08]** ICRP 38, 2008, “*Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations*”,  
Pergamon Press.

**[Jones.03]** D.Jones et. al. 2003 “*Principles and issues in radiological ecological risk  
assessment.*”, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 66: 19-39.

**[Knoll.10]** Glenn F.Knoll, 2010, “*Radiation Detection and Measurement*”, John  
Wiley&Sons 4<sup>th</sup> edition.

**[Kocher.81]** D.C. Kocher, 1981, “*Radioactive Decay Data Tables: a Handbook of Decay Data for Application to Radiation Dosimetry and Radiological Assessments*”, U.S Department of Energy, DOE-TIC-11026.

**[Kritidis&Florou.90]** P.Kritidis and H.Florou, 1990, “*Estimation of the <sup>137</sup>Cs deposited in Aegean Cretian and Ionian Seas after the Chernobyl Accident*”, Rapp.Comm. int. Mer Medit., Vol.32(1990): 318.

**[NCRP.91]** National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) 1991, “*Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms*”, NCRP Report No 109, Bethesda, Maryland.

**[Polikarpov.98]** G.G Polikarpov, 1998, “*Conceptual model of responses of organisms populations and ecosystems to all possible dose rates of ionizing radiation in the environment*”, Radiation Protection Dosimetry, Institute of Biology of the Southern Seas, Ukraine, Vol.75: 181-185.

**[RESRAD-BIOTA]** RESRAD-BIOTA: “*A Tool for Implementing a Graded Approach to Biota Dose Evaluation.*” Interagency Steering Committee on Radiation Standards, User’s Guide, DOE 2004.

**[Shleien.98]** B.Shleien, L.A. Slayback, B.K. Kirby, 1998, “*Handbook of health physics and radiological health*”, Williams & Wilkins, Baltimore.

[Simop.89] S.E. Simopoulos, 1989, “Soil sampling and Cs-137 analysis of the Chernobyl fallout in Greece”, Appl. Radiation Isotopes, Vol.40: 607-613.

[Stricht.01] Etienne Van der Stricht, Rene Kirchmann, 2001, “Radioecology: Radioactivity & Ecosystems”, FORTEMPS.

[Till.78] J.E.Till, 1978, “The effect of chronic exposure to <sup>238</sup>Pu citrate on embryonic development of carp and fathead minnow eggs”, Health Physics, Vol.34: 333-343.

[Trabidou.96] G. Trabidou, H. Florou, A. Angelopoulos, L. Sakeliou, 1996, “Environmental study of the radioactivity of the spas in the island of Ikaria”, Radiation protection dosimetry: 63-67.

[Ulanovsky.08] A.Ulanovsky et.al. 2008, “Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota.” Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 99(2008): 1440-1448.

[UNSCEAR.82] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation), 1982, “Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects”, United Nations NY.

[UNSCEAR.88] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation), 1988, “Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation”, United Nations NY.

[UNSCEAR.93] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation), 1993, “Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation”, United Nations NY.

[UNSCLEAR.02] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation), 2000, “*Sources and Effects of Ionizing Radiation*”, United Nations NY.

[Wood.73] D.S. Woodhead, 1973, “*Levels of radioactivity in the marine environment and the commitment to marine organisms*”, I.A.E.A. 158/31, Vienna.

### *Ελληνική Βιβλιογραφία*

---

[Αλεξανδρ.91] Π.Σ. Αλεξανδροπούλου, 1991, “*Γεωχημεία Παράκτιων Ιζημάτων, περιοχές Ιθάκης-Κεφαλληνίας-Αστακού.*” Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Παν/μιο Πατρών.

[Αναγνωστ.11] Θ. Αναγνωστούδη, 2011, «*Φυσική ραδιενέργεια των κλαστικών και ανθρακικών ιζημάτων στην περιοχή ανατολική της Ηγουμενίτσας*», Μ.Π.Σ., Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.

[Αντωνόπ.05] Μ. Αντωνόπουλος-Ντόμης, 2005, «*Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία*», Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

[Ασημακ.02] Π.Α. Ασημακόπουλος, 2002, «*Εισαγωγή στην πυρηνική φυσική*», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Ιωάννινα.

**[Βασιλοπ.12]** Θ. Βασιλοπούλου, 2012, «*Ανάπτυξη πυρηνικών τεχνικών στοιχειακής ανάλυσης δειγμάτων μεγάλου όγκου*», Διδακτορική διατριβή, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

**[Βεργαν.89]** Α. Βεργανελάκης, 1989, *Ιοντίζουσες ακτινοβολίες και ζωντανοί οργανισμοί, στο «Εμείς και η ραδιενέργεια», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.*

**[Βλαστού.03]** Ρ.Ζ. Βλαστού, 2003, «*Εργαστηριακές ασκήσεις πυρηνικής φυσικής και στοιχειωδών σωματιδίων*», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

**[Βλαχώνης.97]** Γ. Βλαχώνης, 1997, «*Συσώρευση και βιοδιαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων στο βενθικό οικοσύστημα του κόλπου του Ηρακλείου (Β.Κρήτη)*», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Βιολογίας, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

**[Γαζής.99]** Ε.Ν. Γαζής, 1999, *Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες, «Φυσική-Εφαρμογές στη Βιολογία και Ιατρική*», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

**[Γκαραγκ.05]** Α. Γκαραγκούνη, 2005, «*Προσδιορισμός βαρέων μετάλλων και φυσικών ραδιενεργών νουκλιδίων στα ιζήματα του στενού Ψυττάλειας-Κερασινίου, Σαρωνικός Κόλπος*», ΔΜΠΣ Τμήμα Βιολογίας, Πανεπιστήμιο Πάτρας.

**[Ευαγγελίου.09]** Ν. Ευαγγελίου, 2009, «*Μελέτη κατανομών και μορφών ραδιοϊσοτόπων και ιχνοστοιχείων στο θαλάσσιο περιβάλλον*», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημείας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

[ΕΕΑΕ.11] Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2011, «*Μαθήματα Ακτινοπροστασίας για χειριστές ιατρικών μηχανημάτων ιοντιζουσών ακτινοβολιών*», Εργαστήριο Ιατρικής Σχολής Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

[Ζαχαρίας.04] Ι. Ζαχαρίας, Κ. Κουτσικόπουλος, Γ. Παπαθεοδώρου, Γ. Φερεντίνος, 2004, «*Το Θαλάσσιο Περιβάλλον ως αποδέκτης αποβλήτων*», 50/2 επιμ.Πάτρα: ΕΑΠ.

[Θαλ.Στρ. 12] Θαλάσσια στρατηγική, 2012, «*Συνοδευτική τεχνική έκθεση για το στάδιο της «Προετοιμασίας του σχεδίου δράσης των θαλάσσιων στρατηγικών στην Ελλάδα για την εφαρμογή της οδηγίας πλαίσιο για τη θαλάσσια Στρατηγική 2008/56/ΕΚ*», pp:

[Κρητίδης.89a] Π. Κρητίδη, 1989, *Ραδιενεργός ρύπανση του περιβάλλοντος, στο «Εμείς και η ραδιενέργεια*», Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, pp:235-269, Ηράκλειο.

[Κρητίδης.89b] Π. Κρητίδη, 1989, *Ακτινοπροστασία, στο «Εμείς και η ραδιενέργεια*», Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, pp:301-323, Ηράκλειο.

[Κουτσοδ.05] Α. Κουτσοδένδρης, 2005, «*Κατακόρυφες κατανομές ραδιοϊσοτόπων και βαρέων μετάλλων σε ιζήματα του Πατραϊκού κόλπου*», Διατριβή ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.

[Μαμάης.10] Δ.Μαμάης, 2010, Σημειώσεις μαθήματος «*Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη*», Δ.Π.Μ.Σ. «*Περιβάλλον και Ανάπτυξη*» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

[Μισαηλ.86] Π. Μισαηλίδης, 1986, «Εισαγωγή στη ραδιοχημεία και στην πυρηνική χημεία», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

[Μουστ.04] Α. Μουστακλή, 2004, «Συγκριτική μελέτη της ρύπανσης των θαλάσσιων ιζημάτων της ζώνης των Πατρών και της Ψυττάλειας», ΔΠΜΣ Τμήμα Βιολογίας, Πανεπιστήμιο Πάτρας.

[Ντούλα.10] Μ. Ντούλα, 2010, «Φαινόμενα ρύπανσης στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επιπτώσεις στις Βιοκοινωνίες», Ινστιτούτο Εδαφολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας.

[Οικονόμου.89] Λ. Οικονόμου, 1989, *Θνητοί πυρήνες και ραδιενέργεια, στο «Εμείς και η ραδιενέργεια»*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.

[Παπαστ.10] Κων.Φ .Παπαστεφάνου, 2010, «Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος», Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

[Σιμόπουλ.89] Α. Σιμόπουλου, 1989, *Φυσικές και τεχνητές πηγές ραδιενέργειας, στο «Εμείς και η ραδιενέργεια»*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.

[Σίσκος.92] Π.Α. Σίσκος, Μ.Ι. Σκούλλος, 1992, «Περιβαλλοντική Χημεία Ι», Σημειώσεις μαθήματος, Τμήμα Χημείας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

[Τραμπίδου.08] Γ. Τραμπίδου, Χ. Ψωμιάδου, Ε. Φλώρου, Π. Κρητίδης, 2008, «Συγκεντρώσεις ενεργότητας των φυσικών ραδιονουκλιδίων σε συστατικά οικοδομικών υλικών

και ραδιολογική επίπτωση σε σχέση με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία», 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών υλικών και στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα.

[**Τραμπίδου.04**] Γ. Τραμπίδου, 2004, «Ραδιολογική έρευνα περιοχών ραδιενεργών ιαματικών πηγών», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Φυσικής, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

[**Τραμπίδου.97**] Γ. Τραμπίδου, Ε. Φλώρου, Ι. Κατσίκης, 1997, «Συγκριτική μελέτη ραδιενέργειας ιαματικών πηγών σε δύο παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας», 5ο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας και αλιείας.

[**Τραχανάς.08**] Σ. Τραχανάς, 2008, «Κβαντομηχανική II», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο.

[**Τσιπολίτης.09**] Γ. Τσιπολίτης, 2009, «Εφαρμογές των ιοντιζουσών ακτινοβολιών στην ιατρική & τη βιολογία», Σημειώσεις μαθήματος, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

[**Φλώρου.02**] Ε. Φλώρου, Π. Κρητίδης, Χ. Χαλούλου, 2002, «Εκτίμηση ραδιολογικής κατάστασης του Θερμαϊκού κόλπου: Πηγές-Διασπορά Βιοδείκτες παρακολούθησης», 1ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη.

[**Φλώρου.01**] Ε. Φλώρου, 2001, «Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος-Ραδιοικολογία», Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας Ακτινοπροστασίας, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

[Φλώρου.92] Ε. Φλώρου, 1992, «Συμπεριφορά και κατανομή μακρόβιων ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο οικοσύστημα του Ελλαδικού χώρου», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Βιολογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

[Φυτιανός.88] Κ. Φυτιανός, Φ. Σαμανίδου, 1988, «Η ρύπανση των θαλασσών», University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

[Χατζημπ.07] Κ. Χατζημπίρος, 2007, «Οικολογία. Οικοσυστήματα και προστασία του Περιβάλλοντος», εκδόσεις Συμμετρία.

[Ψαρράκος.10] Κ. Ψαρράκος, Ε. Μολυβδά-Αθανασοπούλου, Α. Σιούντας, Α. Γκοτζαμάνη-Ψαρράκου, 2010, «Συλλογικό Έργο : Ιατρική Φυσική», University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

### ***Διαδικτυακοί Τόποι***

---

[Argonne web] [www.anl.gov/](http://www.anl.gov/)

[chem. web] [www.chemicalelements.com](http://www.chemicalelements.com)

[desy.cfel web] DESY, Center for Free-Electron Laser Science: <https://desy.cfel.de>

[EcoDo-net web] Ecosystems Database Observatory: [www.ecodonet.gr](http://www.ecodonet.gr)

[EEAE web] [www.eeae.gr](http://www.eeae.gr)

[EETT web] Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομίων: [www.eett.gr](http://www.eett.gr)

[ERL web] ERL, INRASTES, NCSR “Demokritos” Database: <http://ipta.demokritos.gr/erl/erl.html>

- [geo.auth web] <http://www.geo.auth.gr/106/theory/radioactivity.htm>
- [IENE web] Ινστιτούτο Ενέργειας Νοτιοανατολικής Ευρώπης <http://www.iene.gr/>
- [kireas web] <http://kireas.org/evoikos.htm>
- [laradioactivite web] [www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com)
- [nucl.wiki web] [www.nucleonica.net](http://www.nucleonica.net)
- [OSPAR web] OSPAR Commission, protecting and conserving the North-East Atlantic and its resources <http://www.ospar.org/>
- [RESRAD web] <http://web.ead.anl.gov/resrad>
- [science.wiki web] <http://el.science.wikia.com>
- [tarleton.edu web] Tarleton State University:  
<http://faculty.tarleton.edu/marble/AdvLab/Emass/GammaSpectra.htm>
- [USGS web] U.S Geological Survey <http://www.usgs.gov/>
- [waterenc. web] <http://www.waterencyclopedia.com>
- [Wikipedia web] <http://el.wikipedia.org>
- [WNA web] World Nuclear Association <http://www.world-nuclear.org>