

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ  
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑ  $^{137}\text{Cs}$  ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΤΗΝ  
ΥΔΑΤΙΝΗ ΣΤΗΛΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΤΟΥ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ  
ΠΑΤΡΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ ΜΕ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ**

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Κ. ΕΥΑΓΓΕΛΙΟΥ  
ΧΗΜΙΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2005

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ  
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**  
**ΜΙΧΑΗΛ Ι. ΣΚΟΥΛΛΟΣ**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**ΜΙΧΑΗΛ Ι. ΣΚΟΥΛΛΟΣ**  
Καθηγητής Τμήματος  
Χημείας ΕΚΠΑ

**ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ι. ΔΑΣΕΝΑΚΗΣ**  
Αναπληρωτής καθηγητής  
Χημείας ΕΚΠΑ

**ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Ν. ΓΑΖΗΣ**  
Καθηγητής Τμήματος  
Εφαρμοσμένων Μαθηματικών  
& Φυσικών Επιστημών  
ΕΜΠ

ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΣΤΟ  
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ”  
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ – ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ ΕΚΕΦΕ “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ”:**  
**Δρ. ΕΛΕΝΗ ΦΛΩΡΟΥ**

ΑΘΗΝΑ 2005

*Αφιερώνεται στη μνήμη της Έλεν, η σκέψη της οποία με οδηγεί, καθώς και σε αυτούς που ψάχνουν για την αλήθεια.*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΟΡΟΛΟΓΙΑ – ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

<b>1</b>	<b>ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ .....</b>	<b>14</b>
1.1	<b>ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΑ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗΝ ΥΛΗ</b>	<b>14</b>
	<b>1.1.1</b>	<b><u>Εισαγωγή..... 14</u></b>
	<b>1.1.2</b>	<b><u>Ατομικά είδη και συμπεριφορά..... 14</u></b>
	<b>1.1.3</b>	<b><u>Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – ύλης. Ιοντίζουσες &amp; μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες..... 16</u></b>
	<b>1.1.4</b>	<b><u>Χρόνος υποδιπλασιασμού – Μέσος χρόνος ζωής..... 18</u></b>
1.2	<b>ΤΡΟΠΟΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥ ΔΙΑΣΠΑΣΕΩΣ .....</b>	<b>18</b>
	<b>1.2.1</b>	<b><u>α- Διάσπαση..... 18</u></b>
	<b>1.2.2</b>	<b><u>β- Διάσπαση..... 20</u></b>
	<b>1.2.3</b>	<b><u>γ- Διάσπαση..... 21</u></b>
	<b>1.2.4</b>	<b><u>Άλλα είδη ραδιενεργών διασπάσεων..... 23</u></b>
1.3	<b>ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ.....</b>	<b>23</b>
	<b>1.3.1</b>	<b><u>Ενεργότητα..... 23</u></b>
	<b>1.3.2</b>	<b><u>Έκθεση..... 25</u></b>
	<b>1.3.3</b>	<b><u>Δόση ακτινοβολίας..... 25</u></b>
	<b>1.3.4</b>	<b><u>Ενεργό ισοδύναμο δόσης..... 26</u></b>
<b>2</b>	<b>ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΙΣΙΟΥ.....</b>	<b>30</b>
2.1	<b>ΤΟ ΚΑΙΣΙΟ ΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>30</b>
2.2	<b>ΧΗΜΙΚΗ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΚΑΙΣΙΟΥ.....</b>	<b>32</b>
2.3	<b>ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ <sup>137</sup>Cs ΚΑΙ ΤΗ ΡΑΔΙΟΛΟΓΙΚΗ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ.....</b>	<b>33</b>
2.4	<b>ΠΗΓΕΣ <sup>137</sup>Cs ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....</b>	<b>35</b>

2.4.1	<u>Δοκιμές πυρηνικών όπλων.....</u>	<u>35</u>
2.4.2	<u>Εκπομπές από ατυχήματα .....</u>	<u>36</u>
2.5	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ CHERNOBYL ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΘΑΛΑΣΣΑ.....	37
2.5.1	<u>Γενικά ωκεανογραφικά χαρακτηριστικά της Μεσογείου θαλάσσης .....</u>	<u>38</u>
2.5.2	<u>Διασπορά του <sup>137</sup>Cs στη Μαύρη Θάλασσα - Ουκρανία.....</u>	<u>39</u>
2.5.3	<u>Διασπορά του <sup>137</sup>Cs στη Μαύρη Θάλασσα - Ρουμανία.....</u>	<u>39</u>
2.5.4	<u>Διασπορά του <sup>137</sup>Cs στο Κυπριακό Πέλαγος.....</u>	<u>40</u>
2.5.5	<u>Διασπορά του <sup>137</sup>Cs στη Θάλασσα της Λεβαντίνης.....</u>	<u>40</u>
2.5.6	<u>Διασπορά του <sup>137</sup>Cs στο Αιγαίο πέλαγος.....</u>	<u>40</u>
2.5.7	<u>Διασπορά του <sup>137</sup>Cs στην Αδριατική Θάλασσα και στο Ιόνιο Πέλαγος....</u>	<u>42</u>
2.6	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ <sup>137</sup> Cs ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ.....	43
3	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΤΟΥ <sup>137</sup> Cs ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	47
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	47
3.2	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ – ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ <sup>137</sup> Cs ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	47
3.2.1	<u>Ραδιενεργός επίπτωση (fallout) .....</u>	<u>47</u>
3.2.2	<u>Επίδραση κλιματολογικών συνθηκών.....</u>	<u>48</u>
3.2.3	<u>Διακίνηση μέσω ποταμών (απορροές).....</u>	<u>48</u>
3.3	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	48
3.3.1	<u>Υδροδυναμική μεταφορά .....</u>	<u>49</u>
3.3.2	<u>Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά ραδιονουκλιδίων .....</u>	<u>50</u>
3.3.3	<u>Κατανομή των ραδιονουκλιδίων της ραδιενεργού επίπτωσης στους ωκεανούς.....</u>	<u>51</u>
3.4	ΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗ.....	52
3.5	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΔΑΤΙΝΗ ΣΤΗΛΗ ΣΤΑ ΙΖΗΜΑΤΑ .....	53
3.6	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ <sup>137</sup> Cs ΣΤΑ ΙΖΗΜΑΤΑ .....	54
3.7	ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΥΔΑΤΙΝΗ ΣΤΗΛΗ <sup>137</sup> Cs ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΟΥ ΣΕ ΙΖΗΜΑΤΑ..	55
3.8	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ <sup>137</sup> Cs ΣΤΟΥΣ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ .....	56
3.9	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ .....	56
3.9.1	<u>Στοχαστικές επιπτώσεις.....</u>	<u>57</u>
3.9.2	<u>Μη στοχαστικές επιπτώσεις.....</u>	<u>58</u>
<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>		
4	ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	61

4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	61
4.2	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΙΑ.....	61
4.3	ΣΚΕΥΗ.....	62
4.4	ΟΡΓΑΝΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ.....	63
4.5	ΟΡΓΑΝΑ ΠΕΔΙΟΥ.....	64
4.6	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ.....	68
4.6.1	<u>Κρισσαίος κόλπος.....</u>	<u>68</u>
4.6.2	<u>Πατραϊκός κόλπος (Σεπτέμβριος 2004).....</u>	<u>69</u>
4.6.3	<u>Πατραϊκός κόλπος (Μάρτιος 2005).....</u>	<u>70</u>
4.7	ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΡΑΔΙΟΧΗΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ <sup>137</sup> Cs.....	73
4.7.1	<u>AMP (ammonium molybdoorthophosphate) μέθοδος συγκαταβύθισης.....</u>	<u>73</u>
4.7.2	<u>Μέθοδος in situ προσυγκέντρωσης (εμπλουτισμού) δείγματος με αντλία μεγάλου όγκου.....</u>	<u>74</u>
4.8	ΓΑΜΜΑ – ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	79
4.8.1	<u>Αρχή μεθόδου.....</u>	<u>79</u>
4.8.2	<u>Βαθμονόμηση της ενέργειας του συστήματος γ - φασματομετρίας.....</u>	<u>83</u>
4.8.3	<u>Βαθμονόμηση της απόδοσης του συστήματος γ - φασματομετρίας.....</u>	<u>84</u>
4.8.4	<u>Ποιοτική ανάλυση ραδιενέργειας δείγματος.....</u>	<u>85</u>
4.8.5	<u>Ποσοτική ανάλυση ραδιενέργειας δείγματος.....</u>	<u>86</u>
4.8.6	<u>Υπολογισμός της ενεργότητας.....</u>	<u>86</u>
4.8.7	<u>Προσδιορισμός ορίου ανίχνευσης και σφαλμάτων μέτρησης και συγκέντρωσης.....</u>	<u>87</u>
5	ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	90
5.1	ΑΝΑΚΤΗΣΗ.....	90
6	ΚΑΤΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΒΑΘΟΥΣ ΑΠΟ ΤΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΤΟΥ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΠΑΤΡΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ.....	92
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	92
6.2	ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΣΤΑ ΒΑΘΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ.....	93
7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	96
7.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	96
7.1.1	<u>Κρισσαίος κόλπος.....</u>	<u>96</u>
7.1.2	<u>Πατραϊκός κόλπος (Σεπτέμβριος 2004).....</u>	<u>100</u>
7.1.3	<u>Πατραϊκός κόλπος (Μάρτιος 2005).....</u>	<u>108</u>
7.2	Αγωγιμότητα.....	130
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	138
8.1	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	138
8.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	139

8.3	ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΑΣ .....	139
8.4	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ .....	140
9	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	141
10	SUMMARY .....	144
11	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ .....	147
11.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	147
11.2	ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ.....	147
11.2.1	<u>Ανακάλυψη των ακτίνων-Χ (X-Rays) .....</u>	<u>148</u>
11.2.2	<u>Ανακάλυψη της ραδιενέργειας .....</u>	<u>148</u>
11.2.3	<u>Ανακάλυψη των ακτίνων α-, β-, γ- .....</u>	<u>149</u>
11.2.4	<u>Ανακάλυψη του πυρήνα.....</u>	<u>149</u>
11.2.5	<u>Επιβεβαίωση της ύπαρξης των ισοτόπων .....</u>	<u>150</u>
11.2.6	<u>Ανακάλυψη νετρονίου.....</u>	<u>150</u>
11.2.7	<u>Ανακάλυψη ποζιτρονίου:.....</u>	<u>150</u>
11.2.8	<u>Παραγωγή του πρώτου τεχνητού ραδιοϊσοτόπου:.....</u>	<u>151</u>
11.2.9	<u>Τεχνητή πυρηνική σχάση.....</u>	<u>151</u>
11.2.10	<u>Πρόκληση αλυσιδωτής αντίδρασης (chain reaction) .....</u>	<u>151</u>
11.2.11	<u>Ανακάλυψη μεθόδων ραδιοχρονολόγησης .....</u>	<u>152</u>
12	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΠΗΓΕΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ .....	153
12.1	ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ .....	153
12.1.1	<u>Κοσμική ακτινοβολία.....</u>	<u>154</u>
12.1.2	<u>Δόση από εσωτερική έκθεση .....</u>	<u>154</u>
12.1.3	<u>Ακτινοβολία εδάφους - Οικοδομικών υλικών .....</u>	<u>155</u>
12.1.4	<u>Το πρόβλημα του Ραδονίου.....</u>	<u>155</u>
12.1.5	<u>Τρόφιμα και πόσιμα νερά.....</u>	<u>156</u>
12.1.6	<u>Τεχνολογικά αυξανόμενα επίπεδα της έκθεσης σε φυσικά ραδιενεργά ισότοπα</u>	<u>157</u>
12.1.7	<u>Άλλες φυσικές πηγές ραδιενέργειας.....</u>	<u>157</u>
12.2	ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ .....	158
12.2.1	<u>Πυρηνικές δοκιμές.....</u>	<u>158</u>
12.2.2	<u>Εφαρμογές στην ιατρική .....</u>	<u>159</u>
12.2.3	<u>Πυρηνικοί αντιδραστήρες .....</u>	<u>160</u>
12.2.4	<u>Επεξεργασία Ουρανίου και κατασκευή του καυσίμου .....</u>	<u>161</u>
12.2.5	<u>Εργοστάσια επανεπεξεργασίας.....</u>	<u>162</u>
12.2.6	<u>Ραδιενέργεια από προϊόντα σχάσης.....</u>	<u>162</u>
12.2.7	<u>Αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων.....</u>	<u>162</u>
12.2.8	<u>Επαγγελματική έκθεση.....</u>	<u>163</u>

<b>12.2.9</b>	<b><i>Άλλες πηγές (Πυρηνοκίνητα πλοία - Υποβρύχια - Δορυφόροι)</i></b>	<b>163</b>
<b>13</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>165</b>
13.1	ΓΕΝΙΚΑ	165
13.2	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΜΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	166
13.3	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	169
13.4	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	171
<b>14</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΔΙΑΧΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ</b>	<b>173</b>
14.1	ΔΙΑΧΥΣΗ	173
14.2	ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ	174
<b>15</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>175</b>

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης “Χημεία και Τεχνολογία Περιβάλλοντος” του Τμήματος Χημείας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Το σύνολο των πειραμάτων της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος του Ινστιτούτου Πυρηνικής Τεχνολογίας - Ακτινοπροστασίας του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δρ. Ελένη Φλώρου για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση, τις επιστημονικές συμβουλές και την ηθική συμπαράσταση κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστώ, επίσης, τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχαήλ Σκούλλο για τις πολύτιμες υποδείξεις του σε θέματα χημείας περιβάλλοντος, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. καθηγητές Εμμανουήλ Δασενάκη και Ευάγγελο Γαζή.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Τεχνολόγο Τροφίμων κ. Σταύρο Μιχαλέα για τη μεγάλη βοήθεια, που μου παρείχε στις δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν. Τον ευχαριστώ, επίσης, για την ακούραστη προσφορά της εμπειρίας και της ευρηματικότητας του στα προβλήματα, τα οποία προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστώ την κ. Χρυσούλα Ψωμιάδου για την καθοδήγηση της και το επιστημονικό υπόβαθρο που μου προσέφερε σε θέματα γ- φασματομετρίας, καθώς και για την ψυχολογική στήριξη που μου παρείχε.

Θα ήταν παράληψη μου να μην ευχαριστήσω τις παρασκευάστριες του εργαστηρίου κ. Αδαμαντία Ζαφειροπούλου και κ. Μαρία Λαδοπούλου, καθώς και την ερευνήτρια κ. Χριστίνα Χαλούλου για τη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Ευχαριστώ τους συναδέλφους Αγγελική Καρανάσιου, Στεργιο Βράτολη και Δημήτρη Κρητίδη για τις ευχάριστες στιγμές που περάσαμε στο εργαστήριο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου - Κώστα, Τερέζα, Φρόσω - για την ηθική και υλική συμπαράσταση.

## ΟΡΟΛΟΓΙΑ – ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

1 AMU	Atomic Mass Unit: Το 1/12 της μάζας του ατόμου του $^{12}\text{C}$
1 eV	Electron-Volt: $1.602 \times 10^{-19}$ J
AMP	Ammonium Molybdophosphate $(\text{NH}_4)_3\text{P}(\text{Mo}_3\text{O}_{10})_4$ , (Φωσφομολυβδαινικό Αμμώνιο)
Annihilation	Εξαϋλωση, π.χ. η αντίδραση ύλης - αντιύλης που οδηγεί στην εξαφάνιση μάζας και παραγωγή ισοδύναμης ενέργειας
Background Radioactivity	Ακτινοβολία υποβάθρου
cps	Counts Per Second: Κρούσεις ανά δευτερόλεπτο
C-spanner	Εξάρτημα για σφράγιση και απελευθέρωση του σωλήνα πίεσης της αντλίας
EBq	Exa-Becquerel: $10^{18}$ Bq
Fallout	Ραδιενεργός επίπτωση
Hp Ge Detector	High Purity Germanium Detector: Ανιχνευτής υπερκαθαρού Γερμανίου
Impregnation	Διαδικασία κατά την οποία αποτίθεται το άλας και παγιδεύεται στα φίλτρα
LCD	Liquid Crystal Display: Οθόνη υγρών κρυστάλλων
LD <sub>50</sub>	semi-Lethal Dose: Θανατηφόρος δόση που προκαλεί το θάνατο του 50% των εκτεθειμένων πειραματοζώων
o-ring	Καπάκι αεροστεγούς απομόνωσης του σωλήνα πίεσης της αντλίας
PBq	Peta-Becquerel: $10^{15}$ Bq
Scavenger	Εμποτισμένο φίλτρο που λειτουργεί ως παγίδα για την κατακράτηση του $^{137}\text{Cs}$
1 esu	Electro-Static Unit: $3.336 \times 10^{-10}$ Cb
1 inch	Αγγλική μονάδα μέτρησης του μήκους ίση με 2.54 cm
White Cup	Είδος κυαθίου μέτρησης για γ- φασματομετρία

## ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι:

1. Η εξακρίβωση της οριζόντιας διασποράς και κατακόρυφης κατανομής του  $^{137}\text{Cs}$  σε δυο ημίκλειστες θαλάσσιες λεκάνες χαμηλών βαθών με επιδράσεις από τον αστικό, βιομηχανικό και φυσικό περιβάλλοντα χώρο.  
Πρόσθετος σκοπός είναι η συμπλήρωση της γενικότερης ερευνητικής εικόνας της περιοχής (συμβατική ρύπανση, ωκεανογραφία κλπ) με δεδομένα ραδιενέργειας περιβάλλοντος – ραδιολογικής προστασίας, τα οποία για πρώτη φορά παρατίθενται.
2. Η συγκριτική παράθεση δεδομένων με δυο μεθόδους διαχωρισμού – προσδιορισμού του  $^{137}\text{Cs}$ : η μια με συμβατική χημική επεξεργασία και η άλλη με επι τόπου (*in situ*) εμπλουτισμό του δείγματος και φυσική επεξεργασία. Η εξέταση της συμβατότητας των δυο μεθόδων ως προς την τελική προσδιορισμένη συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  αποτελεί επιπλέον σκοπό της παρούσας. Η επίλυση του προβλήματος ανιχνεύσιμων, με καλή στατιστική, συγκεντρώσεων  $^{137}\text{Cs}$  αποτελεί τον πιλότο συναφών επιδιώξεων, όπως για παράδειγμα ανίχνευση ιχνοστοιχείων, αιωρούμενων σωματιδίων κλπ σε υδάτινα οικοσυστήματα με επι τόπου (*in situ*) εμπλουτισμό δείγματος. Το τελικό προσδοκώμενο αποτέλεσμα είναι η βελτίωση των ορίων ανίχνευσης, η ελαχιστοποίηση των προβλημάτων επιμόλυνσης και των σφαλμάτων μέτρησης.

# ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

## ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ



# 1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

## 1.1 ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΑ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗΝ ΥΛΗ

### 1.1.1 Εισαγωγή

Η παραγωγή ενέργειας κατά τις πυρηνικές διεργασίες διαφέρει από τις άλλες πηγές ενέργειας στο ότι βασίζεται στην έμφυτη αστάθεια του πυρήνα συγκεκριμένων βαρέων στοιχείων, ο οποίος έχει την τάση να διασπάται. Είναι το αντίθετο της πρωτογενούς πηγής ενέργειας, του ηλίου, στον οποίο η ενέργεια παράγεται από την σύντηξη του πυρήνα των ελαφρών ατόμων. Η ενέργεια, η οποία παράγεται σε ένα πυρηνικό αντιδραστήρα, αντλείται από τη δεσμευμένη ενέργεια στον πυρήνα των βαρέων στοιχείων. Μέρος της ενέργειας αυτής μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των πυρηνικών θραυσμάτων. Αυτό γίνεται έκδηλο τελικά με την παραγωγή θερμότητας. Η θερμότητα αναπτύσσεται εξαιτίας των αποτελεσματικών συγκρούσεων των θραυσμάτων με άλλα άτομα. Ασταθή άτομα παράγουν ενέργεια με διάφορους τρόπους, για τους οποίους χρησιμοποιείται ο όρος ακτινοβολία. Οι ακτινοβολίες αλληλεπιδρούν με την ύλη με διάφορους τρόπους παράγοντας πλήθος φαινομένων. Αυτά τα φαινόμενα είναι εκείνα, τα οποία καθιστούν επικίνδυνη την παραγωγή ενέργειας από τα πυρηνικά. Αλλά για να γίνουν κατανοητοί οι λόγοι είναι απαραίτητο να κατανοηθεί η φύση των πυρήνων των ατόμων<sup>1</sup>.

### 1.1.2 Ατομικά είδη και συμπεριφορά

Καταρχήν η ύλη στοιχειοθετείται από άτομα. Κάθε άτομο αποτελείται από ένα πυρήνα, ο οποίος περιέχει όλη τη μάζα του κι έχει διάμετρο περίπου  $10^{-12}$  cm και περιβάλλεται από ηλεκτρόνια. Συμπεριλαμβανομένων των τροχιακών ηλεκτρονίων, το άτομο έχει διάμετρο περίπου  $10^{-8}$  cm. Υπάρχουν δυο κύρια πυρηνικά σωματίδια (νουκλεόνια), τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια και τα ουδέτερα νετρόνια, τα οποία έχουν παραπλήσια μάζα. Ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα ( $Z$ ) είναι χαρακτηριστικός για το κάθε στοιχείο, ωστόσο, κάθε άτομο ενός στοιχείου μπορεί να έχει διαφορετικό αριθμό νετρονίων ( $N$ ) στον πυρήνα του. Η παρουσία των νετρονίων είναι εκείνη, η οποία παρέχει τη συνεκτική δύναμη που συγκρατεί τον πυρήνα. Στην αντίθετη περίπτωση θα γινόταν αυθόρμητη σχάση, εξαιτίας των απωστικών ηλεκτρικών δυνάμεων των ομώνυμα φορτισμένων σωματιδίων. Αυτή η συνεκτική δύναμη, η πυρηνική δύναμη, δρα σε μια εξαιρετικά μικρή απόσταση, της τάξης των  $2 - 3 \times 10^{-13}$  cm. Εξαιτίας της δράσης της

πυρηνικής δύναμης σε τόσο μικρή απόσταση σε σχέση με την ηλεκτρική δύναμη, είναι λογικό ότι τα νετρόνια μπορούν να αλληλεπιδρούν μόνο με εκείνα τα νουκλεόνια, τα οποία είναι απολύτως γειτονικά, ενώ τα πρωτόνια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ακόμη κι αν βρίσκονται σε απόσταση μέσα στον πυρήνα. Για αυτό το λόγο ο αριθμός των νετρονίων στους πυρήνες ελαττώνεται πιο απότομα από ότι ο αριθμός των πρωτονίων. Ο πυρήνας του πιο ελαφρού ατόμου, του υδρογόνου, περιέχει ένα πρωτόνιο και ο πυρήνας του αμέσως επόμενου ελαφρού ατόμου, του ηλίου, περιέχει 2 πρωτόνια και 2 νετρόνια. Όσο ο αριθμός των πρωτονίων αυξάνει, το στοιχείο μπορεί να έχει πυρήνα με διαφορετικούς αριθμούς νετρονίων. Για παράδειγμα, το μαγνήσιο έχει 12 πρωτόνια, όμως ο πυρήνας του μπορεί να έχει 12, 13 ή 14 νετρόνια. Ο μαζικός αριθμός (A) των τριών αυτών πυρήνων του μαγνησίου (δηλαδή το σύνολο των πρωτονίων και νετρονίων,  $A = Z + N$ ) είναι αντίστοιχα 24, 25 ή 26 και συμβολίζεται ως  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{25}\text{Mg}$  και  $^{26}\text{Mg}$ . Τα τρία αυτά είδη του ίδιου στοιχείου καλούνται ισότοπα. Ο ουσιαστικά συνώνυμος όρος νουκλίδιο χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα ξεχωριστό πυρηνικό είδος, δηλαδή ένα άτομο, το οποίο χαρακτηρίζεται από μαζικό και ατομικό του αριθμό, καθώς και από την ενεργειακή κατάσταση του πυρήνα του. Ισότοπα του ίδιου στοιχείου δεν μπορεί να διακριθούν χημικά, διότι έχουν ακριβώς την ίδια ηλεκτρονική δομή, ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων – πράγμα το οποίο καθορίζει τη χημική συμπεριφορά του ατόμου – ο οποίος είναι ίδιος με αυτόν των πρωτονίων του πυρήνα. Τα ισότοπα του ίδιου στοιχείου δεν είναι ισοδύναμα στη φύση. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του φυσικού μαγνησίου το 78.70% κβ είναι  $^{24}\text{Mg}$ , το 11.17% κβ είναι  $^{26}\text{Mg}$  και το υπόλοιπο 10.13% κβ είναι  $^{25}\text{Mg}$ .

Όσο ο ατομικός αριθμός αυξάνει, ο αριθμός των νετρονίων υπερβαίνει των αριθμό των πρωτονίων. Σε ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 83 ο πυρήνας γίνεται ασταθής. Ο ασταθής πυρήνας σχάζεται με ένα χαρακτηριστικό ποσοστό σχάσης, κι επειδή η σχάση συνοδεύεται από εκπομπή διαφόρων ειδών ακτινοβολίας, αυτά τα ασταθή ισότοπα καλούνται ραδιοϊσότοπα, ή όταν πρόκειται για ένα συγκεκριμένο άτομο, ραδιονουκλίδια. Είναι εκπληκτικό πως αυτός ο υπερβολικά μεγάλος αριθμός νετρονίων καθιστά τον πυρήνα ασταθή. Αυτό εξηγείται ως εξής: όταν οι ενεργειακές στάθμες των νετρονίων του πυρήνα είναι συμπληρωμένες, ενώ των πρωτονίων όχι, στον πυρήνα είναι δυνατό να συμβαίνει μια εσωτερική επαναδιευθέτηση, κατά την οποία ένα νετρόνιο μετατρέπεται σε πρωτόνιο εκπέμποντας ένα ηλεκτρόνιο. Το πρωτόνιο εν συνεχεία ταξινομείται κατά ζεύγη με κάποιο άλλο πρωτόνιο σε μια μη συμπληρωμένη ενεργειακή στάθμη. Ο ακριβής τύπος της ραδιενεργού διάσπασης, η οποία θα συμβεί εξαρτάται από τον τύπο της πυρηνικής αστάθειας, δηλαδή από το αν το ποσοστό των νετρονίων / πρωτόνια είναι πολύ υψηλό ή πολύ χαμηλό.

Η ραδιενεργός διάσπαση είναι τυχαία διαδικασία. Η πιθανότητα να διασπαστεί ένα άτομο σε χρόνο  $\Delta t$  είναι συνάρτηση μόνο του χρόνου παρατηρήσεως. Αν έχουμε δείγμα

μεγάλου αριθμού ατόμων δεν είναι δυνατό να προβλεφτεί ποιο από όλα θα διασπαστεί, μπορούν όμως να περιγραφούν τα χαρακτηριστικά διάσπασης ολόκληρου του δείγματος. Ο ρυθμός ραδιενεργού διασπάσεως ενός δείγματος καλείται ενεργότητα  $A$ . Παριστάνει τον αριθμό των ατόμων του μητρικού νουκλιδίου που διασπώνται στη μονάδα του χρόνου. Εκφράζεται σε διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο (desintegration per second, dps)<sup>2</sup>.

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N, \text{ όπου } N \text{ ο αριθμός των μητρικών ατόμων η σταθερά διάσπασης}$$

$$\Rightarrow -\frac{dN}{dt} = \lambda t \Rightarrow -\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_{t_0}^t \lambda dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Επειδή  $A$  ανάλογο με το  $N$  γράφουμε:  $A = A_0 e^{-\lambda t}$  όπου  $A_0 = \lambda N_0$ <sup>3</sup>

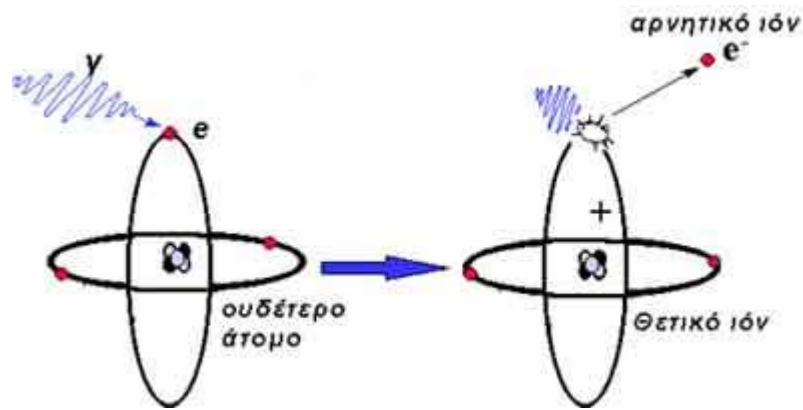
### **1.1.3 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – ύλης. Ιοντίζουσες & μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες**

Τα υποατομικά σωματίδια, τα οποία εκπέμπονται από ραδιονουκλίδια, κινούνται σε εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες. Η κινητική ενέργεια ενός σωματιδίου εξαρτάται από τη μάζα  $m$  και την ταχύτητα του  $V$ , η οποία είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός.

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2$$

Συνεπώς, τα μικρότερα σωματίδια πρέπει να αναπτύσουν μεγαλύτερη ταχύτητα για να έχουν την ίδια κινητική ενέργεια με τα μεγαλύτερα σωματίδια. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κινείται με την ταχύτητα του φωτός. Ενώ πρόκειται για κύμα, έχει επίσης και σωματιδιακή φύση, γιατί αποτελείται από κβάντα ή φωτόνια ενέργειας. Η ενέργεια είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος της ακτινοβολίας.

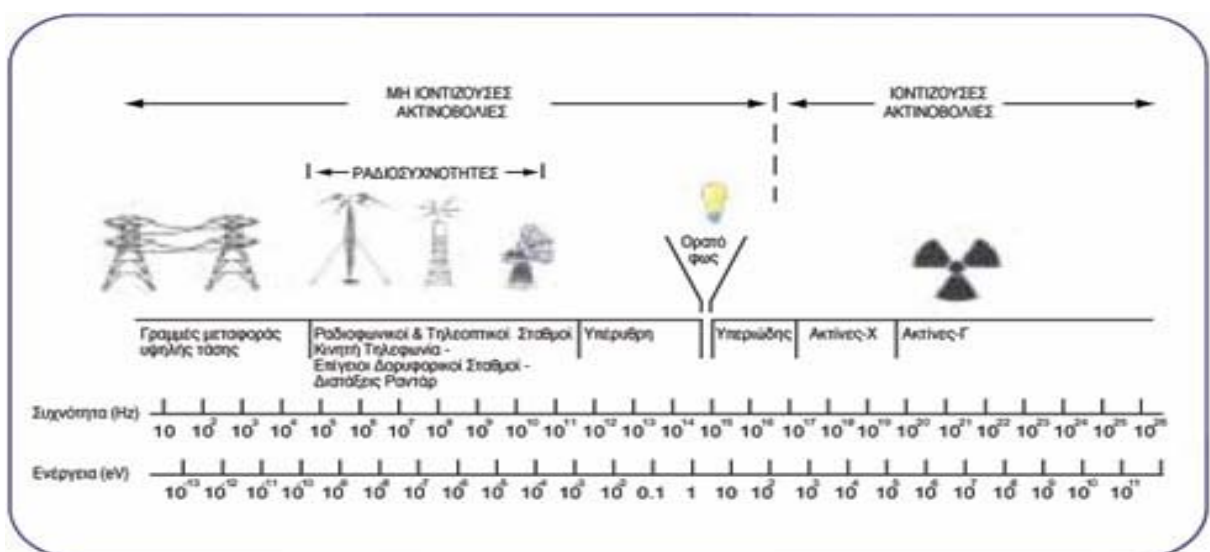
Συγκρούσεις μεταξύ των εκπεμπόμενων σωματιδίων και του πυρήνα άλλων ατόμων είναι σπάνιες και οι επιδράσεις τους σε αυτά οφείλονται στην αλληλεπίδραση με τα ηλεκτρικά πεδία των ατόμων. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο περάσει κοντά από ένα άτομο, μπορεί να μεταφερθεί ενέργεια από το σωματίδιο στο τροχιακό ηλεκτρόνιο. Με τον τρόπο αυτό το τροχιακό ηλεκτρόνιο μεταφέρεται σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη μέσα στο άτομο, από την οποία μεταπίπτει στην αρχική κατάσταση, απελευθερώνοντας την αποκτούμενη ενέργεια με εκπομπή φωτονίων. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως διέγερση και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία εκπέμπεται, εξαρτάται από τις σχέσεις της ενέργειας μέσα στο άτομο, από το οποίο το ηλεκτρόνιο διεγέρθηκε. Είναι δυνατό το ηλεκτρόνιο να αποκτήσει αρκετή ενέργεια, ώστε να εγκαταλείψει εντελώς το άτομο, το οποίο φορτίζεται θετικά και η διαδικασία αυτή λέγεται ιοντισμός (Εικόνα 1.1)<sup>4</sup>.



Εικόνα 1.1: Ιοντισμός ουδέτερου ατόμου από προσβολή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Μεταξύ των αιτιών, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν ιοντισμό είναι, όπως προαναφέρθηκε, και οι πυρηνικές ακτινοβολίες, οι οποίες έχουν υψηλή ενέργεια, οι οποίες για την ικανότητά τους αυτήν αποκαλούνται ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιλαμβάνει μια ευρεία περιοχή ενεργειών (Εικόνα 1.2). Το φάσμα διαιρείται σε δυο κύριες κατηγορίες: στη μη ιοντίζουσα και στην ιοντίζουσα ακτινοβολία. Η ακτινοβολία, η οποία έχει αρκετή ενέργεια ώστε να μετακινεί τα άτομα ή να προκαλεί δονήσεις, αλλά όχι να τα αλλάζει χημικά, είναι γνωστή ως μη ιοντίζουσα ακτινοβολία. Παραδείγματα αυτής της ακτινοβολίας είναι τα ηχητικά κύματα, το ορατό φως, το υπέρυθρο, τα μικροκύματα κλπ. Περιλαμβάνουν εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες και άρα μεγάλα μήκη κύματος. Για παράδειγμα οι ραδιοσυχνότητες έχουν μήκη κύματος μεταξύ 1 – 100 μέτρα και συχνότητες 1 – 100 εκατομμύρια Hertz<sup>5</sup>.



Εικόνα 1.2: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Η ακτινοβολία, που ονομάζεται ιοντίζουσα, περικλείει αρκετή ενέργεια, ώστε να μπορεί να διασπά χημικούς δεσμούς. Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί τις ιδιότητες της ιοντίζουσας ακτινοβολίας για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, για να καταστρέψει τα καρκινικά κύτταρα, καθώς και σε πολλές άλλες βιομηχανικές διεργασίες<sup>6</sup>. Κάθε ιοντισμός παράγει περίπου 33 eV ενέργεια και πολλά υλικά στην περιοχή γύρω από το άτομο απορροφούν την ενέργεια αυτή. Εν συγκρίσει με άλλους τύπους ραδιενέργειας, που μπορούν να απορροφούνται, η ιοντίζουσα ακτινοβολία αποθηκεύει μεγάλο ποσοστό της ενέργειας σε πολύ μικρή περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, τα 33 eV είναι αρκετή ενέργεια ώστε να διασπαστεί ο απλός δεσμός άνθρακα - άνθρακα. Υπάρχουν τρία είδη ιοντίζουσας ακτινοβολίας, αυτή που αποτελείται από ακτίνες α-, β- και γ-<sup>7</sup>.

#### **1.1.4 Χρόνος υποδιπλασιασμού – Μέσος χρόνος ζωής**

Χρόνος υποδιπλασιασμού καλείται ο χρόνος που απαιτείται για να διασπαστούν τα μισά από ένα στατιστικά μεγάλο αριθμό ραδιενεργών ατόμων που περιέχονται σε ένα δείγμα<sup>8</sup>. Αν στη σχέση (1) θέσουμε όπου  $t = t_{1/2}$  και  $N = N_0/2$  θα έχουμε:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln \frac{1}{2} = \lambda t_{1/2} \Rightarrow t_{1/2} = 0.693 \lambda$$

Ο μέσος χρόνος ζωής είναι ο χρόνος που απαιτείται για ένα άτομο ώστε να διασπαστεί και είναι λίγο μεγαλύτερος του χρόνου υποδιπλασιασμού  $t_{1/2}$ :

$$T = \frac{1}{\lambda}$$

## **1.2 ΤΡΟΠΟΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥ ΔΙΑΣΠΑΣΕΩΣ**

Οι τρεις συνηθέστεροι τρόποι ραδιενεργού διασπάσεως είναι η διάσπαση α-, από την οποία παράγονται α- σωματίδια (α- ακτινοβολία), η διάσπαση β- (β<sup>-</sup> ή β<sup>+</sup> διάσπαση), από την οποία παράγονται β- σωματίδια (β- ακτινοβολία) και η διάσπαση γ-, όπου παράγονται ακτίνες γ- (γ- ακτινοβολία). Εκτός των γνωστών τρόπων διάσπασης σπανιότερα είναι δυνατό να συμβούν κι άλλοι, η φύση των οποίων εξηγείται παρακάτω.

### **1.2.1 α- Διάσπαση**

Είναι τύπος ιοντίζουσας ακτινοβολίας, η οποία εκτοξεύεται από τον πυρήνα μερικών ασταθών ατόμων. Παράγονται μεγάλα υποατομικά θραύσματα, που περιέχουν 2

πρωτόνια και 2 νετρόνια κι ονομάζονται α- σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά ανακαλύφθηκαν από τον Ernest Rutherford το 1899. Ένα α- σωματίδιο είναι πανομοιότυπο με τον πυρήνα του He, ο οποίος έχει 2 πρωτόνια και 2 νετρόνια. Είναι σχετικά βαρύ, υψηλής ενέργειας σωματίδιο με θετικό φορτίο +2, προερχόμενο από τα 2 πρωτόνια. Τα α- σωματίδια κινούνται στον αέρα με ταχύτητα περίπου ίση με το 1/12 της ταχύτητας του φωτός, εξαρτώμενη κυρίως από την ενέργεια που περικλείει το σωματίδιο. Τα σωματίδια α- εκπέμπονται από βαρείς πυρήνες, λόγω φαινομένων σήραγγος. Τα άτομα που εκπέμπουν α- σωματίδια τείνουν να είναι πολύ μεγάλα (έχουν μεγάλους ατομικούς αριθμούς). Με μερικές εξαιρέσεις, τέτοια άτομα έχουν ατομικούς αριθμούς τουλάχιστο 82 (μόλυβδος) και μπορεί να είναι είτε φυσικά, είτε τεχνητά (Πίνακας 1.1).

Πίνακας 1.1: Παραδείγματα ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν α- σωματίδια

Εκπομπή α-Σωματιδίων	Ατομικός Αριθμός
Αμερίκιο-241	95
Πλουτώνιο-236	94
Ουράνιο-238	92
Θόριο-232	90
Ράδιο-226	88
Ραδόνιο-222	86
Πολώνιο-210	84

Ο πυρήνας βρίσκεται σε μια ασταθή ενεργειακή κατάσταση. Τότε συμβαίνει μια εσωτερική μετατροπή και από τον πυρήνα εκτοξεύεται ένα α- σωματίδιο και παραμένει ένα προϊόν διάσπασης. Το μητρικό άτομο έχει χάσει 2 πρωτόνια και 2 νετρόνια. Το θυγατρικό (προϊόν διάσπασης) έχει υποστεί μεταστοιχείωση<sup>9</sup>. Για παράδειγμα, το  $^{263}_{106}\text{Sg}$  κατά τη ραδιενεργό διάσπαση του εκπέμπει α- ακτινοβολία και μετατρέπεται στο  $^{259}_{104}\text{Rf}$  (Εικόνα 1.3).

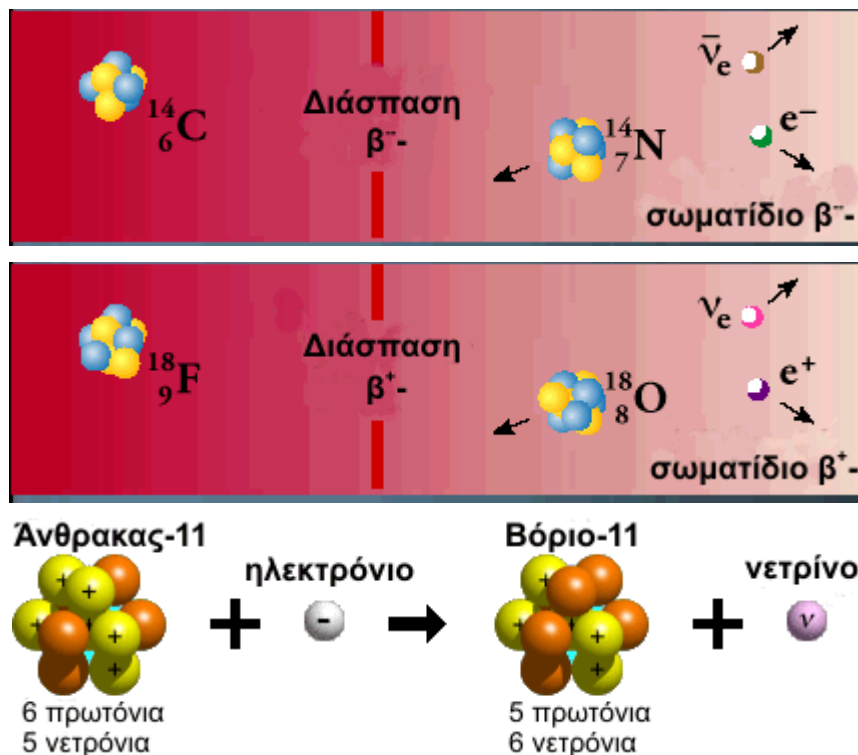


Εικόνα 1.3: Παράδειγμα α- διάσπασης

### 1.2.2 β- Διάσπαση

Είναι κάθε διεργασία διασπάσεως, κατά την οποία ο μαζικός αριθμός (A) του νουκλιδίου παραμένει σταθερός, ενώ ο ατομικός αριθμός (Z) μεταβάλλεται. Από τη β- διάσπαση παράγονται υποατομικά σωματίδια εκτοξευμένα από τον πυρήνα κάποιων ραδιενεργών ατόμων, λόγω ασθενών αλληλεπιδράσεων. Είναι ισοδύναμα προς τα ηλεκτρόνια και η διαφορά τους έγκειται στο ότι τα β- σωματίδια προέρχονται από τον πυρήνα, ενώ τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό μέρος του ατόμου. Ανακαλύφθηκαν από τον Henry Becquerel το 1900, ο οποίος και απέδειξε ότι είναι ταυτόσημα με τα ηλεκτρόνια. Έχουν φορτίο -1 και ατομική μάζα 549 εκατομμυριοστά του AMU, ή αλλιώς 1/2000 της μάζας του πρωτονίου ή του νετρονίου. Η ταχύτητα τους ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό, ανάλογα με την ενέργεια τους. Είναι σε θέση να καταστρέφουν τα ζωντανά κύτταρα, προσπίπτοντας με μεγάλη ταχύτητα σε αυτά και διασπώντας τους χημικούς δεσμούς. Εκπομπές β- σωματιδίων επιτυγχάνονται όταν το ποσοστό 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. Η διαδικασία αυτή μειώνει τον αριθμό των νετρονίων και αυξάνει τον αριθμό των πρωτονίων σε ένα και άρα μετασχηματίζει το ραδιονουκλίδιο σε ένα διαφορετικό στοιχείο. Συχνά, η εκπομπή β- σωματιδίων συνδυάζεται με την εκπομπή γ- ακτινοβολίας και η περίσσεια της ενέργειας στον πυρήνα, από την εκπομπή β- σωματιδίων, αποβάλλεται με τη μορφή γ- ακτινοβολίας. Παραδείγματα ραδιονουκλιδίων, που δίνουν β- διάσπαση αποτελούν η διάσπαση του  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$  κλπ.

Διακρίνονται τρεις τρόποι β- διάσπασης, η β<sup>-</sup> διάσπαση, η β<sup>+</sup> διάσπαση και η διάσπαση με σύλληψη ηλεκτρονίου. Κατά τη β<sup>-</sup> διάσπαση εκπέμπεται από τον πυρήνα ένα αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο (ονομάζεται β<sup>-</sup> σωματίδιο) και ένα αντινεutrino (αντιλεπτόνιο) (Εικόνα 1.4). Κατά τη β<sup>+</sup> διάσπαση εκπέμπονται από τον πυρήνα θετικά φορτισμένα ηλεκτρόνια (ποζιτρόνια), τα οποία ονομάζονται β<sup>+</sup> σωματίδια και νεutrino (Εικόνα 1.4). Τέλος, η σύλληψη ηλεκτρονίου είναι ένας τρόπος β- διάσπασης, κατά τον οποίο ένα ηλεκτρόνιο των ατομικών τροχιακών συλλαμβάνεται από ένα διηγερμένο πυρήνα. Εκπέμπονται ακτίνες-X ή ηλεκτρόνια Auger και νεutrino (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4: Τρόποι β- διάσπασης

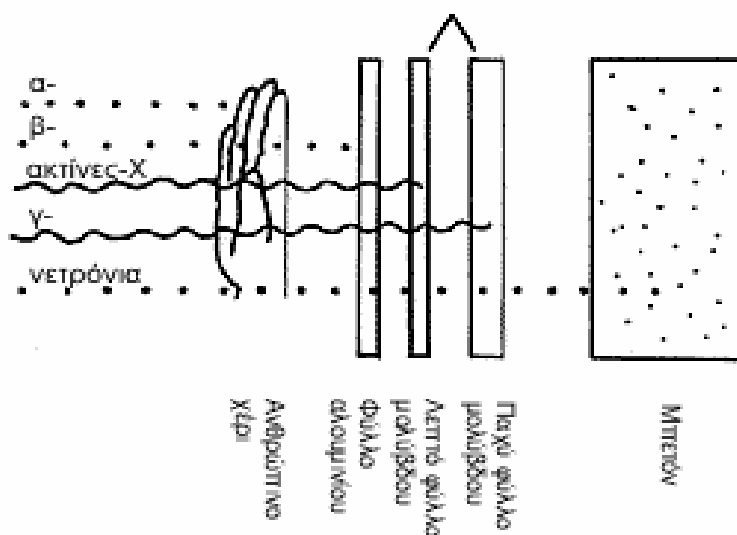
### 1.2.3 γ- Διάσπαση

Η ακτινοβολία γ- ανακαλύφθηκε από τον Henry Becquerel το 1896, από κάποια ορυκτά του ουρανίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η γ- διάσπαση δεν προκαλεί καμιά μεταβολή, ούτε στον Z, ούτε στον A του πυρήνα. Κατά τη γ- διάσπαση εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, καθώς ένας πυρήνας μεταπίπτει από ανώτερη ενεργειακή κατάσταση σε κατώτερη ή στη βασική κατάσταση (αποδιέγερση) (Εικόνα 1.5). Πρόκειται για φωτόνια υψηλής ενέργειας τα οποία αποτελούν τις ακτίνες γ- του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η γ- ακτινοβολία είναι πολύ υψηλής ενέργειας ιοντίζουσα ακτινοβολία. Τα γ-σωματίδια έχουν περίπου 10000 φορές μεγαλύτερη ενέργεια από τα φωτόνια του ορατού φωτός. Δεν έχουν μάζα, ούτε ηλεκτρικό φορτίο, όμως περιλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και ορμή. Εξαιτίας της μεγάλης τους ενέργειας κινούνται με την ταχύτητα του φωτός και μπορούν να διανύσουν εκατοντάδες χιλιάδες μέτρα πριν ξοδέψουν την ενέργεια αυτή. Διαπερνούν πολλά είδη υλικών συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπινου ιστού και χρησιμοποιούνται πολύ πυκνά υλικά, όπως ο μόλυβδος, για να σταματήσουν οι ακτίνες γ- (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.5: Παράδειγμα γ- διάσπασης

Οι ακτίνες γ- και οι ακτίνες-Χ , όπως και το ορατό, το υπέρυθρο ή το υπεριώδες είναι μέρη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Παρόλο που οι ακτίνες-Χ και γ- προκαλούν περίπου τις ίδιες βλάβες, διαφέρουν ως προς την προέλευση. Οι ακτίνες γ- προέρχονται από τον πυρήνα του ατόμου, ενώ οι ακτίνες-Χ προέρχονται από τα ηλεκτρικά πεδία, που περιβάλλουν τον πυρήνα του ατόμου. Παραδείγματα ραδιοουκιδίων, που εκπέμπουν ακτινοβολία γ- είναι το  $^{137}\text{Cs}$ , το  $^{99}\text{Tc}$  κ.α. (Πίνακας 1.1).



Εικόνα 1.6: Διαπερατότητα των α-, β- και γ- σωματιδίων

Πίνακας 1.2: Παραδείγματα ραδιονουκλιδίων, που εκπέμπουν ακτινοβολία γ-

Όνομα	Ατομικός Αριθμός	Τύπος ακτινοβολίας		
		α-	β-	γ-
Αμερίκιο-241	95	•		•
<b>Καίσιο-137</b>	<b>55</b>		•	•
Κοβάλτιο-60	27		•	•
Ιώδιο-129 &-131	53		•	•
Πλουτώνιο	94	•	•	•
Τεχνητίο-99	43		•	•
Θόριο	90	•		•
Ουράνιο	92	•		•

#### 1.2.4 Άλλα είδη ραδιενεργών διασπάσεων

Άλλος τρόπος ραδιενεργού διάσπασης είναι η διάσπαση με εκπομπή νετρονίου, κατά την οποία ένα νετρόνιο εκπέμπεται από τον πυρήνα (παράδειγμα ισοτόπου που εκπέμπει νετρόνια κατά τη διάσπαση του είναι το  $^{13}\text{Be}$ ). Επίσης, άλλος τρόπος διάσπασης είναι η διάσπαση με εκπομπή πρωτονίου, όπου ένα πρωτόνιο εκπέμπεται από τον πυρήνα (παράδειγμα ισοτόπου που εκπέμπει νετρόνια κατά τη διάσπαση του είναι το  $^{53\text{m}}\text{Co}$ ). Άλλοι τρόποι, με τους οποίους μπορεί να διασπαστεί ένας ραδιενεργός πυρήνας είναι η διάσπαση με εκπομπή δύο πρωτονίων (πχ  $^{26}\text{P}$ ,  $^{22}\text{Al}$ ), η διάσπαση με εκπομπή  $^{14}\text{C}$  και άλλων συσσωματωμάτων σωματιδίων (clusters) (πχ  $^{222-224}\text{Ra}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ), η διπλή β- διάσπαση, όπου εκπέμπονται δύο β<sup>-</sup> σωματίδια (πχ  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ) η διδυμη γένεση, όπου παράγεται ένα β<sup>+</sup>- κι ένα β<sup>-</sup> σωματίδιο (πχ  $^{16\text{m}}\text{O}$ ) και τέλος η διάσπαση με αυθόρμητη σχάση, η οποία είναι αυθόρμητη διεργασία, που οδηγεί στην παραγωγή δύο θυγατρικών πυρήνων με σύγχρονη εκπομπή νετρονίων (πχ  $^{252}\text{Cf}$ ).

### 1.3 ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ

#### 1.3.1 Ενεργότητα

Η ενεργότητα μιας πηγής ακτινοβολίας ορίζεται ως ο αριθμός των διασπάσεων, που λαμβάνουν χώρα μέσα σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Αρχικά ως μονάδα ενεργότητας μιας πηγής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε το Curie, το οποίο όμως γρήγορα απορρίφθηκε, εξαιτίας του ότι στη φύση δεν συναντώνται τόσο υψηλά επίπεδα ακτινοβολιών. Η μονάδα, η οποία χρησιμοποιείται σήμερα είναι το Becquerel (Πίνακας 1.3).

$$1 \text{ Curie (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Becquerel (Bq)} = 1 \text{ dps}$$

Πίνακας 1.3: Τάξεις μονάδας Becquerel

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΟΡΙΣΜΟΣ
YOTTA - BECQUEREL	YBq	$10^{24}$
ZETTA - BECQUEREL	ZBq	$10^{21}$
EXA - BECQUEREL	Ebq	$10^{18}$
PETA - BECQUEREL	PBq	$10^{15}$
TERRA - BECQUEREL	TBq	$10^{12}$
GIGA - BECQUEREL	GBq	$10^9$
MEGA - BECQUEREL	MBq	$10^6$
KILO - BECQUEREL	KBq	$10^3$
HECTO - BECQUEREL	HBq	$10^2$
DECA - BECQUEREL	daBq	$10^1$
DECI - BECQUEREL	DBq	$10^{-1}$
CENTI - BECQUEREL	CBq	$10^{-2}$
MILLI - BECQUEREL	MBq	$10^{-3}$
MICRO - BECQUEREL	MBq	$10^{-6}$
NANO - BECQUEREL	NBq	$10^{-9}$
PICO - BECQUEREL	PBq	$10^{-12}$
FEMTO - BECQUEREL	FBq	$10^{-15}$
ATTO - BECQUEREL	ABq	$10^{-18}$
ZEPTO - BECQUEREL	ZBq	$10^{-21}$
YOCTO - BECQUEREL	yBq	$10^{-24}$

### **1.3.2 Έκθεση**

Εκτός από τις μονάδες ενεργότητας χρησιμοποιείται πολλές φορές και ο όρος έκθεση σε ακτινοβολία. Ο όρος έκθεση  $X$  χρησιμοποιείται για να δοθεί το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο (ιοντισμός), που παράγεται σε μια δεδομένη μάζα ή όγκο αέρα και δίνεται από τον τύπο  $X = dQ/dm$ , όπου  $Q$  το φορτίο και  $m$  η μάζα. Στο SI η έκθεση μετριέται σε Coulombs/kilogram (C/kg). Μονάδα έκθεσης σε ακτινοβολία είναι το Roentgen (R). Ορίζεται ως η ποσότητα της ακτινοβολίας- $X$  ή  $\gamma$ -, που θα παρήγαγε μια ηλεκτροστατική μονάδα (esu) ηλεκτρικού φορτίου αμφοτέρων προσήμων σε όγκο  $1\text{cm}^3$  ξηρού αέρα, σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας<sup>10</sup>. Σήμερα ορίζεται ακριβώς:  $1\text{ R} = 2.58 \times 10^{-4}\text{ Bq/kg}$ . Ο αριθμός των Roentgen που παράγεται από μια ραδιενεργό πηγή μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας διάταξη θαλάμων ιονισμού, μια από τις παλιότερες συσκευές ανιχνεύσεως ακτινοβολίας. Πάντως, επειδή το Roentgen είναι μονάδα έκθεσης κι όχι δόσεως ακτινοβολίας δεν παρέχει επακριβείς πληροφορίες για την ποσότητα ακτινοβολίας, που πρακτικά απορροφήθηκε από το μέσο, ούτε για τα αποτελέσματα της επιδράσεως της. Η έκθεση διακρίνεται σε εξωτερική, όταν οφείλεται σε πηγές που βρίσκονται εκτός του σώματος και σε εσωτερική έκθεση, η οποία οφείλεται σε πηγές που έχουν εισέλθει στον οργανισμό μέσω της αναπνευστικής και πεπτικής οδού. Το σύνολο της εσωτερικής κι εξωτερικής έκθεσης αποτελεί την ολική έκθεση.

### **1.3.3 Δόση ακτινοβολίας**

Η δόση αναφέρεται στην ποσότητα ενέργειας, που προσδίδεται σε ένα μέσο από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Στο SI η δόση μετριέται σε Joules/kilogram (J/kg). Η παραδοσιακή μονάδα της δόσεως ακτινοβολίας είναι το rad. Ένα rad ορίζεται ως η δόση οποιουδήποτε είδους ακτινοβολίας, η οποία αποδίδει ενέργεια 0.01 Joule ανά κιλό απορροφούσης ύλης<sup>11</sup>.

$$1\text{ rad} = 10^{-2}\text{ j/kg}$$

Η νεότερη μονάδα της απορροφούμενης δόσεως στο Διεθνές Σύστημα (SI) είναι το Gray (Gy), που ορίζεται ως η ποσότητα της ακτινοβολίας που αποδίδει ενέργεια ενός Joule ανά κιλό απορροφούσης ύλης.

$$1\text{ Gy} = 1\text{ j/kg}$$

$$\text{Άρα, } 1\text{ Gy} = 100\text{ rad}$$

Είναι σημαντικό να θυμάται κανείς ότι το Gray και το rad είναι μονάδες δόσεως, σε αντίθεση με το Rontgen που είναι μέτρο της έκθεσης ή της έντασης πεδίου ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει απλή σχέση μεταξύ του Rontgen από τη μια και του Gray και rad από την άλλη.

#### **1.3.4 Ενεργό ισοδύναμο δόσης**

Παρόλο που το rad είναι πιο χρήσιμο από το Rontgen στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων της επίδρασης ακτινοβολίας, δεν παρέχει όλη την απαραίτητη πληροφόρηση. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι τα φαινόμενα που προκύπτουν από την απορρόφηση ακτινοβολίας διαφέρουν κατά πολύ εξαρτώμενα από το είδος της ακτινοβολίας, η οποία αποδίδει την ενέργεια. Η σοβαρότητα της μοριακής βλάβης, που προκαλείται, είναι άμεσα συνδεδεμένη με το βαθμό ιοντισμού, τον οποίο παράγει η ακτινοβολία στο βιολογικό ιστό. Μια μονάδα, η οποία επίσης χρησιμοποιείται είναι η γραμμική μετάδοση ενέργειας (Linear Energy Transfer-LET) και ορίζεται ως ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας σε μια συγκεκριμένη περιοχή της ύλης.

$$LET = \frac{dE_{\text{απορρ.}}}{dx}$$

Η μονάδα που χρησιμοποιείται συχνότερα από τους φυσικούς για τη μέτρηση της LET είναι το keV/μm. Όσο μεγαλύτερη είναι η LET της ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανή βλάβη η οποία μπορεί να προκληθεί σε βιολογικούς ιστούς. Η τιμή της LET για τα τρία είδη της ακτινοβολίας είναι διαφορετική. Συγκρίνοντας σωματίδια και ακτινοβολίες παρόμοιας ενέργειας καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ακτινοβολία α- μιας συγκεκριμένης εμβέλειας θα προκαλέσει μεγαλύτερη βιολογική βλάβη από ότι τα άλλα δύο είδη ακτινοβολίας. Συνεπώς, ραδιονουκλίδια, που εκπέμπουν ακτινοβολία α- είναι βιολογικώς περισσότερο βλαβερά, όταν προσληφθούν και ενσωματωθούν σε εσωτερικούς ιστούς. Επειδή όμως τα σωματίδια α- παρουσιάζουν μικρή διεισδυτική ικανότητα, η θωράκιση από αυτά είναι εύκολη. Δεν διαπερνούν την επιδερμίδα κι έτσι δεν είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα όσον αφορά στην εξωτερική έκθεση. Από την άλλη, οι ακτίνες γ- προκαλούν τη μικρότερη βιολογική βλάβη, αλλά επειδή παρουσιάζουν μεγάλη διεισδυτική ικανότητα από τα σωματίδια α- και β- απαιτούν μεγάλη προστατευτική θωράκιση. Άλλα είδη ακτινοβολίας, τα οποία πρέπει να προβλεφθούν είναι τα φορτισμένα σωματίδια υψηλής ενέργειας (χαμηλή διεισδυτικότητα - υψηλή τιμή LET), που προέρχονται κυρίως από την κοσμική ακτινοβολία και τα νετρόνια, τα οποία εξαιτίας του ότι δεν έχουν ηλεκτρικό φορτίο παρουσιάζουν μεγάλη διεισδυτικότητα και άρα βιολογική επικινδυνότητα.

Επειδή ίδιες δόσεις διαφόρων τύπων ακτινοβολίας είναι πιθανό να μην εμφανίζουν τα ίδια βιολογικά αποτελέσματα, αναφέρεται ενδεικτικά η σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα (Relative Biological Effectiveness – RBE), που ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας ακτίνων-Χ ή γ- ενέργειας 200 keV, ως προς την ποσότητα οποιασδήποτε άλλης ακτινοβολίας, που απαιτείται για την παραγωγή συγκεκριμένου βιολογικού αποτελέσματος. Τέλος, ορίζεται ο συντελεστής ποιότητας (Quality Factor – Q), ο οποίος σχετίζεται με το LET και το ισοδύναμο δόσης (Πίνακας 1.4, Οι αριθμοί στις παρενθέσεις δίνουν τις πιο πρόσφατες τιμές, όπως προτάθηκαν από την NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements/USA))<sup>12</sup>.

Πίνακας 1.4: Παραδείγματα τιμών LET

LET (keV/μm)	Q	Ακτινοβολία	Q
3.5	1	Ακτίνες-Χ ή -γ	1
3.5-7	1-2	Ακτίνες-β	1
7-23	2-5	Θερμικά νετρόνια	2 (5)
23-53	5- 10	Ταχεία Νετρόνια	10 (20)
53-175	10- 20	Πρωτόνια	10 (20)
		Σωματίδια-α	20

Οι έννοιες του συντελεστή ποιότητας και της δόσεως χρησιμοποιούνται στον ορισμό του rem, που είναι η παραδοσιακή μονάδα μέτρησης του ισοδυνάμου δόσεως (Dose Equivalent – H). Είναι μονάδα που χρησιμοποιείται από τους υγιοφυσικούς στη συζήτηση των επιπτώσεων της ακτινοβολίας και είναι η απορροφούμενη δόση πολλαπλασιασμένη με το συντελεστή ποιότητας.

$$\text{Ισοδύναμο δόσεως σε rem} = \text{Δόση σε rad} \times Q$$

$$\text{ή} \quad H_{rem} = rad \times Q$$

Η νεότερη μονάδα στο Διεθνές Σύστημα (SI) είναι το Sievert (Sv) που ορίζεται ως:

$$\text{Ισοδύναμο δόσεως σε Sievert} = \text{Δόση σε Gray} \times Q$$

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

Για να κατανοηθεί το γεγονός ότι η ίδια απορροφούμενη δόση δεν συνεπάγεται αναγκαστικά και την ίδια βιολογική δράση, αρκεί να υπολογίσει κανείς το ισοδύναμο δόσης για 10 mrad ακτινοβολίας  $\gamma$ -,  $\alpha$ - και θερμικών νετρονίων. Από τον Πίνακα 1.3 βρίσκεται ότι οι τιμές του συντελεστή ποιότητας είναι αντίστοιχα 1, 20 και 2. Οπότε:

Ακτινοβολία  $\gamma$ -:  $10 \text{ mrad} \times 1 = 10 \text{ mrem} = 0.1 \text{ mSv}$

Θερμικά νετρόνια:  $10 \text{ mrad} \times 2 = 20 \text{ mrem} = 0.2 \text{ mSv}$

Ακτινοβολία  $\alpha$ -:  $10 \text{ mrad} \times 20 = 200 \text{ mrem} = 2 \text{ mSv}$

Στο παράδειγμα είναι προφανές ότι η ακτινοβολία  $\alpha$ - θα μπορούσε να προκαλέσει περισσότερες βλαβερές επιπτώσεις από ότι η ακτινοβολία  $\gamma$ - ή τα θερμικά νετρόνια, παρόλο που η δόση και στις τρεις περιπτώσεις είναι η ίδια.

Ωστόσο, η επίδραση ενός συγκεκριμένου τύπου ακτινοβολίας διαφοροποιείται για τους διάφορους ιστούς και όργανα του σώματος, ανάλογα με τη ραδιοευαισθησία τους στην ακτινοβολία αυτή. Έτσι, από το 1977 η ICRP (International Commission on Radiological Protection) έχει προτείνει ένα νέο μέγεθος, το ενεργό ισοδύναμο δόσης (effective dose equivalent), που αφορά στο άθροισμα των επιμέρους σταθμισμένων ισοδυνάμων δόσεως στους πιο ραδιοευαίσθητους ιστούς και όργανα του οργανισμού. Το ενεργό ισοδύναμο δόσης, που λαμβάνει κάποιος ιστός, όργανο ή τμήμα του σώματος, είναι εκείνη η ολόσωμη δόση, η οποία θα είχε το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα (εμφάνιση καρκίνου). Για παράδειγμα, αν ακτινοβοληθεί ο θυρεοειδής με ισοδύναμη δόση X είναι προφανές ότι το αποτέλεσμα θα είναι λιγότερο επικίνδυνο σε σχέση με το αποτέλεσμα από την ακτινοβολήση με ισοδύναμο δόσης όλου του σώματος. Το ενεργό ισοδύναμο δόσης στην περίπτωση αυτή προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της δόσεως του θυρεοειδούς με τον συντελεστή  $K = \text{ρίσκο δόσης X θυρεοειδούς} / \text{ρίσκο δόσης X σώματος}$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

### ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΙΣΙΟΥ



## 2 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΙΣΙΟΥ

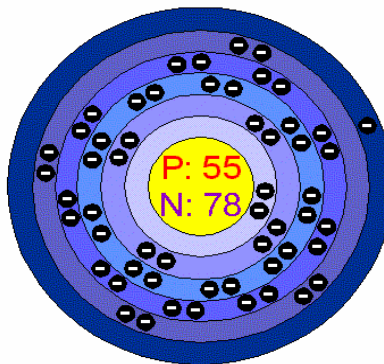
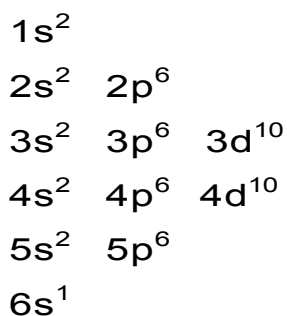
### 2.1 ΤΟ ΚΑΙΣΙΟ ΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το καίσιο ( $^{133}\text{Cs}$ ) ανακαλύφθηκε από τους γερμανούς χημικούς Robert Wilhelm Bunsen και Gustav Robert Kirchhoff το 1860, μέσω φασματοσκοπικής ανάλυσης μεταλλικού νερού<sup>13</sup>. Ονομάστηκε καίσιο (caesium ή cesium) από τη λατινική λέξη caesius, που σημαίνει μπλε ουρανός, εξαιτίας των μπλε γραμμών που παρατηρήθηκαν στο φάσμα του. Το ραδιενεργό καίσιο - 137 καθώς και άλλα ραδιονουκλίδια, που χρησιμοποιούνται στην πυρηνική ιατρική, ανακαλύφθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1930 από τους Glenn T. Seaborg και τη συνεργάτη του Margaret Melhase<sup>14</sup>.

Το καίσιο (χημικό σύμβολο Cs) ανήκει στην ομάδα των αλκαλίων και είναι δυνατό να βρίσκεται στη φύση σταθερό (μη ραδιενεργό) ή ασταθές (ραδιενεργό) (Εικόνα 2.1 και Εικόνα 1.1).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<u>H</u>																	<u>He</u>
<u>Li</u>	<u>Be</u>											<u>B</u>	<u>C</u>	<u>N</u>	<u>O</u>	<u>F</u>	<u>Ne</u>
<u>Na</u>	<u>Mg</u>											<u>Al</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Cl</u>	<u>Ar</u>
<u>K</u>	<u>Ca</u>	<u>Sc</u>	<u>Ti</u>	<u>V</u>	<u>Cr</u>	<u>Mn</u>	<u>Fe</u>	<u>Co</u>	<u>Ni</u>	<u>Cu</u>	<u>Zn</u>	<u>Ga</u>	<u>Ge</u>	<u>As</u>	<u>Se</u>	<u>Br</u>	<u>Kr</u>
<u>Rb</u>	<u>Sr</u>	<u>Y</u>	<u>Zr</u>	<u>Nb</u>	<u>Mo</u>	<u>Tc</u>	<u>Ru</u>	<u>Rh</u>	<u>Pd</u>	<u>Ag</u>	<u>Cd</u>	<u>In</u>	<u>Sn</u>	<u>Sb</u>	<u>Te</u>	<u>I</u>	<u>Xe</u>
<b>Cs</b>	<u>Ba</u>	<u>La</u> *	<u>Hf</u>	<u>Ta</u>	<u>W</u>	<u>Re</u>	<u>Os</u>	<u>Ir</u>	<u>Pt</u>	<u>Au</u>	<u>Hg</u>	<u>Tl</u>	<u>Pb</u>	<u>Bi</u>	<u>Po</u>	<u>At</u>	<u>Rn</u>
<u>Fr</u>	<u>Ra</u>	<u>Ac</u> **	<u>Rf</u>	<u>Db</u>	<u>Sg</u>	<u>Bh</u>	<u>Hs</u>	<u>Mt</u>	<u>110</u>	<u>111</u>	<u>112</u>	<u>113</u>					
<b>Lanthanides*</b>			<u>Ce</u>	<u>Pr</u>	<u>Nd</u>	<u>Pm</u>	<u>Sm</u>	<u>Eu</u>	<u>Gd</u>	<u>Tb</u>	<u>Dy</u>	<u>Ho</u>	<u>Er</u>	<u>Tm</u>	<u>Yb</u>	<u>Lu</u>	
<b>Actinides**</b>			<u>Th</u>	<u>Pa</u>	<u>U</u>	<u>Np</u>	<u>Pu</u>	<u>Am</u>	<u>Cm</u>	<u>Bk</u>	<u>Cf</u>	<u>Es</u>	<u>Fm</u>	<u>Md</u>	<u>No</u>	<u>Lr</u>	


Εικόνα 2.1: Ο Περιοδικός Πίνακας των στοιχείων



Εικόνα 2.2: Η δομή του καίσιου

Το  $^{133}\text{Cs}$ , όπως άλλωστε και το  $^{137}\text{Cs}$ , είναι ένα μαλακό, εύπλαστο, λευκό μέταλλο κι έχει τις συνήθεις φυσικοχημικές ιδιότητες των αλκαλίων (Πίνακας 2.1). Είναι ένα από τα τρία μέταλλα, μαζί με το γάλλιο (Ga) και τον υδράργυρο (Hg), τα οποία είναι υγρά κοντά στη θερμοκρασία δωματίου κι επίσης το πιο ηλεκτροθετικό αλκάλιο. Αντιδρά βίαια με το νερό και τον πάγο, ακόμη και σε θερμοκρασίες έως  $-116\text{ }^\circ\text{C}$ , σχηματίζοντας υδροξείδιο του καισίου ( $\text{CsOH}$ ). Η τελευταία ένωση είναι η γνωστότερη πιο ισχυρή βάση, η οποία προσβάλλει το γυαλί. Άλλες γνωστές ενώσεις του καισίου είναι το χλωριούχο ( $\text{CsCl}$ ) και το νιτρικό καισίο ( $\text{CsNO}_3$ ), οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρασκευή άλλων χημικών<sup>15</sup>.

Πίνακας 2.1: Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες του καισίου

Ατομική Ακτίνα	3.34 Å
Ομοιοπολική Ακτίνα	2.35 Å
Κρυσταλλική Δομή	Κυβική 
Ηλεκτρονική Απεικόνιση	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6 6s^1$
Ηλεκτρόνια ανά Ενεργειακό Επίπεδο	2, 8, 18, 18, 8, 1
Ιοντική Ακτίνα	1.67 Å
Πληρούμενο Τροχιακό	$6s^1$
Αριθμός Ηλεκτρονίων	55
Αριθμός Νετρονίων (στο πιο σταθερό νουκλίδιο)	78
Αριθμός Πρωτονίων	55
Οξειδωτική Κατάσταση	+1
Ηλεκτρόνια Σθένους	$6s^1$
Ηλεκτροχημικό Ισοδύναμο	4.9587 g/amp-hr
Ηλεκτραρνητικότητα (κατά Pauling)	0.79
Θερμότητα Τήξης	2.092 kJ/mol
<b>Ιοντικό Δυναμικό</b>	
Πρώτο	3.894 eV
Δεύτερο	25.1 eV
Δυναμικό Ηλεκτρονίων Σθένους	8.62 eV
Ατομικό Βάρος	132.9054
Σημείο Ζέσης	944 K ή $671\text{ }^\circ\text{C}$ ή $1240\text{ }^\circ\text{F}$
Σημείο Τήξης	301.59 K ή $28.59\text{ }^\circ\text{C}$ ή $83.19\text{ }^\circ\text{F}$

Συντελεστής Γραμμικής Διαστολής	0.000097cm/cm/°C (0°C)
Αγωγιμότητα	
Ηλεκτρική	0.0489 10 <sup>6</sup> /cm Ω
Θερμική	0.359 W/cm K
Πυκνότητα	1.873g/cm <sup>3</sup> στους 300 K
Περιγραφή	
Μαλακό - Λαμπερό - Ασημένιο Αλκάλιο	
Ενθαλπία Ατομοποίησης	78.2 kJ/mole στους 25°C
Ενθαλπία Τήξης	2.1 kJ/mole
Ενθαλπία Εξάτμισης	65.9 kJ/mole
Θερμότητα Εξάτμισης	67.74 kJ/mol
Μοριακός Όγκος	70.73 cm <sup>3</sup> /mole
Φυσική Κατάσταση (στοιχείο στους 20°C και 1atm)	Στερεό
Τάση Ατμών	2.5 kPa

Σήμερα, το καίσιο λαμβάνεται από το ορυκτό άλας CsAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. Η εξόρυξη καθαρού καισίου είναι δύσκολη, εξαιτίας του γεγονότος ότι το καίσιο συνυπάρχει στο ορυκτό (στο κρυσταλλικό πλέγμα σωστότερα) μαζί με το ρουβίδιο (Rb), το οποίο είναι χημικά όμοιο με το καίσιο. Για να εξορυχθεί καθαρό καίσιο, το καίσιο και το ρουβίδιο, που συνυπάρχουν στο ορυκτό, συνθλίβονται και θερμαίνονται με θειούχα μέταλλα στους 650 °C, σχηματίζοντας ένα κράμα, που στη συνέχεια διαχωρίζεται με κλασματική απόσταξη. Το μεταλλικό καίσιο αντιδρά πολύ βίαια και γι' αυτό πωλείται στο εμπόριο με τη μορφή του αζιδίου του καισίου (CsN<sub>3</sub>)<sup>16</sup>.

Το καίσιο χρησιμοποιείται ως συλλέκτης (getter, scavenger) σε ηλεκτρονικές λυχνίες για τη δέσμευση του οξυγόνου. Επίσης, χρησιμοποιείται σε φωτοηλεκτρικά στοιχεία, όπως και ως καταλύτης στην υδρογόνωση οργανικών ουσιών. Η τιμή του σήμερα βρίσκεται στα 30 \$/g.

## 2.2 ΧΗΜΙΚΗ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΚΑΙΣΙΟΥ

Το καίσιο, ως αλκάλιο, παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το κάλιο. Έχει βρεθεί ότι και τα δύο προκαλούν υπερερεθισμό ακολουθούμενο από σπασμούς, αν βρεθούν σε ισοδύναμες ποσότητες στη διατροφή. Έρευνες έχουν δείξει ότι αντικαθιστώντας το κάλιο με καίσιο στη διατροφή πειραματοζώων (ποντικών) προκαλείται θάνατος μετά από 10 - 17 ημέρες. Εισπνοή καισίου μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό στο άνω αναπνευστικό σύστημα.

Εξάλλου, η εισπνοή υψηλών συγκεντρώσεων καισίου είναι εξαιρετικά καταστρεπτική για τους ιστούς των βλεννογόνων μεμβρανών, καθώς και για το αναπνευστικό σύστημα. Το καίσιο θεωρείται χημικό συστατικό ήπιας τοξικότητας όταν εισέρχεται στον οργανισμό από το στόμα (κατάποση) και προκαλεί ερεθισμό όταν έρθει σε επαφή με τα μάτια και το δέρμα (εμφάνιση αιχμών, φουσκάλων, μαύρων σιγμάτων). Όσον αφορά στις επιπτώσεις που προκαλούνται από χρόνια έκθεση, μέσω εισπνοής, κατάποσης, επαφής με το δέρμα και τα μάτια, εμφανίζονται δηλητηριάσεις ή δερματίτιδες, ενώ καρκινογενέσεις δεν έχουν παρατηρηθεί<sup>17</sup>.

Οι κύριες ενώσεις του καισίου, που συναντώνται στο εμπόριο, είναι οι αλογονούχες ενώσεις του CsCl, CsBr, CsI, το CsOH και το CsNO<sub>3</sub>. Έρευνες σε πειραματόζωα έχουν δείξει πως τοξικότερη όλων είναι το CsOH, που έχει και τη μικρότερη τιμή LD<sub>50</sub> σε πειραματόζωα, σε ποντίκια, για τρόπους εισόδου από το στόμα (ori-LD<sub>50</sub>) ή μέσω ενδοπεριτονιακής ένεσης (ipr- LD<sub>50</sub>) και για διάστημα παρατήρησης 14 - 20 ημερών (Πίνακας 2.2)<sup>18</sup>. Κατάποση όλων των παραπάνω ενώσεων του καισίου μπορεί να προκαλέσει ερεθισμούς στο στόμα και το λαιμό, με κίνδυνο διάτρησης του ισοφάγου ή του στομάχου.

Πίνακας 2.2: Τιμές LD<sub>50</sub> ενώσεων καισίου

	ori- LD <sub>50</sub> (mg/kg)	ipr- LD <sub>50</sub> (mg/kg)
CsCl	2004	2004
CsI	2386	1400
CsOH	1026	100
CsNO <sub>3</sub>	2390	1200

### 2.3 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ <sup>137</sup>Cs ΚΑΙ ΤΗ ΡΑΔΙΟΛΟΓΙΚΗ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ

Το καίσιο έχει τα περισσότερα ισότοπα από κάθε άλλο στοιχείο, 32 στον αριθμό, με μαζικούς αριθμούς που ποικίλλουν από 114 έως 145 (Πίνακας 2.3). Η πιο κοινή μορφή ραδιενεργού καισίου είναι το καίσιο - 137 (<sup>137</sup>Cs) και μια άλλη εξίσου κοινή μορφή το καίσιο - 134 (<sup>134</sup>Cs). Όμως, το <sup>137</sup>Cs είναι πολύ πιο σημαντικός ρύπος από ότι το αντίστοιχο ισότοπο 134 κι επίσης πολύ πιο χρήσιμο στη βιομηχανία, λόγω του ότι είναι ισχυρά ραδιενεργό.

Πίνακας 2.3: Τα σημαντικότερα ισότοπα του καϊσίου

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής
Cs-126	1.6 λεπτά
Cs-129	1.3 μέρες
Cs-131	9.7 μέρες
Cs-132	6.4 μέρες
Cs-133	Σταθερό
Cs-134	2.1 χρόνια
Cs-134m	2.9 ώρες
Cs-135	2300000.0 χρόνια
Cs-136	13.2 μέρες
Cs-137	30.2 χρόνια
Cs-138	32.2 λεπτά
Cs-139	9.3 λεπτά

Το  $^{137}\text{Cs}$  είναι το κυριότερο από τα προϊόντα σχάσεως, εξαιτίας του μεγάλου χρόνου ημιζωής του (είναι το μακροβιότερο από τα προϊόντα σχάσεως), που επιτρέπει την παραμονή του στο περιβάλλον για πολλά χρόνια, σε σχέση με την ποσότητα που απελευθερώνεται από την πηγή. Πολλοί επιστήμονες πιστεύουν ότι ακόμη και μετά 100 χρόνια από το Chernobyl (κυριότερη πηγή  $^{137}\text{Cs}$  στο περιβάλλον), τουλάχιστον το 10 % του  $^{137}\text{Cs}$ , που απελευθερώθηκε θα έχει παραμείνει στο περιβάλλον<sup>19</sup>. Είναι πηγή εξωτερικής και εσωτερικής έκθεσης του ανθρώπου στην ιοντίζουσα ακτινοβολία. Η κύρια δόση προκαλείται από τις ακτίνες γ-, ενέργειας περίπου 662 keV, οι οποίες εκπέμπονται από το θυγατρικό κατά τη διάρκεια της σχάσης  $^{137}\text{Cs} > ^{137}\text{Ba}$ . Το  $^{137}\text{Cs}$  διασπείρεται σε όλο το σώμα και συσσωρεύεται στα αρτηριακά τοιχώματα και στα επινεφρίδια. Σε υψηλές δόσεις (>4.5 Gy) προκαλεί άμεση απλασία του νωτιαίου μυελού, ενώ σε χαμηλότερες δόσεις παρατηρείται εμφάνιση καρκινικών όγκων.

Χρησιμοποιείται σε μικρές ποσότητες για τη βαθμονόμηση των συσκευών ανίχνευσης ραδιενέργειας, όπως των μετρητών Geiger - Mueller. Σε μεγαλύτερες ποσότητες χρησιμοποιείται στην πυρηνική ιατρική, σε συσκευές ακτινοβολίας για τη θεραπεία του καρκίνου<sup>20</sup>. Τέλος, το  $^{137}\text{Cs}$  χρησιμοποιείται σε μετρητές ροής υγρών στη βιομηχανία, καθώς και σε άλλες βιομηχανικές συσκευές, που μετρούν την πυκνότητα των υλικών, όπως του χαρτιού, των φωτογραφικών φιλμ ή των φύλλων μετάλλου<sup>21</sup>.

## 2.4 ΠΗΓΕΣ $^{137}\text{Cs}$ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Υπάρχουν τρεις κύριοι τρόποι, στους οποίους οφείλεται η διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$  στο περιβάλλον, κι αυτοί είναι οι δοκιμές πυρηνικών όπλων, η απόρριψη υγρών αποβλήτων από πυρηνικούς αντιδραστήρες και τέλος τα διάφορα ατυχήματα, που έχουν συμβεί κατά καιρούς (Three Mile Island, Chernobyl)<sup>22</sup>.

### 2.4.1 Δοκιμές πυρηνικών όπλων

Τα πρώτα πυρηνικά όπλα εκπυρσοκρότησαν στο Νέο Μεξικό και στην Ιαπωνία το 1945 και από τότε η ρύπανση του περιβάλλοντος από ραδιοϊσότοπα έγινε παγκόσμιο πρόβλημα, κυρίως με την ανάπτυξη των θερμοπυρηνικών συσκευών, οι οποίες εξέπεμπαν ραδιενεργά αέρια στη στρατόσφαιρα. Οι δοκιμές πυρηνικών όπλων εμφανίστηκαν επικρατέστερα μεταξύ του 1952 και του 1963. Τότε, λοιπόν, οι δοκιμές απαγορεύτηκαν με μια συνθήκη, που υπογράφηκε από τις ΗΠΑ, την ΕΣΣΔ και το Ηνωμένο Βασίλειο και η οποία συνέβαλε στην έντονη μείωση των εκπομπών  $^{137}\text{Cs}$ . Συνεπώς, η προερχόμενη από δοκιμές πυρηνικών όπλων περιβαλλοντική ραδιενέργεια έχει γίνει μείζον θέμα από τα μέσα της δεκαετίας του 1960.

### 2.4.2 Ελεγχόμενη απόρριψη υγρών αποβλήτων από πυρηνικούς αντιδραστήρες και μονάδες επεξεργασίας πυρηνικών καυσίμων

Ραδιενεργές ουσίες υπάρχουν σε ψυκτικά υγρά και άλλα απόβλητα από πυρηνικές μονάδες. Αυτά καταλήγουν στο περιβάλλον όταν απόβλητα υψηλού ραδιενεργού φορτίου αποθηκεύονται ή κυρίως όταν χαμηλού φορτίου απόβλητα απορρίπτονται στους υδάτινους αποδέκτες. Για παράδειγμα, χαμηλού ραδιενεργού φορτίου απόβλητα απορρίπτονταν από την πυρηνική μονάδα Sellafield στο Ηνωμένο Βασίλειο στη θάλασσα της Ιρλανδίας από το 1950. Το ίδιο απόβλητο είχε παράλληλα 15 φορές υψηλότερη συγκέντρωση σε  $^{137}\text{Cs}$ , σε σχέση με το βραχύβιο ισότοπο  $^{134}\text{Cs}$ . Το ποσό του  $^{137}\text{Cs}$ , που ελευθερώθηκε ως το 1990, υπολογίζεται σε πάνω από  $4 \times 10^{16}$  Bq<sup>23</sup>. Στα πρόσφατα χρόνια, όμως, τα επίπεδα εκπομπής  $^{137}\text{Cs}$  στο περιβάλλον έχουν μειωθεί σημαντικά<sup>24 25</sup>. Πρέπει να υπογραμιστεί ότι απόβλητα από διάφορες πηγές, διάφορων μονάδων, διαφέρουν σημαντικά σε ραδιενεργό περιεχόμενο. Για παράδειγμα, στην πυρηνική μονάδα Loviisa στη Φινλανδία η ενεργότητα του  $^{137}\text{Cs}$  διαφέρει σημαντικά στη μονάδα διαχείρισης υδάτων και στον εξατμιστήρα αποβλήτων (διαφορά  $6 \times 10^5$  Bq l<sup>-1</sup>)<sup>26</sup>.

Ωστόσο, το  $^{137}\text{Cs}$  έχει 30 περίπου χρόνια χρόνο ημιζωής και θεωρείται βραχύβιο ραδιονουκλίδιο σε σχέση με άλλα (κυρίως σε σχέση με τα νουκλίδια της ομάδας των Ακτινιδίων), τα οποία συνήθως βρίσκονται στα ραδιενεργά απόβλητα. Έτσι, η σχετική

σπουδαιότητα του  $^{137}\text{Cs}$  σε ένα απόβλητο μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Έχει υπολογιστεί ότι αν σε ένα πυρηνικό καύσιμο η οφειλόμενη στο  $^{137}\text{Cs}$  ενεργότητα είναι 33% της συνολικής, μετά από 300 χρόνια το ποσοστό αυτό θα έχει μειωθεί στο 6%<sup>27</sup>.

#### **2.4.2 Εκπομπές από ατυχήματα**

Οι εκπομπές  $^{137}\text{Cs}$  από ατυχήματα σε πυρηνικές μονάδες αποτελούν τις πιο πρόσφατες ανησυχίες για διαφυγή ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Παρόλα αυτά, η συμβολή των ατυχημάτων στην ύπαρξη ραδιοϊσοτόπων στο περιβάλλον, σε παγκόσμιο επίπεδο, δεν είναι μεγαλύτερη από τη συμβολή των δοκιμών πυρηνικών όπλων, που συνέβησαν στη δεκαετία του 1960. Τα τελευταία χρόνια, όμως, το παγκόσμιο ενδιαφέρον εστιάζεται στη μεγάλης κλίμακας απελευθέρωση ραδιενέργειας, που ακολούθησε την έκρηξη στον πυρηνικό αντιδραστήρα του Chernobyl της Ουκρανίας το 1986.

Από την έκρηξη απελευθερώθηκαν περίπου  $85 \pm 26 \text{ PBq } ^{137}\text{Cs}$ <sup>28</sup>, κυρίως με τη μορφή μικρών σωματιδίων, τα οποία αποτέλεσαν τη ραδιενεργό επίπτωση (fallout). Η έκρηξη στο Chernobyl εκτόξευσε ραδιενεργά συστατικά στην ατμόσφαιρα σε ύψη πάνω από 1000 μέτρα. Το σχήμα και η σύνθεση των συστατικών, που εκλύθηκαν, συνιστούσαν θερμοκρασίες πάνω από 2500 °C. Έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα από διάφορα αναλυτικά εργαστήρια για να προσδιοριστεί ο λόγος  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ , που αποδίδεται στο ατύχημα του Chernobyl<sup>29</sup>. Ο λόγος αυτός ήταν περίπου 2:1 για το Chernobyl και το καύσιμο άρχισε να χρησιμοποιείται περίπου 400 ημέρες πριν το ατύχημα<sup>30</sup>.

Η ραδιενεργός επίπτωση (fallout) από το ατύχημα του Chernobyl εμφανίστηκε στις περισσότερες περιοχές, εξαιτίας των βροχοπτώσεων κατά την πρώτη εβδομάδα μετά την πρώτη έκρηξη<sup>31</sup>. Μεταγενέστερες έρευνες έδειξαν ότι η ένταση των βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια της επίπτωσης μπορεί να έχει αξιοσημείωτο αποτέλεσμα στο βάθος διασποράς του  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος<sup>32</sup>. Η ενεργότητα του  $^{137}\text{Cs}$  σε δείγματα εδάφους σε μια ακτίνα 30 km από τον πυρηνικό αντιδραστήρα ήταν περίπου  $10^{10} \text{ Bq m}^{-2}$ . Επιπρόσθετα, οι τοπικοί άνεμοι και βροχοπτώσεις, που επικρατούσαν στην περιοχή, είχαν ως αποτέλεσμα μεγάλες διαφορές στα προβλεπόμενα επίπεδα περιβαλλοντικής ραδιενέργειας από την ραδιενεργό επίπτωση (fallout)<sup>33</sup>.

Επιπλέον, έχει υπολογιστεί ότι το  $^{137}\text{Cs}$ , που απομονώθηκε από ανώτερους μύκητες σε περιοχές της Νορβηγίας<sup>34</sup>, όπως και μια αύξηση του  $^{137}\text{Cs}$  σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες, οφείλονται στο ατύχημα του Chernobyl<sup>35</sup>. Άλλα παραδείγματα είναι η ανίχνευση ελαφρώς αυξημένων συγκεντρώσεων  $^{137}\text{Cs}$  σε είδη μανιταριών στη Βαυαρία<sup>36</sup> και η αύξηση κατά 50% της ολικής ισοδύναμης δόσης ακτινοβολίας σε ένα πληθυσμό ενηλίκων στη βορειοανατολική Πολωνία<sup>37</sup>. Το γενικό συμπέρασμα είναι πως οι συγκεντρώσεις

$^{137}\text{Cs}$ , που αποδίδονται στο ατύχημα του Chernobyl, αυξήθηκαν μόνο τοπικά και ανάλογα με την ακτίνα από τον κατεστραμμένο πυρηνικό αντιδραστήρα της μονάδας.

Άλλα σοβαρά ατυχήματα συνέβησαν στο Windscale του Ηνωμένου Βασιλείου το 1957 και στο Three Mile Island των ΗΠΑ το 1979, όπου ελευθερώθηκαν ποσά ραδιενέργειας της τάξεως των TBq. Λιγότερο σοβαρά ατυχήματα συνέβησαν στο Saint Laurent της Γαλλίας το 1980, στο Vandellós της Ισπανίας το 1989 και στο Sosnowy Bor της Ρωσίας το 1992, όπου το ισοδύναμο δόσης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εκτιμήθηκε στην τάξη των mSv. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η πτώση του δορυφόρου SNAP 9A στον Ινδικό ωκεανό το 1964, κατά την οποία εκλύθηκαν 16000 Ci  $^{238}\text{Pu}$  <sup>38</sup>.

## 2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ CHERNOBYL ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΘΑΛΑΣΣΑ

Στο διάστημα 26 Απριλίου με 1 Ιουνίου 1986 η έκρηξη, που εκδηλώθηκε στον αντιδραστήρα 4 του Chernobyl και η φωτιά, που ακολούθησε την έκρηξη, οδήγησε σε εκλύσεις ενός ευρέως φάσματος ραδιονουκλιδίων από το ραδιενεργό νέφος. Κατά τη διάρκεια των επόμενων ημερών διάφορες περιοχές μεγάλης έκτασης στη Μεσόγειο θάλασσα δέχθηκαν την επίδραση της ραδιενεργού επίπτωσης (fallout). Απελευθερώθηκαν περίπου 11 EBq ραδιενεργών συστατικών στο περιβάλλον<sup>39</sup>, ενώ συνολικά αποτέθηκαν στη Μαύρη Θάλασσα 2400 TBq  $^{137}\text{Cs}$ <sup>40</sup>, ποσότητα που αντιπροσωπεύει το 20 - 40% του  $^{137}\text{Cs}$  που απελευθερώθηκε από τον κατεστραμμένο αντιδραστήρα. Η αντίστοιχη τιμή για το Αιγαίο Πέλαγος ήταν 530 TBq, για το Ιόνιο, για μια περιοχή 50 km μακριά από τις ακτές, 40 TBq<sup>41</sup>, ενώ για την Αδριατική 1000 TBq. Για περισσότερο από 10 χρόνια μετά το ατύχημα, η περιοχή του πυρηνικού αντιδραστήρα του Chernobyl ήταν η κυριότερη επίγεια χρόνια πηγή ρύπανσης της Μαύρης Θάλασσας, μέσω των ποταμών Pripyat και Dnieper. Εξαιτίας του ότι οι ποταμοί αυτοί εκρέουν στη Μαύρη Θάλασσα μεταφέρουν, μέσω των διεργασιών απορροής, ιζήματα ρυπαίνοντας τη βορειοδυτική Μαύρη Θάλασσα. Έτσι, το  $^{137}\text{Cs}$  επαναιωρείται και υπολογίζεται πως ποσότητα 250 TBq παραμένει στην ανώτατη στοιβάδα και διασπείρεται σε βάθη από 0 έως 50 m, περνώντας στο Αιγαίο Πέλαγος, μέσω της θάλασσας του Μαρμαρά και του στενού των Δαρδανελίων.

Η ταχύτητα απορροής του  $^{137}\text{Cs}$  στη Μαύρη Θάλασσα, σε βάθος 0 έως 50 m για τα έτη 1987 - 1993 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v = 25.5e^{-0.103t} \quad 39$$

όπου v η ταχύτητα εκροής του  $^{137}\text{Cs}$  σε TBq / χρόνο

και t ο χρόνος σε χρόνια

Συνεπώς, η Μαύρη Θάλασσα ανεφέρεται ως σημείο κλειδί της ραδιενεργού ρύπανσης του Αιγαίου Πελάγους (ανατολική Μεσόγειος). Σύμφωνα με κάποιες μετρήσεις, κατά τη διάρκεια του 1993 εκφορτώθηκαν στο Αιγαίο περίπου 48 TBq  $^{137}\text{Cs}^{42}$ . Λαμβάνοντας υπόψη και την Αδριατική, όπου όλοι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες της περιοχής, κυρίως της Ιταλίας, έκλεισαν το 1987, πολύ μικρές ποσότητες ραδιενεργών συστατικών συνέχιζαν να απελευθερώνονται και να εκρέουν, μέσω του ποταμού Ρο, σε αυτή. Εκτός, όμως, από τις παραπάνω κύριες πηγές ρύπανσης της ανατολικής Μεσογείου, έρχεται να προστεθεί και μια μελλοντική πηγή, που προέρχεται από την κατασκευή του νέου πυρηνικού εργοστασίου στο Akkuyu στα τουρκικά παράλια.

### **2.5.1 Γενικά ωκεανογραφικά χαρακτηριστικά της Μεσογείου θαλάσσης**

Σύμφωνα με αποτελέσματα διαφόρων μελετών, η εκροή ραδιενεργών συστατικών από πυρηνικές μονάδες της περιοχής της Ουκρανίας συμβαίνει μέσω των ποταμών Dnieper, Dniester και Danube στη Μαύρη Θάλασσα. Επειδή το Αιγαίο Πέλαγος γειτνιάζει από τα Βόρεια με τη Μαύρη Θάλασσα, μέσω του στενού των Δαρδανελίων, υδάτινες μάζες ανταλλάσσονται μέσω της επιφανειακής κυκλοφορίας μεταξύ των δυο λεκανών (Αιγαίου και Μ. Θάλασσας). Το βόρειο Αιγαίο είναι η περιοχή του Αιγαίου Πελάγους, όπου τα ύδατα της Μαύρης Θάλασσας αντιδρούν με τα θαλάσσια ύδατα του Αιγαίου, μέσω του στενού των Δαρδανελίων, κι έτσι τα ραδιενεργά συστατικά διασπείρονται στη Μεσόγειο. Ο κατά προσέγγιση ετήσιος μέσος όρος της ανταλλαγής υδάτων, μέσω ρευμάτων, από τη Μαύρη Θάλασσα στο Αιγαίο είναι περίπου  $400 \text{ km}^3^{40}$ . Η ποσότητα αυτή είναι απειροελάχιστη σε σχέση με το συνολικό όγκο νερού του Αιγαίου ( $900000 \text{ km}^3$ ) ή του βορείου Αιγαίου, που υπολογίζεται περίπου στα  $26000 \text{ km}^3$ . Η κύρια μεταφορά των εν λόγω υδάτινων μαζών πραγματοποιείται με τη βοήθεια ρευμάτων, μέσω των Δαρδανελίων, ένα στενό κανάλι 90 μόλις μέτρων μέγιστου βάρους. Η μεταφορά των υδάτων γίνεται με ταχύτητες, που κυμαίνονται από 10 έως  $50 \text{ cm s}^{-1}$ . Η μέγιστη ταχύτητα, που έχει αναφερθεί στην περιοχή είναι  $300 \text{ cm s}^{-1}^{43}$ . Συνεπώς, η επιφανειακή στοιβάδα των υδάτων της περιοχής του βορείου Αιγαίου επηρεάζεται άμεσα από τη ροή των υδάτων της Μαύρης Θάλασσας.

Η επιφανειακή στοιβάδα των υδάτων της Μαύρης Θάλασσας χαρακτηρίζεται από χαμηλές τιμές αλατότητας (29 ‰ η ελάχιστη), πράγμα το οποίο σημαίνει υψηλή σταθερότητα των συνθηκών πλευστότητας. Στη συνέχεια, η επιφανειακή στοιβάδα (0 - 50 m) περνά, μέσω του στενού των Δαρδανελίων, στο Αιγαίο Πέλαγος. Οι φυσικοχημικές συνθήκες έξω από το στενό των Δαρδανελίων είναι εντελώς διαφορετικές. Το νερό

χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές αλατότητας, που κυμαίνονται από 31 - 39 ‰, μεγαλύτερα βάθη και δυνατότερα ρεύματα, κυρίως τους ψυχρούς μήνες.

### **2.5.2 Διασπορά του $^{137}\text{Cs}$ στη Μαύρη Θάλασσα - Ουκρανία**

Ποσότητα 11 EBq ραδιενεργών συστατικών απελευθερώθηκε στο περιβάλλον, μετά το ατύχημα στον πυρηνικό αντιδραστήρα του Chernobyl, στις 26 Απριλίου 1986. Το  $^{137}\text{Cs}$ , που απελευθερώθηκε, υπολογίστηκε σε  $85 \pm 26$  PBq, ποσότητα που αντιστοιχεί στο 20 - 40% περίπου της αρχικής μέσα στον αντιδραστήρα. Η απελευθέρωση ραδιενεργών συστατικών από το ατύχημα του Chernobyl έγινε πρώτα αισθητή στη Μαύρη Θάλασσα, περίπου 6 ημέρες μετά το ατύχημα, λόγω του fallout (βραχυπρόθεσμο αποτέλεσμα) και λίγο αργότερα λόγω της εκροής του ποταμού Dnieper (μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα). Όπως υπολογίστηκε<sup>44 45</sup> το fallout, που αποτέθηκε στα επιφανειακά ύδατα της Μαύρης Θάλασσας ήταν 1.7 - 2.4 PBq  $^{137}\text{Cs}$ . Το ατμοσφαιρικό fallout αποτέθηκε σε μια στοιβάδα έως 50 m ανομοιογενώς. Για αυτό οι μετρήσεις έδωσαν ανώμαλα αποτελέσματα για τη ρύπανση στη Μαύρη Θάλασσα, με τα υψηλότερα επίπεδα να παρατηρούνται στα επιφανειακά ύδατα των βόρειων και ανατολικών περιοχών, τα οποία έφτασαν τα  $500 \text{ Bq m}^{-3}$  τον Ιούνιο και τον Ιούλιο του 1986<sup>46</sup>.

Στις περιοχές αυτές, σε βάθη 0 - 50 m, το  $^{137}\text{Cs}$  αυξήθηκε 6 - 10 φορές, ενώ σε ολόκληρη τη στήλη του νερού η αντίστοιχη αύξηση ήταν διπλάσια, σε σχέση με την προ - Chernobyl εποχή. Λαμβάνοντας υπόψη τις άμεσες συνέπειες του ατυχήματος, αξίζει να σημειωθεί πως υπήρξαν και μερικές περιοχές της Μαύρης Θάλασσας, όπου η αύξηση των επιπέδων του  $^{137}\text{Cs}$  ήταν πολύ απότομη, 10 έως 20 φορές, και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις εκτοξεύτηκαν από 15 έως και  $370 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Η μείωση των επιπέδων του  $^{137}\text{Cs}$  στα επιφανειακά ύδατα της Μαύρης Θάλασσας, στα χρόνια που ακολούθησαν μετά το ατύχημα, είναι συνάρτηση 3 διεργασιών: Της κατακόρυφης διασποράς, της εκροής των υδάτων στο Αιγαίο, μέσω του Βοσπόρου, και τέλος της ραδιενεργού διάσπασης. Σύμφωνα με μετρήσεις, που έγιναν στην περιοχή, 10 και πλέον χρόνια μετά το ατύχημα η μέση συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  στα επιφανειακά ύδατα, σε βάθος 0 - 50 m ήταν  $30 \text{ Bq m}^{-3}$  (Εικόνα 2.4). Γενικό συμπέρασμα πάντως είναι ότι τα επίπεδα της προ - Chernobyl εποχής θα επιτευχθούν μετά από πολλά χρόνια.

### **2.5.3 Διασπορά του $^{137}\text{Cs}$ στη Μαύρη Θάλασσα - Ρουμανία**

Η διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$ , μόνο μέσω της παγκόσμιας ραδιενεργού επίπτωσης (fallout) ήταν η αιτία για τα χαμηλά επίπεδα στη ρουμανική πλευρά της Μαύρης Θάλασσας μέχρι το 1985. Μέχρι τη στιγμή αυτή δεν είχαν βρεθεί ραδιονουκλίδια, που να προέρχονται από πυρηνικές εφαρμογές. Ο έλεγχος της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος στις ρουμανικές

παράκτιες περιοχές το 1986, αμέσως μετά το ατύχημα, έδειξε ενδεικτική αύξηση των επιπέδων του  $^{137}\text{Cs}$  στη θάλασσα. Την περίοδο, λοιπόν, από 1983 - 1998 οι συγκεντρώσεις του  $^{137}\text{Cs}$  κυμάνθηκαν στη ρουμανική Μαύρη Θάλασσα από 30 - 400 Bq  $\text{m}^{-3}$  (Εικόνα 2.4), με μέγιστη τιμή το 1986 και ελάχιστη το 1998<sup>47</sup>.

#### **2.5.4 Διασπορά του $^{137}\text{Cs}$ στο Κυπριακό Πέλαγος**

Το ποσό του  $^{137}\text{Cs}$  στο βόρειο Κυπριακό Πέλαγος την εποχή πριν από το ατύχημα του Chernobyl ήταν μη ανιχνεύσιμο, ενώ η αντίστοιχη μέση τιμή για το έτος 1992 ήταν  $9.3 \pm 2.9$  Bq  $\text{m}^{-3}$ , εξαιτίας της επιρροής του fallout στην ανατολική Μεσόγειο. Η τιμή αυτή είναι απολύτως συγκρίσιμη με αυτή που μετρήθηκε στη θαλάσσια περιοχή κοντά στη Συρία το 1991, η οποία ήταν  $8.4 \pm 1.6$  Bq  $\text{m}^{-3}$ <sup>48</sup>.

Όσον αφορά στη ραδιολογική κατάσταση από το 1999 και μετά, σε 15 σταθμούς στο βορειοανατολικό Κυπριακό Πέλαγος τα επίπεδα βρίσκονταν περίπου στα 2.5 - 3.5 Bq  $\text{m}^{-3}$  (Εικόνα 2.4). Συγκρίσιμες τιμές ( $2.0 \pm 0.6$  Bq  $\text{m}^{-3}$ ) αναφέρθηκαν για τη Θάλασσα της Λεβαντίνης την περίοδο 1994 - 1998. Ωστόσο, κάποιες μετρήσεις έδειξαν πάνω από 4.0 Bq  $\text{m}^{-3}$  σε περιοχές του νοτιοανατολικού Κυπριακού Πελάγους. Αυτές είναι τυπικές τιμές μετρήσεων σε μικρά βάθη, κοντά στη στεριά, που επηρεάζονται από την ισχυρή εξάτμιση, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Τέλος, αξίζει να παρατηρήσει κανείς ότι οι συγκεντρώσεις του  $^{137}\text{Cs}$  στο Κυπριακό Πέλαγος είναι οι χαμηλότερες στη Μεσόγειο, αφού η περιοχή αυτή είναι μακριά από κάθε πηγή ραδιενεργού ρύπανσης.

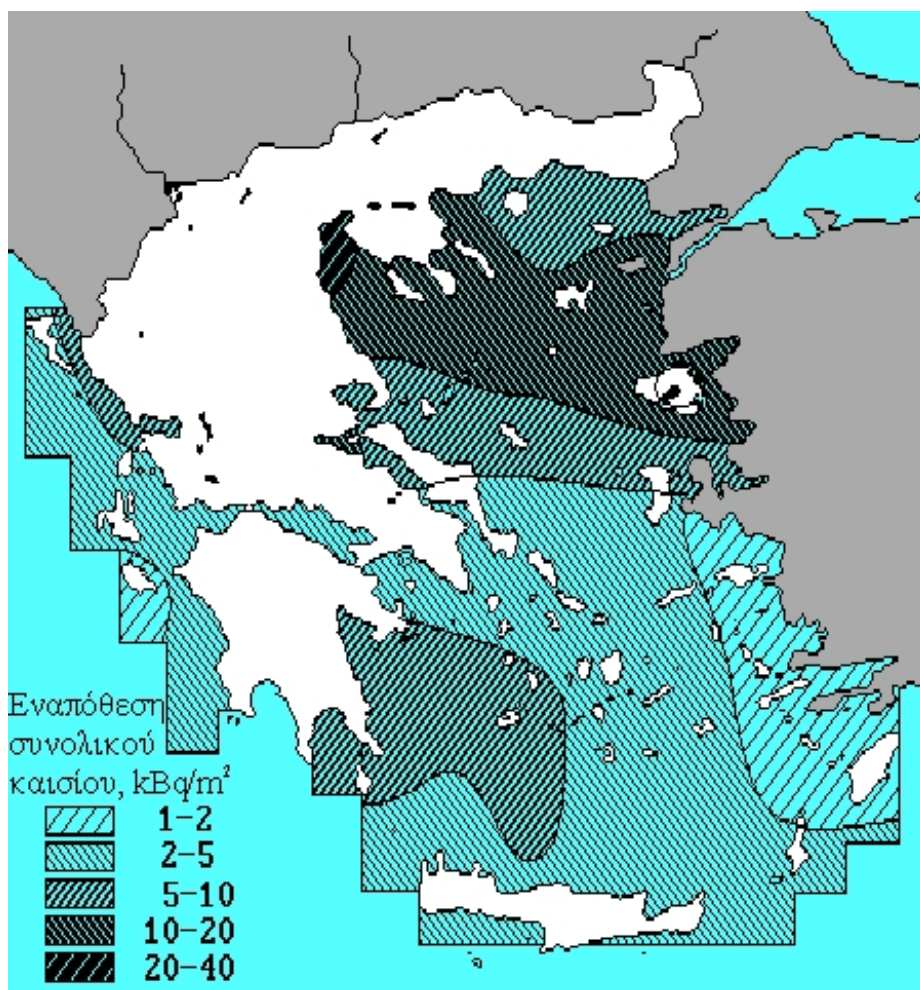
#### **2.5.5 Διασπορά του $^{137}\text{Cs}$ στη Θάλασσα της Λεβαντίνης**

Οι παρατηρούμενες τιμές στην περιοχή αυτή κυμάνθηκαν από 2 - 4 Bq  $\text{m}^{-3}$  με τάση αύξησης (Εικόνα 2.4). Οι τιμές αυτές του  $^{137}\text{Cs}$  τείνουν σε αυτές της προ - Chernobyl εποχής<sup>49</sup>.

#### **2.5.6 Διασπορά του $^{137}\text{Cs}$ στο Αιγαίο πέλαγος**

Τα επίπεδα του  $^{137}\text{Cs}$  την περίοδο 1984 - 1985 στην περιοχή ήταν περίπου  $2.6 \pm 0.3$  Bq  $\text{m}^{-3}$ <sup>50</sup>. Το Αιγαίο Πέλαγος επηρεάστηκε από το fallout λίγους μήνες μετά το ατύχημα του Chernobyl το 1986. Από το 1986 ο αντίκτυπος της ραδιενεργού ρύπανσης έγινε αισθητός με μια αύξηση μιας τάξης μεγέθους των επιπέδων του  $^{137}\text{Cs}$  στο θαλασσινό νερό<sup>51</sup>. Ανιχνεύθηκαν ραδιοϊσότοπα, που για πρώτη φορά εμφανίστηκαν σε έμβιο και άβιο υλικό του Ελλαδικού θαλάσσιου χώρου, όπως  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$ ,  $^{131}\text{I}$  και άλλα. Χαρακτηριστικό είναι πως  $^{103}\text{Ru}$  ανιχνεύτηκε σε μύδια το Μάιο του 1986, ένα μήνα μετά την πιστοποίηση της έλευσης του ραδιενεργού νέφους στην Ελλάδα. Επίσης,  $^{131}\text{I}$ , ένα

από τα σημαντικότερα ραδιονουκλίδια του νέφους, ανιχνεύτηκε σε θαλάσσιους οργανισμούς στο ίδιο διάστημα. Συνολικά υπολογίζεται ότι  $9 \pm 3 \text{ kBq m}^{-2}$  συνολικού καισίου ( $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$ ) έπεσαν κατά μέσο όρο στο ηπειρωτικό τμήμα της Ελλάδας, ενώ σε ορισμένα τμήματα της χώρας μετρήθηκε απόθεση  $40 \text{ kBq m}^{-2}$ <sup>52</sup>. Η μέση απόθεση του συνολικού καισίου στο Αιγαίο συμπεριλαμβανομένου και του Κρητικού πελάγους υπολογίστηκε περίπου  $4 \text{ kBq m}^{-2}$  (Εικόνα 2.3). Υπολογίζεται ότι περίπου 1% του ολικού καισίου που απελευθερώθηκε στο περιβάλλον από τον κατεστραμμένο αντιδραστήρα του Chernobyl αποτέθηκε στο Αιγαίο και στο Ιόνιο πέλαγος, εκ των οποίων τα 2/3 αυτών αντιστοιχούσαν σε  $^{137}\text{Cs}$ . Τέλος, την περίοδο από το 1988 ως το 1995 ο μέσος όρος ήταν  $20.7 \pm 14.7 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ w/w}$  για το Αιγαίο πέλαγος και  $9.2 \pm 2.5 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ w/w}$  για το Ιόνιο<sup>53</sup>.



Εικόνα 2.3: Εναπόθεση συνολικού καισίου στο θαλάσσιο περιβάλλον του Ελλαδικού χώρου

Πηγή: ΕΡΠ / ΙΠΤ-Α / ΕΚΕΦΕ “Δ”

Ενδεικτικά αναφέρεται πως το ποσό του  $^{137}\text{Cs}$ , που μεταφέρθηκε από τη Μαύρη Θάλασσα στο Αιγαίο το Μάιο του 1986, ήταν 250 TBq <sup>54</sup>, ενώ η εναπόθεση από το ραδιενεργό σύννεφο ήταν 530 TBq (820 TBq  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$ ). Σύμφωνα με κάποιες προκαταρκτικές μετρήσεις, περίπου 48 TBq  $^{137}\text{Cs}$  ήταν η εκροή από τη Μαύρη Θάλασσα για το έτος 1993. Η μέση συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  στο βόρειο Αιγαίο, στην έξοδο των Δαρδανελίων ήταν  $120 \pm 8 \text{ Bq m}^{-3}$ , ενώ η μέση τιμή για το Αιγαίο ήταν  $20.7 \pm 14.7 \text{ Bq m}^{-3}$  <sup>51</sup>. Η τιμή αυτή είναι δέκα φορές υψηλότερη σε σύγκριση με τις τιμές της προ - Chernobyl εποχής, οι οποίες κυμαίνονταν στα  $2.6 \pm 0.3 \text{ Bq m}^{-3}$  περίπου.

Όσον αφορά στα επίπεδα  $^{137}\text{Cs}$  από το 1996 έως το 1999 ένα διαφορετικό καθεστώς δημιουργήθηκε στο Αιγαίο. Όπως είναι λογικό, υψηλότερες συγκεντρώσεις άνω των 20  $\text{Bq m}^{-3}$  παρατηρήθηκαν στο βόρειο Αιγαίο, κοντά στη Λήμνο, ενώ οι μέσες τιμές για το κεντρικό και νοτιοανατολικό Αιγαίο ήταν  $4.5 \pm 0.8 \text{ Bq m}^{-3}$  και  $2.5 \pm 0.8 \text{ Bq m}^{-3}$  <sup>49</sup>. Τέλος, την περίοδο 1999 - 2000 η μέση τιμή ήταν  $13 \text{ Bq m}^{-3}$  (Εικόνα 2.4), ανάλογα με την περιοχή. Ακόμη πιο πρόσφατες μετρήσεις <sup>55</sup>, μετά το 2001, έδειξαν ότι η συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  αυξάνει από την επιφάνεια προς μεγαλύτερα βάθη, φθάνοντας τη μέγιστη τιμή των  $5 \text{ Bq m}^{-3}$  κοντά στη Λήμνο το 2002 και  $4.5 \text{ Bq m}^{-3}$  στο Κρητικό Πέλαγος το 2003.

### **2.5.7 Διασπορά του $^{137}\text{Cs}$ στην Αδριατική Θάλασσα και στο Ιόνιο Πέλαγος**

Η εκβολή του ποταμού Ρο είναι η κύρια πηγή της ραδιενεργού ρύπανσης της Αδριατικής και κατά συνέπεια και του Ιονίου Πελάγους. Αυτό οφείλεται στο ότι οι πυρηνικές εγκαταστάσεις Irino και Caorso βρίσκονταν κοντά στον ποταμό, με αποτέλεσμα να παρασύρουν ραδιενεργά συστατικά. Από το 1987 οι σταθμοί αυτοί έχουν κλείσει με εντολή της ιταλικής κυβέρνησης. Ωστόσο, μικρές ποσότητες αερίων και υγρών συνέχισαν να εκρέουν στον ποταμό Ρο, πολλά χρόνια μετά το ατύχημα. Η διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  στην Αδριατική, εξαιτίας του ατυχήματος του Chernobyl υπολογίστηκε στα 1000 TBq <sup>56</sup>. Επιπρόσθετα, ποσότητα 40 TBq  $^{137}\text{Cs}$  υπολογίστηκε ότι αποτέθηκε στη στενή ζώνη του Ιονίου (περιοχή  $24300 \text{ km}^2$ ) <sup>49,41</sup>.

Ως αποτέλεσμα της ραδιενεργού διασποράς, εξαιτίας του ατυχήματος, οι συγκεντρώσεις του  $^{137}\text{Cs}$  αυξήθηκαν 6 φορές σε σχέση με πριν. 10 χρόνια μετά το ατύχημα οι συγκεντρώσεις του  $^{137}\text{Cs}$  κυμαίνονταν στα 3 - 6  $\text{Bq m}^{-3}$  (Εικόνα 2.4), με αύξηση να παρατηρείται σε μεγαλύτερα βάθη της υδάτινης στήλης. Την περίοδο 1999 - 2000 η συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  κυμαίνονταν στα ίδια επίπεδα, ανάλογα με την περιοχή.



Εικόνα 2.4: Μέσες τιμές συγκεντρώσεων  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) στην ανατολική Μεσόγειο την περίοδο 1999 - 2000

Πηγή: Φλώρου Ε., Π. Κρητίδης, Χ. Χαλούλου, 'Εκτίμηση ραδιολογικής κατάστασης του Θερμαϊκού κόλπου: Πηγές - Διασπορά - Βιοδείκτες παρακολούθησης', 1ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη, 2002.

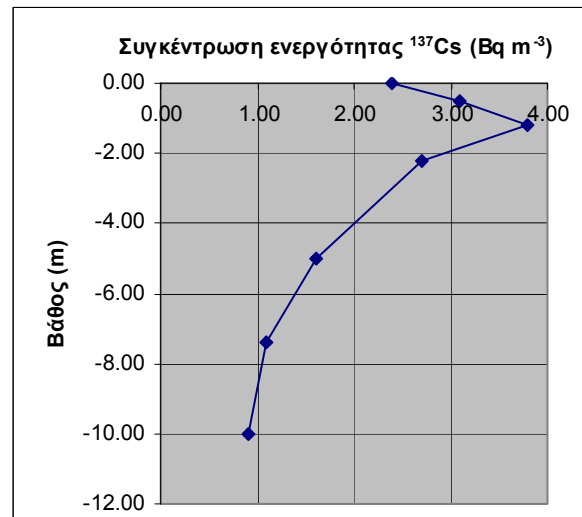
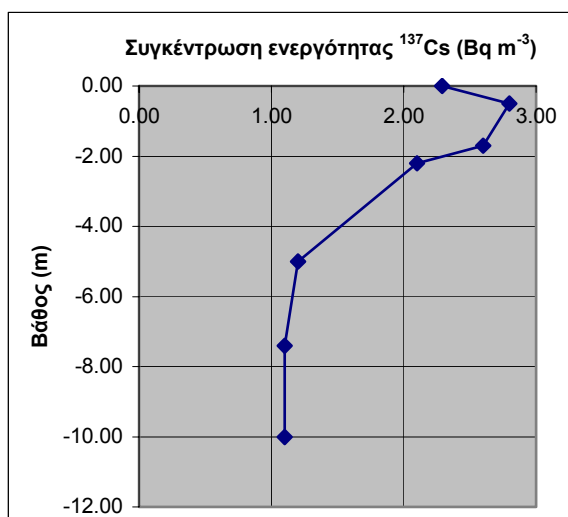
## 2.6 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ $^{137}\text{Cs}$ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ

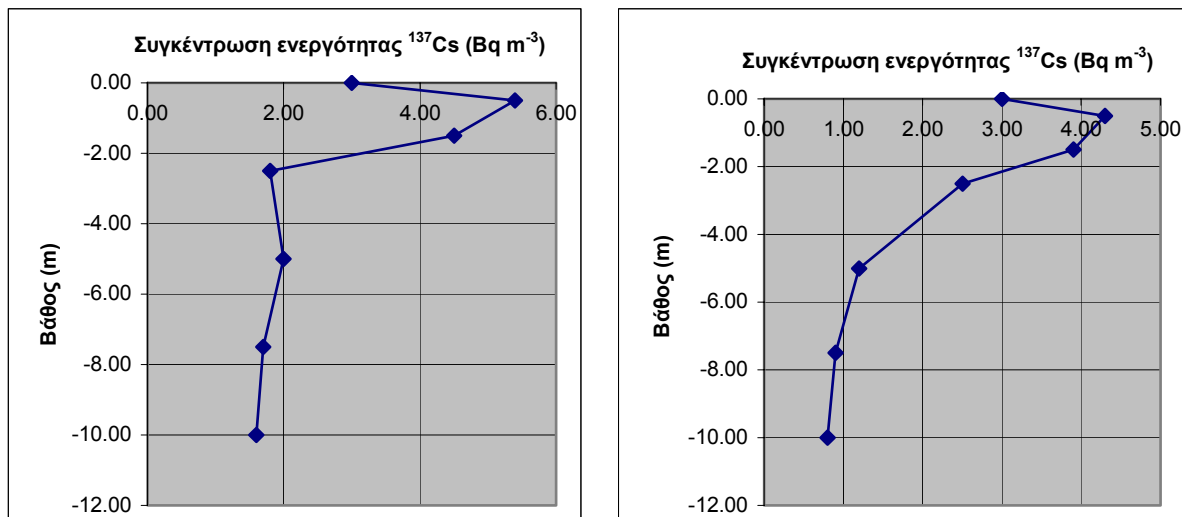
Παρά τη μεγάλη αναλογία της επιφάνειας της γης σε νερό, καθώς και της μεγάλης κινητικότητας και διαθεσιμότητας του καϊσίου όταν βρίσκεται σε διάλυμα, η τύχη του καϊσίου σε υδατικά οικοσυστήματα έχει πολύ λίγο εκτενώς μελετηθεί από ότι στα χερσαία. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι το προερχόμενο από το χερσαίο οικοσύστημα καϊσιο συμβάλλει

περισσότερο στη βιοσυσσώρευση στην τροφική αλυσίδα και άρα στη ανθρώπινη διατροφή. Ωστόσο, αξιόλογες αποδείξεις κάνουν λόγο για το ότι οι οργανισμοί σε υδατικά περιβάλλοντα είναι περισσότερο ευαίσθητοι στη συσσώρευση καισίου<sup>57</sup>.

Το περιβάλλον των ανοικτών ωκεανών παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σταθερότητα, ενώ οι παράκτιες περιοχές θαλασσών και ποταμών (coastal waters, estuaries) και οι λίμνες, καθώς και οι κλειστές θάλασσες, όπως η Βαλτική και η Μεσόγειος παρουσιάζουν μεταβολές των οικολογικών τους παραμέτρων, όταν συμβαίνουν αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχει καταγραφεί ένας μεγάλος αριθμός περιστατικών, που αναφέρονται στη διακύμανση έως και την εξαφάνιση της βιομάζας πληθυσμού παρακτίων οικοσυστημάτων, λόγω της αλλαγής των περιβαλλοντικών συνθηκών<sup>58</sup>. Η εν γένει συμπεριφορά και κατανομή του <sup>137</sup>Cs στο θαλασσινό νερό των παράκτιων οικοσυστημάτων δεν εξαρτάται από την απλή διάλυση και διάχυση στη μάζα του νερού, αλλά και από τις πολύπλοκες τοπογραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες και τις αλλαγές της αλατότητας, χλωριότητας και pH του νερού.

Τα <sup>137</sup>Cs, όπως και άλλα ραδιονουκλίδια συμμετέχοντα στην αλατότητα (conservative) διασπείρονται στο θαλάσσιο περιβάλλον σε τρεις διαφορετικές μορφές: στην ιοντική μορφή, στην κολλοειδή ή στη σωματιδιακή κατάσταση. Ο χρόνος παραμονής των ραδιονουκλιδίων στη στήλη του νερού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φυσικοχημική κατάσταση, στην οποία βρίσκονται<sup>59</sup>. Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται λίγες μελέτες διασποράς και κατανομής των φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων (Εικόνα 2.5) για την περιοχή του Αιγαίου Πελάγους.





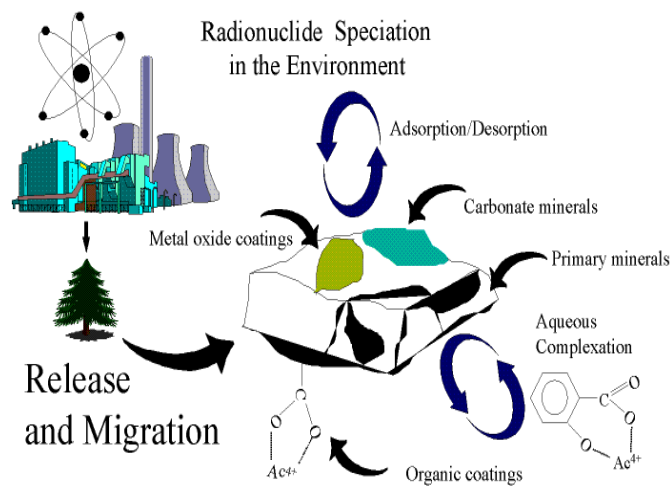
Εικόνα 2.5: Τυπική κάθετη κατανομή συγκεντρώσεων <sup>137</sup>Cs σε σχέση με το βάθος στην υδάτινη στήλη βόρεια της κεντρικής Κρήτης, ανατολικά της Ρόδου, βορειοδυτικά της Μυτιλήνης και βόρεια της Λήμνου αντίστοιχα<sup>60</sup>.

Το <sup>137</sup>Cs, μαζί με το <sup>90</sup>Sr και τα υπερουράνια στοιχεία, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τεχνητά ραδιονουκλίδια από πλευράς ραδιενεργού ρύπανσης, λόγω του χρόνου ημιζωής του, του τύπου ακτινοβολίας και της βιοσυσσωρευσης του από τους οργανισμούς<sup>61 62</sup>. Όπως και άλλα αλκαλικά μέταλλα σε υδατικά μέσα όπως το θαλασσινό νερό, έτσι και το καίσιο βρίσκεται κυρίως σε ιοντική μορφή. Πιο συγκεκριμένα, το 70% του συνολικού καισίου στο θαλασσινό νερό να βρίσκεται σε ιοντική μορφή, το 23% απορροφημένο σε σωματίδια και το 7% σε κολλοειδή μορφή.

Η ταχύτητα διασποράς και κατανομής του καισίου στην υδάτινη στήλη και καταβύθισης του στον πυθμένα είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή των ραδιονουκλιδίων που ενσωματώνονται στα σωματίδια του νερού, όπως των <sup>239-240</sup>Pu<sup>63</sup>. Η ταχύτερη μεταφορά του <sup>137</sup>Cs σε μεγαλύτερα βάθη της υδάτινης στήλης συνδέεται με τη βιοσυσσωρευση του στους θαλάσσιους οργανισμούς και κατά συνέπεια μεταφορά του με τις μεταναστεύσεις αυτών σε μεγαλύτερα βάθη<sup>64 65</sup> ή την απόθεση του. Εξάλλου, οι συγκεντρώσεις του <sup>137</sup>Cs στο θαλασσινό νερό μπορούν να αποτελέσουν, σε ορισμένες περιπτώσεις, την παράμετρο εκτίμησης της κατεύθυνσης των επιφανειακών ρευμάτων σε συγκεκριμένη περιοχή<sup>66</sup>.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ:

# ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΤΟΥ $^{137}\text{Cs}$ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ



### 3 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΤΟΥ $^{137}\text{Cs}$ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραδιενέργεια είναι δυνατό να μεταφέρεται από τα υδατικά περιβάλλοντα στον άνθρωπο ευθέως, μέσω της κατάποσης, της αναπνοής ή εμμέσως, μέσω της τροφής. Εφόσον, λοιπόν, τελικός αποδέκτης των κάθε λογής τεχνητών ραδιονουκλιδίων, τα οποία ελευθερώνονται στο περιβάλλον, είναι ο άνθρωπος γίνεται επιτακτική η ανάγκη να διερευνηθούν οι μηχανισμοί με τους οποίους τα ραδιονουκλίδια διασπείρονται στο περιβάλλον. Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει πώς η ραδιενέργεια, δηλαδή τα ραδιενεργά συστατικά, και συγκεκριμένα το  $^{137}\text{Cs}$  μεταφέρεται στο υδατικό περιβάλλον, με ποιούς μηχανισμούς δρα και με ποιές διεργασίες απομακρύνεται από αυτό.

Προφανώς, η ραδιενέργεια χάνεται πάντα, λόγω της ραδιενεργού διάσπασης. Αν ο ραδιενεργός χρόνος ημιζωής είναι μικρότερος από τον οικολογικό χρόνο ημιζωής (ορίζεται ως ο παρατηρούμενος ρυθμός απομάκρυνσης ραδιενέργειας από ένα συγκεκριμένο τομέα του περιβάλλοντος), τότε οι περιβαλλοντικές διεργασίες απομάκρυνσης των ραδιενεργών συστατικών θα είναι ασήμαντες. Αντίστροφα, με χαμηλό ρυθμό ραδιενεργού διασπάσεως οι περιβαλλοντικές διεργασίες αποβολής των ραδιενεργών συστατικών υπερτερούν<sup>67</sup>.

#### 3.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ – ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ $^{137}\text{Cs}$ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

##### 3.2.1 Ραδιενεργός επίπτωση (fallout)

Ο κύριος τρόπος μεταφοράς και διασποράς του  $^{137}\text{Cs}$  γίνεται με τη ραδιενεργό επίπτωση (fallout). Ο τόπος και ο χρόνος κατά τον οποίο το  $^{137}\text{Cs}$  και τα άλλα ραδιονουκλίδια μιας πυρηνικής έκρηξης θα φθάσουν στην επιφάνεια της γης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ένας εκ των οποίων είναι το ύψος στο οποίο γίνεται η έκρηξη. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος αυτό, τόσο μεγαλύτερο μέρος από τα παραγόμενα ραδιενεργά υλικά – και άρα και από το  $^{137}\text{Cs}$  – ανυψώνεται στα ανώτερα και ανώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας. Με την πάροδο του χρόνου και καθώς η θερμοκρασία της πυρακτωμένης σφαίρας ελαττώνεται, αρχίζει η συνένωση του  $^{137}\text{Cs}$  και των άλλων ραδιενεργών προϊόντων σε μικροσκοπικά σωματίδια. Λόγω του μικρού μεγέθους, η πτώση των σωματιδίων αυτών γίνεται πολύ αργά κι ένα σημαντικό μέρος αυτών μπορεί να παραμένει στην ατμόσφαιρα για μήνες ή χρόνια. Κατά την περίοδο αυτή, συμβαίνει

μετακίνηση από τα ατμοσφαιρικά ρεύματα, η οποία μπορεί να επεκταθεί έως και σε ένα ολόκληρο ημισφαίριο, όταν πρόκειται για σωματίδια που έχουν φθάσει μέχρι την στρατόσφαιρα. Η ραδιενεργός επίπτωση, η οποία ακολουθεί την ευρύτατη αυτή διασπορά λέγεται παγκόσμια ή καθυστερημένη (global or delayed fallout).

Όσο χαμηλότερα πραγματοποιείται η έκρηξη, τόσο μεγαλύτερο μέρος από τα υλικά, που αποτελούν το ραδιενεργό νέφος, προέρχονται από την επιφάνεια της γης, ως αποτέλεσμα της τεράστιας αναρρόφησης, που συνοδεύει την ανύψωση της πύρινης σφαίρας δίνοντας τη χαρακτηριστική εικόνα του μανιταριού. Τα σωματίδια στην περίπτωση αυτή είναι αρκετά μεγάλα και πέφτουν πολύ γρήγορα στο έδαφος αναμεμιγμένα με ραδιενεργά υλικά, προερχόμενα από την πυρηνική έκρηξη. Κατά την παραμονή τους στην ατμόσφαιρα μεταφέρονται και αυτά, λόγω της ύπαρξης των ατμοσφαιρικών ρευμάτων, σε μικρές όμως αποστάσεις. Η ραδιενεργός επίπτωση στην περίπτωση αυτή ονομάζεται 'τοπική' ή 'άμεση'. Συνήθως, τοπικά αποτίθεται πάνω από το 50% της συνολικής ενεργότητας.

### **3.2.2 Επίδραση κλιματολογικών συνθηκών**

Η κατεύθυνση και η έκταση, που καλύπτει η άμεση ραδιενεργός επίπτωση εξαρτώνται από τις μετεωρολογικές συνθήκες, κυρίως από την κατεύθυνση και την ταχύτητα των ανέμων, αλλά και από την ύπαρξη και την ένταση των βροχοπτώσεων. Ειδικότερα, η ραδιενεργός ρύπανση υδάτων ευρισκόμενων σε ανοικτούς χώρους προκαλείται κυρίως μετά από ραδιενεργό βροχόπτωση και χιονόπτωση.

### **3.2.3 Διακίνηση μέσω ποταμών (απορροές)**

Πέρα από τη μεταφορά του  $^{137}\text{Cs}$  μέσω ατμοσφαιρικών οδών, εξαιρετικά σημαντικές είναι κι αυτές που γίνονται μέσω των ποταμών (απορροές). Το  $^{137}\text{Cs}$  μπορεί να μεταφέρεται μέσω τρεχούμενων υδάτων (συμπεριλαμβανομένων και των βρόχινων υδάτων) παρασυρόμενο από το έδαφος, στο οποίο κατέληξε μετά τη ραδιενεργό επίπτωση. Η έντονη ροή των ποταμών το μεταφέρει στο θαλάσσιο περιβάλλον, είτε ως διαλυτό  $^{137}\text{Cs}$  κατα το μεγαλύτερο ποσοστό, είτε προσροφημένο πάνω σε σωματίδια.

## **3.3 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Η διασπορά των ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι θέμα πολύπλοκων γεωβιοχημικών αντιδράσεων, όπως η διάλυση, η υδρόλυση, η συμπλοκοποίηση με οργανικά

και ανόργανα ιόντα, αντιδράσεων οξειδοαναγωγής, σχηματισμού κολλοειδών, προσρόφησης / εκρόφησης σε επιφάνειες ορυκτών, μεταλλευματοποίησης, συγκαταβύθισης και άλλων. Η σπουδαιότητα καθεμιάς από αυτές τις αντιδράσεις προσδιορίζεται σε μεγάλη έκταση από τις χημικές διεργασίες, οι οποίες συμβαίνουν κατά τη διάλυση των ραδιονουκλιδίων. Η μορφή, στην οποία βρίσκεται το ραδιονουκλίδιο στο διάλυμα εξαρτάται από την ιοντική ισχύ του θαλασσινού νερού, την οξειδοαναγωγική του κατάσταση (Eh), την οξύτητα του (pH) και την παρουσία συμπλόκων οργανικών ή ανόργανων ενώσεων (πχ χουμικά συστατικά,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ). Επιπρόσθετα, κολλοειδή και αιωρούμενα σωματίδια βρίσκονται σε αφθονία στο θαλασσινό νερό και άρα, ραδιονουκλίδια, τα οποία εύκολα προσροφώνται, συγκαταβυθίζονται ή εμπλέκονται σε αντιδράσεις ιοντοανταλλαγής, συνδέονται με τη στερεή φάση των σωματιδίων αυτών.

Ο διαχωρισμός των ραδιονουκλιδίων σε διαλυτά και στερεά (αιωρούμενα) είναι θεμελιώδους σημασίας στη μακροπρόθεσμη και βραχυπρόθεσμη μεταφορά τους στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τα ραδιονουκλίδια, τα οποία όταν εισάγονται στο θαλάσσιο περιβάλλον παραμένουν σε διαλυτή μορφή (conservatives), μεταφέρονται μέσω της υδραυλικής ροής των υδάτων και διασπείρονται σε μεγάλες αποστάσεις από το σημείο εισόδου τους και κατανέμονται στην υδάτινη στήλη. Αντίθετα, τα σωματίδια, τα οποία βρίσκονται στη δραστική σωματιδιακή κατάσταση, προσροφώνται στα αιωρούμενα σωματίδια, απορρίπτονται εντελώς από την υδάτινη στήλη και καταλήγουν στα ιζήματα. Η προσρόφηση και η σταδιακή ιζηματογένεση των δραστικών αυτών ραδιονουκλιδίων επιβραδύνει την κίνηση τους σε σχέση με τα εν διαλύσει ραδιονουκλίδια. Έτσι, αυτά παραμένουν για αρκετό χρόνο στις λεκάνες απορροής, γεγονός που οδηγεί στη συσσώρευση τους στην περιοχή των ιζημάτων.

### **3.3.1 Υδροδυναμική μεταφορά**

Η φυσική μεταφορά των διαλελυμένων ραδιονουκλιδίων έγκειται σε ένα συνδυασμό δυο φαινομένων: δημιουργίας ρευμάτων και φαινομένων διασποράς. Τα υδάτινα ρεύματα έχουν να κάνουν με τη μετακίνηση όγκων θαλασσινού νερού, το οποίο μεταφέρει διαλελυμένα ραδιονουκλίδια. Τα φαινόμενα διασποράς στηρίζονται στις διεργασίες ανάμιξης και στρωμάτωσης των ραδιονουκλιδίων στην υδάτινη στήλη. Τέτοιες διεργασίες είναι:

-- η μοριακή διάχυση ή η ανάμιξη των διαλελυμένων ραδιονουκλιδίων, λόγω της τυχαίας διασποράς των μορίων στο υγρό. Ως αποτέλεσμα της τυχαίας κίνησης τα ραδιονουκλίδια τείνουν να κινούνται από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης, σύμφωνα με το νόμο του Fick για τη διάχυση<sup>68 69</sup> (Παράρτημα 4).

-- η τυρβώδης ή στρωτή διάχυση, μια κλιμακωτή διεργασία που προκαλείται από απότομη εναλλαγή στρωτής και τυρβώδους ροής.

Με εξαίρεση το  $^3\text{H}$ , κανένα ραδιονουκλίδιο δεν συμπεριφέρεται απολύτως ως διαλυτό (conservative) στο θαλασσινό νερό και πάντοτε υπάρχει σχέση με τη σωματιδιακή ή τη στερεή φάση. Ωστόσο, ραδιονουκλίδια όπως τα  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{238}\text{U}$  γενικά θεωρούνται ότι βρίσκονται, κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τους, διαλυτά και άρα συμμετέχουν στην αλατότητα της θάλασσας (conservative) και η μεταφορά τους περιγράφεται από φαινόμενα διασποράς και δημιουργίας ρευμάτων.

### **3.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά ραδιονουκλιδίων**

Η μεταφορά ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον δεν εξαρτάται μόνο από τους φυσικούς και χημικούς μηχανισμούς, οι οποίοι περιγράφηκαν προηγουμένως, αλλά επίσης κι από άλλους παράγοντες, όπως η περιοχή και ο τρόπος με τον οποίο τα ραδιονουκλίδια εισάγονται στο περιβάλλον. Όσον αφορά στα διαλυτά ραδιονουκλίδια (conservative), τα οποία εισάγονται στην επιφάνεια κι αποθηκεύονται ομοιόμορφα σε σχετικά ευρείες γεωγραφικές περιοχές (όπως για παράδειγμα μετά από μια παγκόσμια ραδιενεργό επίπτωση, fallout), η αραίωση των επιφανειακών συγκεντρώσεων επιτυγχάνεται μετά από κάθετες διεργασίες ανάμιξης. Ωστόσο, η βύθιση των επιφανειακών υδάτων σε μεσαία ή μεγαλύτερα βάθη μπορεί να οδηγήσει σε οριζόντια διασπορά των ραδιονουκλιδίων, εξαιτίας της κίνησης των υδάτων, λόγω δημιουργίας ρευμάτων. Στην περίπτωση σωματιδιοδραστικών ραδιονουκλιδίων συμβαίνει και μια πρόσθετη κατακόρυφη μεταφορά, λόγω βαρύτητας.

Όσον αφορά σε ραδιονουκλίδια, τα οποία εισάγονται από σημεία αναφοράς (πχ σημεία εκροής πυρηνικών σταθμών), η αρχική διαλυτοποίηση εξαρτάται από τη διαφορά στην πυκνότητα των υδάτων εκροής και των υδάτων - αποδεκτών. Επίσης, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν το βάθος, στο οποίο γίνεται η απόρριψη, τα παλιρροιακά και στροβιλώδη ρεύματα της θάλασσας και η ύπαρξη κυμάτων ως αποτέλεσμα των ανέμων. Μόλις ενσωματωθούν στο θαλάσσιο περιβάλλον τα τοπικά θαλάσσια ρεύματα οδηγούν τα ραδιονουκλίδια μακριά από την πηγή εκροής, ενώ παράλληλα η τυρβώδης κίνηση τα κατανέμει στο χώρο και τα διασπείρει στο βάθος. Ραδιονουκλίδια, τα οποία παραμένουν εν αιωρήσει ή συνδέονται με σωματίδια επηρεάζονται από τις ίδιες διεργασίες ανάμιξης και κίνησης, αλλά επιπρόσθετα κι από την κατακόρυφη κίνηση, εξαιτίας της καθίζησης τους.

### **3.3.3 Κατανομή των ραδιονουκλιδίων της ραδιενεργού επίπτωσης στους ωκεανούς**

Η κύρια πηγή τεχνητών ραδιενεργών συστατικών στους ωκεανούς είναι η ραδιενεργός επίπτωση (fallout), από την εποχή των πυρηνικών δοκιμών στην ατμόσφαιρα. Οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στα επιφανειακά και βαθύτερα ύδατα ελέγχονται στους ωκεανούς για πολλές δεκαετίες. Η παγκόσμια βάση δεδομένων έχει δώσει ανεκτίμητες πληροφορίες, με αποτέλεσμα οι ερευνητές να έχουν κατανοήσει πλήρως τους μηχανισμούς, οι οποίοι ελέγχουν τη διασπορά που ακολουθεί η απόρριψη ραδιονουκλιδίων στο νερό.

-- Διαλελυμένα ραδιονουκλίδια (conservative). Μετρήσεις, οι οποίες έχουν διεξαχθεί στον Ατλαντικό και Ειρηνικό ωκεανό στα μέσα της δεκαετίας το '60 και στις αρχές της δεκαετίας '70, λίγο μετά από την πρώτη ραδιενεργό επίπτωση, έχουν δείξει κατακόρυφη διασπορά των ραδιονουκλιδίων, τα οποία συμμετέχουν στην αλατότητα ( $^3\text{H}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{90}\text{Sr}$ ). Οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων αυτών μειώνονται αυξανόμενου του βάθους, ενώ μετά τα 2000 m βρίσκονται σε ιχνοποσότητες. Μακροχρόνιες μελέτες για τις συγκεντρώσεις  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{90}\text{Sr}$  έχουν δείξει βαθμιαία μείωση συναρτήσει του χρόνου στα επιφανειακά ύδατα, λόγω της ραδιενεργού διάσπασης, που υφίστανται και της φυσικής ανάμιξης, η οποία συνοδεύεται από προοδευτική αύξηση των συγκεντρώσεων στις κατώτερες στοιβάδες. Με βάση τα δεδομένα αυτά, ο αποτελεσματικός χρόνος ημιζωής του  $^{137}\text{Cs}$  είναι 14 χρόνια, ενώ ο μέσος χρόνος παραμονής είναι 26 χρόνια. Παρά τη μείωση του  $^{137}\text{Cs}$  σε μεγαλύτερα βάθη, το περισσότερο (90 - 95 %) παραμένει στην υδάτινη στήλη, αντιστεκόμενο στην καθίζηση και ιζηματογένεση.

-- Αδιάλυτα ραδιονουκλίδια (non - conservative). Η απομάκρυνση των ραδιονουκλιδίων αυτών από την υδάτινη στήλη και συγκεκριμένα από τα επιφανειακά ύδατα ελέγχεται από φυσικούς μηχανισμούς, όπως αυτοί που περιγράφηκαν προηγουμένως για τα διαλυτά ραδιονουκλίδια, αλλά και μέσω της σύνδεσής τους με αιωρούμενα σωματίδια, που οδηγεί σε σταδιακή ιζηματογένεση. Μακροχρόνιες μετρήσεις για  $^{239,240}\text{Pu}$  και  $^{241}\text{Am}$  σε επιφανειακά ύδατα του Ατλαντικού και Ειρηνικού ωκεανού, καθώς και της Μεσογείου έχουν δείξει χρόνους παραμονής πολύ μικρότερους από αυτούς που αναφέρονται στα διαλελυμένα ραδιονουκλίδια (conservative). Οι μικροί χρόνοι παραμονής των υπερουράνιων στοιχείων είναι αναμενόμενοι με το σκεπτικό ότι το μεγαλύτερο ποσοστό βρίσκεται εν αιωρήσει κι άρα συνδέονται με τα αιωρούμενα συστατικά. Σε μεγαλύτερα βάθη, περίπου 10 - 20 % του πλουτωνίου και πάνω από το 50 % του αμερικού παραμένουν στη σωματιδιακή κατάσταση<sup>70</sup>. Σε ύδατα ανοικτών πελάγων, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλής περιεκτικότητας σωματιδιακή φάση, η αναλογία των υπερουράνιων στοιχείων, τα οποία είναι προσροφημένα σε αιωρούμενα σωματίδια είναι πολύ μικρή, 5 % για το πλουτώνιο και 10 % για το αμερίκιο.

Η συσσώρευση των υπερουράνιων στοιχείων, εξαιτίας της αναδιάλυσης των βυθιζόμενων σωματιδίων είναι ο κύριος μηχανισμός, ο οποίος ελέγχει τη μορφοποίηση της κατακόρυφης κατανομής των στοιχείων αυτών στην υδάτινη στήλη. Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά της κατακόρυφης κατανομής των υπερουράνιων στοιχείων παρατηρείται για το  $^{239,240}\text{Pu}$  σε ανοικτά ύδατα με τη μέγιστη τιμή να βρίσκεται στην υποεπιφανειακή στοιβάδα. Παρά τη μείωση των επιφανειακών συγκεντρώσεων πλουτωνίου τα τελευταία 20 χρόνια δεν έχει συμβεί καμιά σημαντική διαφοροποίηση του υποεπιφανειακού μεγίστου. Ωστόσο, υψηλότερες τιμές παρατηρούνται σε βαθύτερα ύδατα και πιστεύεται πως η κύρια οδός μεταφοράς αδιάλυτων ραδιονουκλιδίων (non - conservative) γίνεται μέσω σταδιακής καταβύθισης σωματιδίων ζωοπλαγκτού, στο οποίο τα ραδιονουκλίδια είναι προσροφημένα.

### 3.4 ΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗ

Κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών τα ρεύματα αέρα, τα οποία επικρατούν στα επιφανειακά ύδατα θαλασσών εύκρατων περιοχών, δημιουργούν τυρβώδεις ροές κι άρα ανάμιξη. Λόγω της ισχυρής ανάμιξης και του σχετικά μικρού βάθους, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος της στήλης του νερού. Την άνοιξη, καθώς η ηλιοφάνεια γίνεται εντονότερη, ενώ ρεύματα δεν υπάρχουν, τα επιφανειακά ύδατα αρχίζουν να θερμαίνονται. Λόγω της υψηλής του θερμοκρασίας, το νερό καταλαμβάνει μεγαλύτερο χώρο, γίνεται λιγότερο πυκνό από το ψυχρό και διαχωρίζεται. Από τη στιγμή που η θερμότητα απορροφάται από το επιφανειακό ύδωρ, ο μόνος τρόπος για να θερμανθεί το βαρύτερο νερό είναι μέσω υδραυλικής ανάμιξης. Ωστόσο, σε αυτή την περίοδο του έτους η δύναμη των ανέμων είναι μειωμένη, γι' αυτό σε όλα εκτός των ρηχών περιοχών δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια, ώστε να ξεπεραστεί η δυναμική ενέργεια μεταξύ επιφανειακών και βαθύτερων υδάτων. Στην αρχή της άνοιξης, η μάχη μεταξύ της ενέργειας των ανέμων για να προκαλέσουν ανάμιξη και του ήλιου να προκαλέσει θέρμανση φθάνει στο αποκορύφωμα. Σε αυτή τη φάση το νερό στρωματώνεται. Διαιρείται σε δυο ευδιάκριτες στοιβάδες, μια θερμότερη επιφανειακή στοιβάδα και μια ψυχρότερη βαθύτερη. Το όριο μεταξύ των δυο στοιβάδων καλείται θερμοκλινές και χαρακτηρίζεται με μια απότομη διακύμανση στην περιοχή των θερμοκρασιών, περίπου  $1\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ . Ο διαχωρισμός των δυο στοιβάδων συνεχίζεται και εδραιώνεται το φθινόπωρο, όταν η ταχύτητα των ανέμων αυξάνει και η θερμοκρασία φθίνει. Σε αυτό το σημείο το νερό ξαναγίνεται ομοιογενές.

### 3.5 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΔΑΤΙΝΗ ΣΤΗΛΗ ΣΤΑ ΙΖΗΜΑΤΑ

Ραδιονουκλίδια όπως τα  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  και  $^{244}\text{Cm}$  έχουν ισχυρή τάση να συνδέονται με στερεά (αιωρούμενα σωματίδια) και καλούνται σωματιδιοδραστικά. Έτσι, η μεταφορά τους στο θαλάσσιο περιβάλλον συνδέεται με αυτή των αιωρούμενων σωματιδίων και στηρίζεται στους μηχανισμούς ιζηματογένεσης, οι οποίοι λαμβάνουν χώρα. Υπάρχουν, επίσης, αποδείξεις ότι κολλοειδείς μορφές σωματιδιοδραστικών ραδιονουκλιδίων διαδραματίζουν σημαντικότατο ρόλο στην κινητικότητα των εν λόγω μορίων.

Ραδιονουκλίδια προσροφημένα σε κολλοειδή συστατικά ή σε πολύ λεπτόκοκκα στερεά μεταφέρονται από τη ροή των ρευμάτων, με τον ίδιο ουσιαστικά τρόπο όπως συμβαίνει στα διαλελυμένα ραδιονουκλίδια. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή μπορεί να λαμβάνουν χώρα πρόσθετες διεργασίες μεταφοράς, όπως ιζηματογένεση, επαναιώρηση και κροκίδωση.

Αντίθετα, ραδιονουκλίδια συνδεδεμένα με χονδροκόκκα σωματίδια απορρίπτονται από την υδάτινη στήλη, εξαιτίας της ιζηματογένεσης, και διασπείρονται με διεργασίες, οι οποίες συνδέονται με τη μεταφορά ιζημάτων. Ωστόσο, ιζήματα και αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζονται από τις ίδιες υδροδυναμικές διεργασίες, όπως ακριβώς στη φάση του διαλύματος. Η μόνη διαφορά είναι πως για να γίνει μεταφορά των σωματιδίων και ιζηματογένεση δεν πρέπει να ξεπεραστεί ένα κατώφλι ταχύτητας ροής. Πάνω από αυτό, σωματίδιο και συνδεδεμένο ραδιονουκλίδιο μεταφέρονται εν αιωρήσει μέσω έντονης τυρβώδους ροής. Όταν η ικανότητα της υδραυλικής ροής να μεταφέρει αιωρούμενα συστατικά φθίνει, τότε η περίσσεια των στερεών καθιζάνει κι αποθηκεύεται στη λεκάνη, οδηγώντας σε συσσώρευση των συνδεδεμένων ραδιονουκλιδίων.

Εκτός από την ιζηματογένεση και τη διάβρωση, κι άλλες διεργασίες μπορούν να συνεισφέρουν στην εναλλαγή των διαλυτών και σωματιδιοδραστικών ραδιονουκλιδίων στο σημείο επαφής ιζήματος / νερού. Η μεταφορά με μοριακή διάχυση των διαλυμένων συστατικών μπορεί να λάβει χώρα στην επιφάνεια επαφής, αν η συγκέντρωση παραμένει σταθερή στην ενδιάμεση στοιβάδα (νερού / ιζήματος). Επιπρόσθετα, η βαθμιαία σταθεροποίηση και η περαιτέρω καθίζηση των ιζημάτων έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ανοδικών ρευμάτων στο νερό της ενδιάμεσης στοιβάδας και άρα την επιστροφή των στερεών στην υδάτινη στήλη. Η φυσική ανάμιξη, εξαιτίας επιφανειακών ρευμάτων, κλιματολογικών αιτιών κι αλλιευτικών ενεργειών ή η βιολογική ανάμιξη, η οποία προκαλείται από βενθικούς ή άλλους οργανισμούς, επιτρέπει την ανταλλαγή των υδάτων της ενδιάμεσου στοιβάδας με την επιφανειακή. Τέλος, η εναλλαγή των υδάτων αυτών επιτρέπει την επιστροφή στερεών

σωματιδίων, προερχόμενων από το ίζημα, στην υδάτινη στήλη, επιτρέποντας την προσρόφηση ή εκρόφηση των σωματιδιοδραστικών ραδιονουκλιδίων.

### 3.6 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ $^{137}\text{Cs}$ ΣΤΑ ΙΖΗΜΑΤΑ

Η μελέτη των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ρύπων στα ιζήματα συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση της περιβαλλοντικής διασποράς και εν γένει συμπεριφοράς των ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον και συμπληρώνει τη γενική εικόνα της ραδιενεργού επίπτωσης (fallout). Από την άλλη πλευρά υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός δεδομένων από τις βασικές μελέτες της φυσικής ραδιενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον, που εκτός από τη χαρτογράφηση των επιπέδων φυσικής ραδιενέργειας, έχει ιδιαίτερη σημασία στην εκτίμηση των δόσεων, που λαμβάνονται από τους θαλάσσιους οργανισμούς, αλλά και στον υπολογισμό των παραγόντων συγκέντρωσης, προσρόφησης και εκλεκτικής βιοσυσώρευσης των ραδιονουκλιδίων από τους οργανισμούς. Είναι, επίσης, γνωστό ότι τα φυσικά ραδιονουκλίδια μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τα εν γένει συστατικά του θαλασσίου περιβάλλοντος. Ένας αριθμός ραδιενεργών ζευγών των σειρών ουρανίου και θορίου σε συνάρτηση μεταξύ τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ιχνηθέτες για τις διάφορες μορφές των χημικών ουσιών, όπως επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό μιας χρονικής κλίμακας για τον υπολογισμό των βιογεωχημικών κύκλων στο θαλάσσιο περιβάλλον .

Τα ραδιονουκλίδια εισέρχονται στα ιζήματα των παράκτιων περιοχών με διάφορους τρόπους και μορφές όπως καθίζηση, αλληλεπίδραση μεταξύ σωματιδίων ιζήματος - ραδιονουκλιδίου, ιοντοανταλλαγή, υπό μορφή διαλύματος σε κolloειδή μορφή, σε συσσωματώματα κρυστάλλων κ.α. Η διασπορά και κατανομή των ραδιονουκλιδίων στα ιζήματα εξαρτώνται από τις διάφορες οικολογικές διεργασίες των παράκτιων περιοχών και επηρεάζονται από την αλατότητα, τη χλωριότητα, το pH του νερού, παράγοντες που ποικίλλουν ανάλογα με τις διάφορες συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Σχετικά με τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα η μελέτη των συγκεντρώσεων τους στα ιζήματα είναι σημαντική για την κατανόηση της διασποράς και κατανομής των συγκεκριμένων ραδιονουκλιδίων, που διοχετεύονται στο θαλάσσιο περιβάλλον από τις βιομηχανικές εφαρμογές και πυρηνικές δοκιμές. Είναι, επίσης, σημαντική γιατί αυτά τα ραδιονουκλίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ιχνηθέτες για την περιγραφή ωκεανογραφικών παραμέτρων και διαδικασιών, όπως για παράδειγμα της ταχύτητας ιζηματογένεσης μιας περιοχής. Τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα της ραδιενεργού επίπτωσης (fallout), τείνουν μέσω των βιολογικών και φυσικών πορειών στο θαλάσσιο περιβάλλον να μετακινούνται σε μεγαλύτερα

βάθη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το θαλάσσιο υπόστρωμα να αποτελεί και την τελική «αποθήκη» των μακρόβιων τεχνητών ραδιοϊσοτόπων<sup>71</sup>.

Η μεταφορά των τεχνητών ραδιονουκλιδίων, μέσω της υδάτινης στήλης, στα ιζήματα σχετίζεται άμεσα με την πορεία ιζηματογένεσης (μεταφορά και εναπόθεση σωματιδίων στον πυθμένα). Παράλληλα, τα ιζήματα παρουσιάζουν μια φάση δυναμικής ανταλλαγής με την υδάτινη φάση, που αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό ή και το συνολικό λεπτόκοκκο κλάσμα του ιζήματος. Οπωσδήποτε, η πορεία ιζηματογένεσης στην υποαιγιαλίτιδα ζώνη παρουσιάζεται περισσότερο πολύπλοκη και εξαρτώμενη από πολλούς παράγοντες, σε σχέση με την αντίστοιχη πορεία στην πελαγική ζώνη. Αυτό οφείλεται στην ανομοιογένεια των υδάτων της υποαιγιαλίτιδας ζώνης, λόγω της ανάμιξης που υφίστανται με την έντονη δράση των κυμάτων και την επίδραση της ξηράς, μέσω των καιρικών διαδικασιών (βροχοπτώσεις) και τις απορροές γλυκών νερών. Αυτοί οι παράγοντες περιβαλλοντικής διαταραχής έχουν ως αποτέλεσμα την ελάττωση της αλατότητας, καθώς και διακυμάνσεις στο φορτίο των ραδιονουκλιδίων, που μεταφέρεται από την ξηρά<sup>72</sup>.

Γενικά, η ταχύτητα καταβύθισης και εναπόθεσης ενός ραδιονουκλιδίου στο υπόστρωμα εξαρτάται από τη διαλυτότητα του στο θαλασσινό νερό και την ευκολία με την οποία ενσωματώνεται στα αιωρούμενα σωματίδια. Τα ισχυρά ευδιάλυτα ραδιονουκλίδια (πχ κάσιιο και ιώδιο) εναποτίθενται στον πυθμένα σε πολύ μεγαλύτερο χρόνο (από το χρόνο προσθήκης του στο θαλάσσιο περιβάλλον), από ότι το ρουθίνιο και το δημήτριο, που ενσωματώνονται τάχιστα. Το ιζήμα είναι ο τελικός αποδέκτης των ρυπογόνων στοιχείων στη θάλασσα και γι' αυτό καθίσταται σημαντική παράμετρος αξιολόγησης της οικολογικής κατάστασης μιας περιοχής.

### **3.7 ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΥΔΑΤΙΝΗ ΣΤΗΛΗ <sup>137</sup>Cs ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΟΥ ΣΕ ΙΖΗΜΑΤΑ**

Γενικά, τα ραδιονουκλίδια, τα οποία είναι δεσμευμένα σε ιζήματα, χάνονται εντελώς από το σύστημα, λόγω διαδοχικών σχάσεων (σταθεροποίηση), μετά από παραμονή για πολλά χρόνια. Ωστόσο, υπάρχουν δυο διεργασίες, οι οποίες μπορεί να επαναφέρουν τα ραδιονουκλίδια πίσω στην υδάτινη στήλη. Αν συμβούν χημικές αλλαγές στο ιζήμα, συνηθέστερα οξειδοαναγωγικές, τότε μπορεί μερικά ραδιενεργά ιόντα να επανέλθουν στην υδάτινη στήλη. Το πιο κοινό παράδειγμα τέτοιας διεργασίας είναι η επανακινητοποίηση του <sup>137</sup>Cs σε αναερόβια ιζήματα, ενώ κι άλλα ραδιονουκλίδια μπορεί να επανακινητοποιηθούν. Η δεύτερη διεργασία, η οποία μπορεί να συμβαίνει σε ρηχά νερά είναι ο έντονος κυματισμός, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα την επαναιώρηση σωματιδίων. Τα ραδιονουκλίδια, τα οποία είναι

προσροφημένα στα σωματίδια αυτά εκροφώνται κι άρα απελευθερώνονται στην υδάτινη στήλη, όπου βρίσκονται εν διαλύσει.

### **3.8 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ <sup>137</sup>Cs ΣΤΟΥΣ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ**

Οι θαλάσσιοι οργανισμοί διαφέρουν από εκείνους της ξηράς, γιατί προσλαμβάνουν πολλές μεταλλικές ουσίες με διάφορες διαδικασίες ανταλλαγής με το υδάτινο περιβάλλον τους. Για παράδειγμα, στους ιχθύς η κατακράτηση των μεταλλικών ουσιών στους διάφορους ιστούς και όργανα των οργανισμών, μέσω των βραγχίων, πτερυγίων και της επιφάνειας του σώματος τους, αποτελεί μια σημαντική οδό προσρόφησης ραδιονουκλιδίου. Γενικά, οι ζωικοί οργανισμοί διηθούν τεράστιες ποσότητες νερού, με αποτέλεσμα η οδός των βραγχίων να αποτελεί σημαντικότερο τρόπο εισαγωγής των συγκεκριμένων ρυπαντών στον οργανισμό. Οι ποσότητες των ραδιονουκλιδίων, που εισέρχονται μέσω της τροφής εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, με κυριότερο την αφθονία της διαθέσιμης τροφής. Έχει βρεθεί ότι μέσω της οδού του πεπτικού συστήματος μεταφέρονται μικρότερες ποσότητες ραδιονουκλιδίων, σε σχέση με της οδούς της απευθείας προσρόφησης και απορρόφησης από το νερό, μέσω της επιφάνειας του σώματος και των βραγχίων<sup>73</sup>.

Τα επίπεδα βιοσυσσώρευσης των ραδιενεργών ουσιών στους θαλάσσιους οργανισμούς επηρεάζονται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως θερμοκρασία, αλατότητα, επίπεδα συγκεντρώσεων ραδιονουκλιδίων και σταθερών στοιχείων (με συνεργετική ή ανταγωνιστική δράση) των αβιοτικών συστατικών. Επίσης, η βιοσυσσώρευση ραδιονουκλιδίων εξαρτάται και από βιολογικούς παράγοντες, όπως το στάδιο ανάπτυξης ή το είδος του οργανισμού.

### **3.9 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ**

Σύμφωνα με τα προηγούμενα η ακτινοβολία αντιδρά με το σώμα του ανθρώπου με την εναπόθεση ενέργειας, η οποία αλλοιώνει τη δομή και τη λειτουργία των ενζύμων, των πρωτεϊνών του κυττάρου, αλλά και τη δομή και λειτουργία του DNA κάθε κυττάρου, το οποίο καθορίζει, μέσω των ενζύμων και των πρωτεϊνών, τη δομή και τη λειτουργία ολόκληρου του κυττάρου. Αν τα κύτταρα, που εκτέθηκαν σε ακτινοβολία είναι σωματικά κύτταρα του ανθρώπου, τότε οποιαδήποτε αλλοίωση αφορά στην υγεία του ατόμου, που εκτέθηκε σε αυτή. Αν όμως τα κύτταρα είναι αναπαραγωγικά, για παράδειγμα κύτταρα των ωοθηκών, τότε, εφόσον οι αλλοιώσεις εισέλθουν σε γενετικά κύτταρα, δηλαδή στα ωάρια, είναι δυνατό

να δημιουργηθούν προβλήματα στην υγεία των απογόνων. Επομένως, η έκθεση σε ακτινοβολία είναι δυνατό να δημιουργήσει προβλήματα υγείας, που αφορούν τόσο τα άτομα, που εκτέθηκαν σε αυτήν, όσο και τους απογόνους τους. Γενικά, παρατηρούνται δύο κατηγορίες συνεπειών στην υγεία, οι στοχαστικές και οι μη στοχαστικές επιπτώσεις<sup>74</sup>.

### **3.9.1 Στοχαστικές επιπτώσεις**

Η λέξη στοχαστικές αναφέρεται σε φαινόμενα, που συμβαίνουν τυχαία, δηλαδή η εμφάνιση μιας στοχαστικής επίπτωσης είναι θέμα τυχαίο. Για παράδειγμα, ο καρκίνος των πνευμόνων αναφέρεται ως στοχαστική επίπτωση του καπνίσματος. Δηλαδή, μερικοί άνθρωποι, που ποτέ τους δεν κάπνισαν εμφανίζουν καρκίνο των πνευμόνων, ενώ άλλοι, που καπνίζουν συνεχώς και για χρόνια, δεν εμφανίζουν. Οι δυο σοβαρότερες στοχαστικές επιπτώσεις της έκθεσης σε ακτινοβολία είναι ο καρκίνος και οι βλάβες του γενετικού υλικού<sup>75</sup>.

Οι στοχαστικές επιπτώσεις, συνήθως, σχετίζονται γενικά με μακρόχρονη έκθεση σε ακτινοβολία χαμηλού επιπέδου και προέρχονται συνήθως από βλάβες από ακτινοβολία, που προκλήθηκαν αρχικά μόνο σε μερικά κύτταρα. Ο ακριβής προσδιορισμός των επιπτώσεων της ακτινοβολίας χαμηλού επιπέδου (10 - 20 mrem ή λιγότερο) είναι εξαιρετικά δύσκολος, γιατί αυτές δεν είναι άμεσα εμφανείς. Εξαιτίας της πιθανολογικής φύσεως των στοχαστικών επιπτώσεων και του γεγονότος ότι μπορεί να εμφανιστούν δεκαετίες μετά το συμβάν, που τις προκάλεσε, είναι πρακτικά αδύνατο να πραγματοποιηθεί σύνδεση μιας συγκεκριμένης έκθεσης σε ακτινοβολία με μια δεδομένη στοχαστική επίπτωση σε ένα πρόσωπο<sup>76</sup>.

Οι αρχικές επιπτώσεις της ακτινοβολίας λαμβάνουν χώρα σε μοριακό επίπεδο. Ο ιοντισμός και η διέγερση των μορίων σε έναν οργανισμό μπορεί να μεταβάλλει τη χημική τους φύση. Οι βιολογικές συνέπειες αυτών των ιοντισμών εξαρτώνται από την ταυτότητα και τον αριθμό των μορίων, που επηρεάστηκαν. Βλάβες από ακτινοβολία σε μόρια πρωτεϊνών, που αποτελούν τα πιο σπουδαία δομικά υλικά και φυσιολογικά μόρια ενός ζωντανού συστήματος, μπορούν να προκαλέσουν άμεσα ανεπιθύμητες επιπτώσεις στη δομή και τη λειτουργία του οργανισμού. Το πιθανότερο, όμως, είναι οι μεταβολές να μην είναι άμεσα παρατηρήσιμες, αλλά να προκαλέσουν κάποια λειτουργική ανωμαλία στο μέλλον. Ο πιο σημαντικός μηχανισμός με τον οποίο η ακτινοβολία επιδρά στην ύλη είναι η παραγωγή ελευθέρων ριζών. Οι ελεύθερες ρίζες παρουσιάζουν μεγάλη δραστικότητα και μπορούν να αντιδράσουν με πολλούς τρόπους με τα βιομόρια. Η παραγωγή των ελευθέρων ριζών συνήθως προέρχεται από αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με τα πολυπληθή στον οργανισμό μόρια ύδατος, οπότε παράγονται οι πολύ δραστικές ρίζες υδροξυλίου (OH·) ή το ισχυρό οξειδωτικό υπεροξειδίου του υδρογόνου (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

Οι παρατηρήσιμες στοχαστικές επιπτώσεις είναι καρκινογενέσεις και κληρονομικές μεταβολές. Ο καρκίνος είναι μια σωματική επίπτωση, δηλαδή μια ανωμαλία των μη παραγωγικών κυττάρων του οργανισμού. Οι σωματικές επιπτώσεις επηρεάζουν μόνο έναν οργανισμό κι όχι τους απογόνους του. Η λευχαιμία είναι η πλέον συνηθισμένη μορφή καρκίνου, που προκαλείται, εξαιτίας της μεγάλης ευαισθησίας του αιματοποιητικού συστήματος στην ακτινοβολία. Άλλοι τύποι καρκίνων είναι λιγότερο πιθανό να προκληθούν από έκθεση σε ακτινοβολία. Επίσης, τα μόρια, που μεταδίδουν κληρονομική πληροφορία μπορεί επίσης να υποστούν βλάβες από την ακτινοβολία. Αν επηρεαστεί το γενετικό υλικό του οργανισμού από την ακτινοβολία, είναι δυνατό να προκύψουν μεταλλάξεις, που μπορεί να γίνουν εμφανείς στις επόμενες γενιές. Οι επιπτώσεις αυτές ονομάζονται γενετικές ή κληρονομικές<sup>77</sup>.

### **3.9.2 Μη στοχαστικές επιπτώσεις**

Οι μη στοχαστικές επιπτώσεις δεν παρουσιάζουν τυχαιότητα ως προς την εμφάνιση τους, δηλαδή η εμφάνιση τους από ένα επίπεδο δόσης και πάνω είναι βέβαιη και το μέγεθος τους συνδέεται άμεσα με το μέγεθος της απορροφούμενης δόσης. Οι μη στοχαστικές επιπτώσεις συνδέονται με την ύπαρξη ενός επιπέδου κατωφλίου, κάτω από το οποίο δεν εμφανίζονται παρατηρήσιμες μεταβολές, ενώ πάνω από αυτό η εμφάνιση τους θεωρείται σχεδόν βέβαιη<sup>75 1</sup>.

Οι μη στοχαστικές επιπτώσεις της ακτινοβολίας στον άνθρωπο αναφέρονται συνήθως σε μεγάλες δόσεις, που ελήφθησαν σε μικρό χρονικό διάστημα και αφορούν σε όλο το σώμα κι όχι σε μερικά κύτταρα. Σε αντίθεση με τις στοχαστικές, οι μη στοχαστικές επιπτώσεις εμφανίζονται αμέσως μετά την έκθεση σε μεγάλη δόση ακτινοβολίας κι έτσι μπορεί να στηριχτεί μια επιβεβαιωμένη σχέση μεταξύ αιτίας κι επίπτωσης. Η σοβαρότητα της επίπτωσης εξαρτάται από τη συνολική δόση, το χρόνο λήψεως, το τμήμα του σώματος, που ακτινοβολήθηκε, την εσωτερική ή εξωτερική έκθεση και την ηλικία του ατόμου. Νεαρά παιδιά είναι πιο ευαίσθητα στις ανεπιθύμητες επιπτώσεις της ακτινοβολίας από τους ενήλικες.

# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

### ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ



## 4 ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται η παρουσίαση δυο μεθόδων ισοτοπικής προσυγκέντρωσης για τον τελικό προσδιορισμό του  $^{137}\text{Cs}$  με σκοπό τη μέτρηση με γ-φασματομετρική ανάλυση. Η συμβατική AMP μέθοδος (φωσφομολυβδαινικό αμμώνιο,  $(\text{NH}_4)_3\text{P}(\text{Mo}_3\text{O}_{10})_4$ ) βασίζεται στη χημική επεξεργασία του  $^{137}\text{Cs}$  και συγκαταβύθιση του, υποβοηθούμενη από ομόλογο ισοτοπικό φορέα  $^{134}\text{Cs}$ . Το τελικό δείγμα είναι χαρακτηριστικό κίτρινο ίζημα, στο οποίο είναι δεσμευμένο το  $^{137}\text{Cs}$  και ο ισοτοπικός φορέας  $^{134}\text{Cs}$ <sup>78</sup>. Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στην προσυγκέντρωση του καισίου επί τόπου (*in situ*), με χρήση φυγοκεντρικής αντλίας. Η αντλία, η οποία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω, αποτελείται από τον κινητήρα, τέσσερα καλύματα πολυαιθυλενίου, που περιέχουν τα φίλτρα, ένα ροόμετρο και το σωλήνα πίεσης, που περιέχει τις μπαταρίες και τον πίνακα ελέγχου. Σε αυτή την περίπτωση το τελικό δείγμα είναι στάχτη, που προέρχεται από την καύση των φίλτρων, στα οποία είναι δεσμευμένο το  $^{137}\text{Cs}$ .

Το τελικό δείγμα και στις δυο περιπτώσεις φέρεται σε ειδικό κυάθιο μέτρησης για μέτρηση σε γ - φασματομετρική διάταξη.

### 4.2 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΙΑ

- 1 Στερεό  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  p.a. 99.5% (Fluka 250 g)
- 2 Στερεό  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  p.a. 98% (Fluka 250 g)
- 3 Μικροκρυσταλλικό  $(\text{NH}_4)_3\text{P}(\text{Mo}_3\text{O}_{10})_4$  p.a. 98% (Carlo Erba 100 g)
- 4  $\text{HNO}_3$  p.a. 65% (Carlo Erba 1 l) για τη ρύθμιση του pH
- 5 10%  $\text{HNO}_3$  για πρόπλυση των δοχείων
- 6 0.05 N  $\text{HNO}_3$  για τη μεταφορά του ιζήματος από τα δοχεία καταβύθισης στο ποτήρι ζέσης 2 L
- 7 Διάλυμα  $^{134}\text{Cs}$  (CsCl σε 0.1 M HCl, αραιωμένο σε νερό) ενεργότητας  $2.25 \text{ Bq ml}^{-1}$  (Isotope Products Europe Blaseg GMBH) (μετρήθηκε στις 2/09/2004)
- 8 Διάλυμα  $^{134}\text{Cs}$  (CsCl σε 0.1 M HCl, αραιωμένο σε νερό) ενεργότητας  $5 \text{ Bq ml}^{-1}$  (Isotope Products Europe Blaseg GMBH) (μετρήθηκε στις 11/01/2005)
- 9 Σημειακές πηγές για τη βαθμονόμηση της ενέργειας του συστήματος γ – φασματομετρίας (Isotope Products Europe Blaseg GMBH)

10 Εμποτισμένα με  $^{226}\text{RaNO}_3$  φίλτρα ενεργότητας 240 Bq για τη βαθμονόμηση της απόδοσης του συστήματος  $\gamma$  - φασματομετρίας (Isotope Products Europe Blaseg GMBH)

#### 4.3 ΣΚΕΥΗ

- 1 Ποτήρι ζέσης 2 l
- 2 Πλαστικά δοχεία 20 l για τη δειγματοληψία
- 3 Φιάλη Erlenmeyer 5 l
- 4 Πλαστικά δοχεία 30 l για την καταβύθιση (Εικόνα 4.1)
- 5 Ογκομετρική φιάλη 1 l



Εικόνα 4.1: Πλαστικά δοχεία καταβύθισης

- 6 Ογκομετρικός κύλινδρος 2000 ml
- 7 Σιφώνια των 10 ml
- 8 Ποτήρια ζέσης των 10 και 50 ml
- 9 Φίλτρα βαμβακερά, πορώδους 1 και 10  $\mu\text{m}$ , μήκους  $9 \frac{7}{8}$  inch (Εικόνα 4.2)



Εικόνα 4.2: Τα χρησιμοποιούμενα φίλτρα

10 Κυάθιο μέτρησης (white cup) για  $\gamma$  - φασματομετρία. Το κυάθιο μέτρησης χαρακτηρίζεται από 68 mm ύψος, 200 mm διάμετρο και καλύπτεται από ένα πλέξιγκλας υλικό 4 mm πάχους και εφαρμόζεται πάνω στον κρύσταλλο Ge (HrGe) (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3: Το κυάθιο μέτρησης

#### 4.4 ΟΡΓΑΝΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

1. Αντλία αέρα Millipore
2. Mark Electronic Balance, Bell Engineering
3. Κλίβανοι για την αποτέφρωση των δειγμάτων (Εικόνα 4.4)



Εικόνα 4.4: Οι κλίβανοι αποτέφρωσης

4 Σύστημα  $\gamma$  – φασματομετρίας. Χρησιμοποιείται η υψηλής ανάλυσης φασματομετρική διάταξη ακτίνων  $\gamma$ - με ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου (HpGe detector), σχετικής απόδοσης 90% (CANBERRA Coaxial Ge Detector Systems) για πρόγραμμα υπολογιστή (software) (CANBERRA Genie 2000)<sup>79 80</sup> (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Γάμμα φασματοσκοπική διάταξη

#### 4.5 ΟΡΓΑΝΑ ΠΕΔΙΟΥ

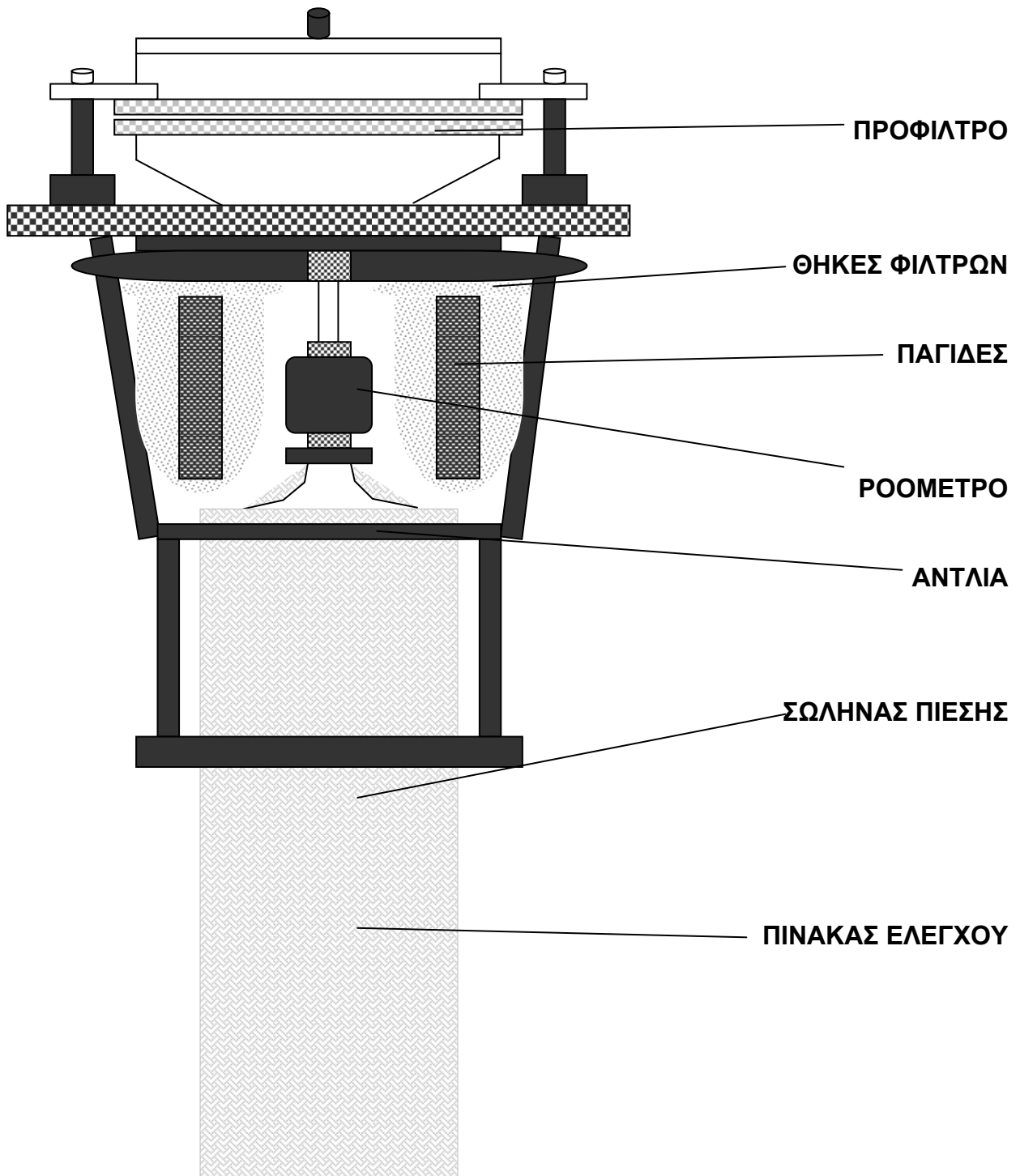
- 1 Πολύμετρο YSI 53 για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, του pH, της αγωγιμότητας και της αλατότητας του νερού

2 Δειγματολήπτης *in situ* προσυγκέντρωσης (εμπλουτισμού) δείγματος – φυγοκεντρική αντλία. Χρησιμοποιείται ο δειγματολήπτης σωματιδίων ανοικτού πελάγους για «επί τόπου» μετρήσεις, τύπου Mark 3 φυγόκεντρος αντλία, της εταιρίας Challenger Oceanic (Εικόνα 4.6). Σκοπός της χρήσης της συσκευής είναι η παραγωγή ικανοποιητικού αριθμού δειγμάτων για κατάλληλες χημικές αναλύσεις, ακόμα και στις χαμηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων, που μετρώνται σε μεσαία ωκεάνια βάθη. Έτσι, δεν χρειάζεται να μεταφερθούν στο εργαστήριο οι μεγάλες ποσότητες ύδατος, που απαιτούνται για τέτοιου είδους αναλύσεις. Ο δειγματολήπτης είναι σχεδιασμένος να φιλτράρει περισσότερο από 1 m<sup>3</sup> νερού σε 1 ώρα. Ο όγκος του νερού, ο οποίος φιλτράρεται, εξαρτάται από τη συγκέντρωση των κατακρατούμενων σωματιδίων, τη διάρκεια της άντλησης, τη διάμετρο και το πλέγμα των χρησιμοποιούμενων φίλτρων. Η συγκεκριμένη μονάδα είναι κατασκευασμένη να λειτουργεί έως 5500 m βάθος <sup>81</sup>.



Εικόνα 4.6: Δειγματολήπτης *in situ* εμπλουτισμού δείγματος

Πρόκειται για μαγνητική φυγόκεντρο αντλία, τοποθετημένη στο πάνω μέρος ενός σωλήνα πίεσης. Αποτελείται από τον κινητήρα, επαναφορτιζόμενες ή αναλώσιμες μπαταρίες για την παραγωγή ενέργειας, τον ανεξάρτητο φορτιστή (power supply) και ένα χρονόμετρο για τον έλεγχο της δειγματοληψίας. Ο όγκος της δειγματοληψίας ελέγχεται από ένα μηχανικό ροόμετρο (Εικόνα 4.7 - Πίνακας 4.1).



Εικόνα 4.7: Αναλυτικά τα μέρη του δειγματολήπτη

Πίνακας 4.1: Αναλυτική περιγραφή των μερών ενός Mark III δειγματολήπτη

<b>Σωλήνας Δημιουργίας Πίεσης</b>	Κράμα αργιλίου σε άνοδο, νάιλον σφικτήρες και βάσεις, συνδέσεις και καλώδια από τιτάνιο.
<b>Αντλία</b>	Φυγόκεντρος αντλία με κεραμικές επιφάνειες και με κινητήρα που λειτουργεί με ηλεκτρομαγνήτη
<b>Θήκες φίλτρων</b>	Θήκες διαμέτρου 293 mm από πολυπροπυλένιο
<b>Πρόφιλτρο</b>	Δισκοειδή φίλτρα Dornic Hunter Asypore για ραδιενεργούς πυρήνες από συνθετική κυτταρίνη, πορώδους 1-5 μm
<b>Φυσίγγια (Cartridges)</b>	2-4 φίλτρα σε σειρά (Scavengers) για ραδιενεργούς πυρήνες. Πχ. Nucloporo μεγέθους 0.4-1 μm, μίγματος οξειδίων του Mn για τη δέσμευση των ισοτόπων του ουρανίου, ή σιδηροκυανιούχων για διαλυτοποιημένα συστατικά
<b>Μπαταρίες</b>	Επαναφορτιζόμενες μπαταρίες μολύβδου-οξέος 2x16 V, 5 A ή μη επαναφορτιζόμενες αλκαλικές
<b>Χρονόμετρο</b>	Μαγνητικά ενεργοποιήσιμο χρονόμετρο, με 999.9 hr χρονοκαθυστέρηση και 9.9 hr χρόνο άντλησης ή Laptop
<b>Ροόμετρο</b>	Μηχανικό ροόμετρο μετακινούμενο με ακρίβεια $\pm 2\%$ για ταχύτητες ροής 100-300 l/min
<b>Ανάπτυξη</b>	Καλώδια πλοίου για ωκεάνιο βάθος-χρήση αγωγίμου καλωδίου
<b>Διαστάσεις</b>	1000 mm μήκος x 400 mm πλάτος x 500 mm πάχος
<b>Βάρος στον αέρα</b>	40 kg ανεξάρτητο από τη διαμόρφωση
<b>Βάρος στο νερό</b>	20 kg ανεξάρτητο από τη διαμόρφωση
<b>Όγκος δείγματος</b>	Περίπου 1000 l/hr για μεσαία ωκεάνια βάθη
<b>Μετρούμενο Βάθος</b>	5500 m

## 4.6 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Πραγματοποιήθηκαν 3 πλόες, 1 στον Κρυσσαίο κόλπο (Κορινθιακός κόλπος) (καλοκαίρι 2004) και 2 στον Πατραϊκό κόλπο (φθινόπωρο 2004 και άνοιξη 2005) με σκοπό την εποχιακή διακύμανση του  $^{137}\text{Cs}$ .

### 4.6.1 Κρυσσαίος κόλπος

Αρχικά επιλέχθηκε η περιοχή του Κρυσσαίου κόλπου (Ιτέας) της ευρύτερης περιοχής του Κορινθιακού κόλπου. Η περιοχή αυτή είναι σημαντική, λόγω της τουριστικής της ανάπτυξης, αλλά κι εξαιτίας της γεινίασης της με το εργοστάσιο επεξεργασίας βωξίτη «Αλουμίνιο της Ελλάδος». Κατά την παραγωγή αλουμινίου προκύπτουν παραπροϊόντα, πλούσια σε ουράνιο και θόριο, τα οποία καλούνται «κόκκινη ιλύς». Η απόρριψη της κόκκινης ιλύος στο θαλάσσιο περιβάλλον, μέσω ειδικών συστημάτων απορροής, είναι η πιο κοινή μέθοδος στη βιομηχανία αλουμινίου. Εξαιτίας του γεγονότος της εκμετάλλευσης των πετρωμάτων και της εν συνεχεία απόρριψής τους στο θαλάσσιο περιβάλλον και λόγω της χρόνιας απόθεσης  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος ίσως είναι χρήσιμο να προσδιοριστεί η διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  στο θαλάσσιο περιβάλλον της περιοχής. Η ανάγκη για την εκτίμηση της διασποράς του  $^{137}\text{Cs}$  έγκειται στο ότι έχει χημική συγγένεια με το κάλιο, καθώς και στο γεγονός ότι υπάρχει επίδραση της ξηράς, εξαιτίας απορροών.

Η περιοχή του Κρυσσαίου κόλπου επιλέχθηκε για συλλογή μόνο επιφανειακών δειγμάτων και με τις δυο μεθόδους τις ημερομηνίες 10 έως 14 Ιουλίου 2004. Ελήφθησαν 3 δείγματα των 120 l το καθένα από 3 διαφορετικούς σταθμούς (Εικόνα 4.7) για τη μέθοδο συγκαταβύθισης. Τέλος, στον σταθμό 3 δοκιμάστηκαν πρότυπα φίλτρα, προκατασκευασμένα από την εταιρία Challenger Oceanic, διάφορου συγκέντρωσης, για τη μέθοδο της *in situ* προσυγκέντρωσης. Αυτό έγινε για να προσδιοριστεί η βέλτιστη συγκέντρωση, στην οποία αποτίθεται περισσότερο κάισιο στα φίλτρα, καθώς και η ροή του δειγματολήπτη, καθώς κι αν ήταν δυνατό η μη αναγκαιότητα της παρασκευής τέτοιων φίλτρων στο εργαστήριο.



Εικόνα 4.8: Οι σταθμοί δειγματοληψίας στον Κρισσαίο κόλπο (κλίμακα 1:100000)

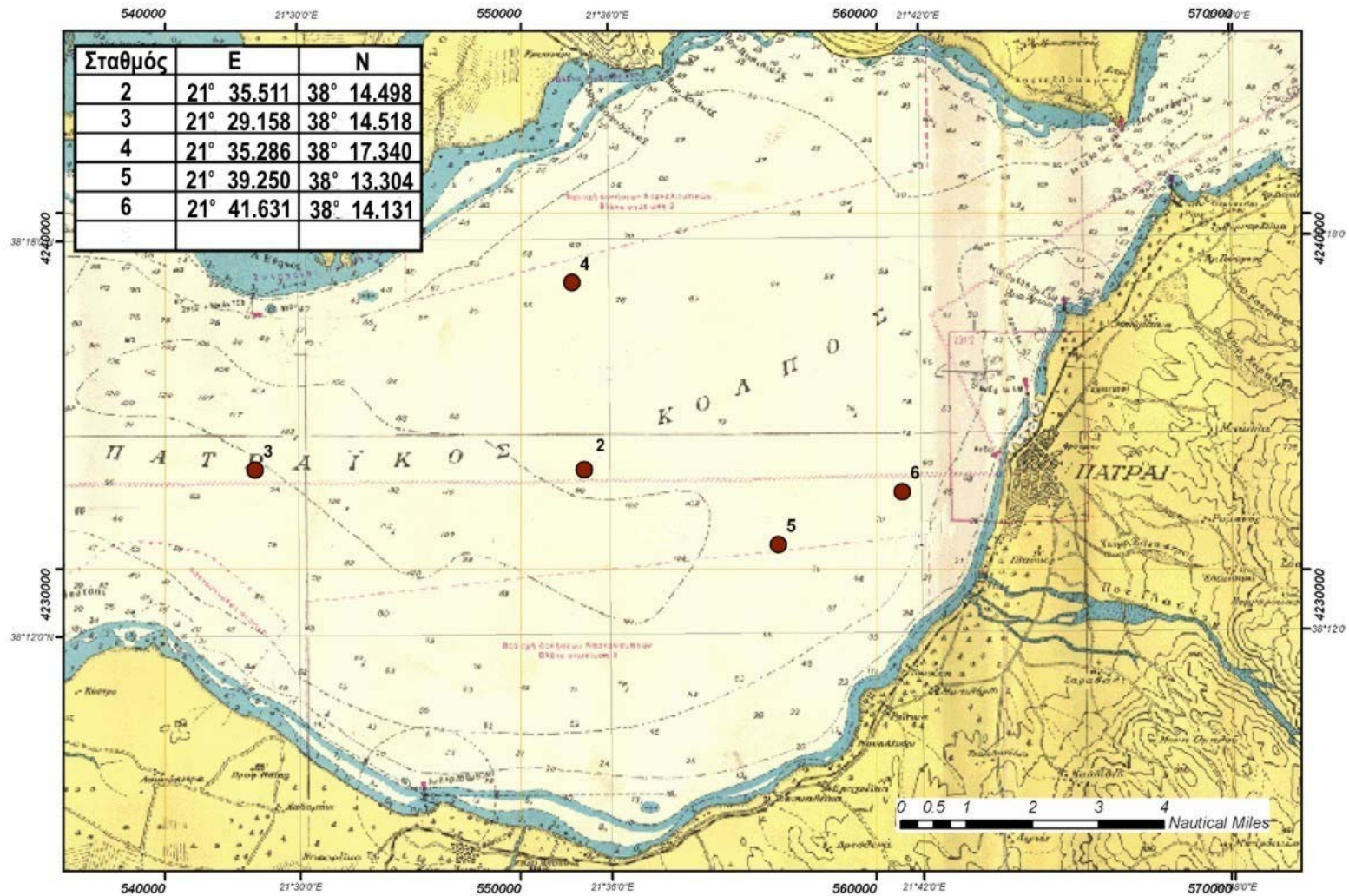
#### **4.6.2 Πατραϊκός κόλπος (Σεπτέμβριος 2004)**

Το σκεπτικό της επιλογής του Πατραϊκού κόλπου ήταν ότι ενώ έχει γίνει εκτενής μελέτη διαφόρων ρύπων στην περιοχή<sup>82 83 84 85</sup>, δεν έχει ποτέ προσδιοριστεί η οριζόντια διασπορά και η κατακόρυφη κατανομή του <sup>137</sup>Cs. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονες απορροές από την ξηρά, γρήγορη ιζηματογένεση και επίδραση από αστικά και βιομηχανικά λύματα (οργανικά απόβλητα, χουμικά συστατικά). Υδάτινες μάζες του Ιονίου εισέρχονται στον Πατραϊκό κόλπο και κινούνται κατά μήκος της νότιας ακτογραμμής του, ενώ υδάτινες μάζες του Κορινθιακού, δια μέσου του στενού του Ρίου-Αντίριου επηρεάζουν κυρίως το Β.Α-ικό τμήμα του κόλπου<sup>86</sup>. Η κυκλωνική κίνηση των υδάτων έχει επιβεβαιωθεί και με ρευτομετρήσεις (περίοδος: Αυγ. 1980) στο υποεπιφανειακό στρώμα του κόλπου<sup>87</sup>. Τέλος, δεν μπορεί να παραβλέψει κανείς το χαμηλότερο κόστος, εξαιτίας της σχετικά μικρής απόστασης από την Αθήνα.

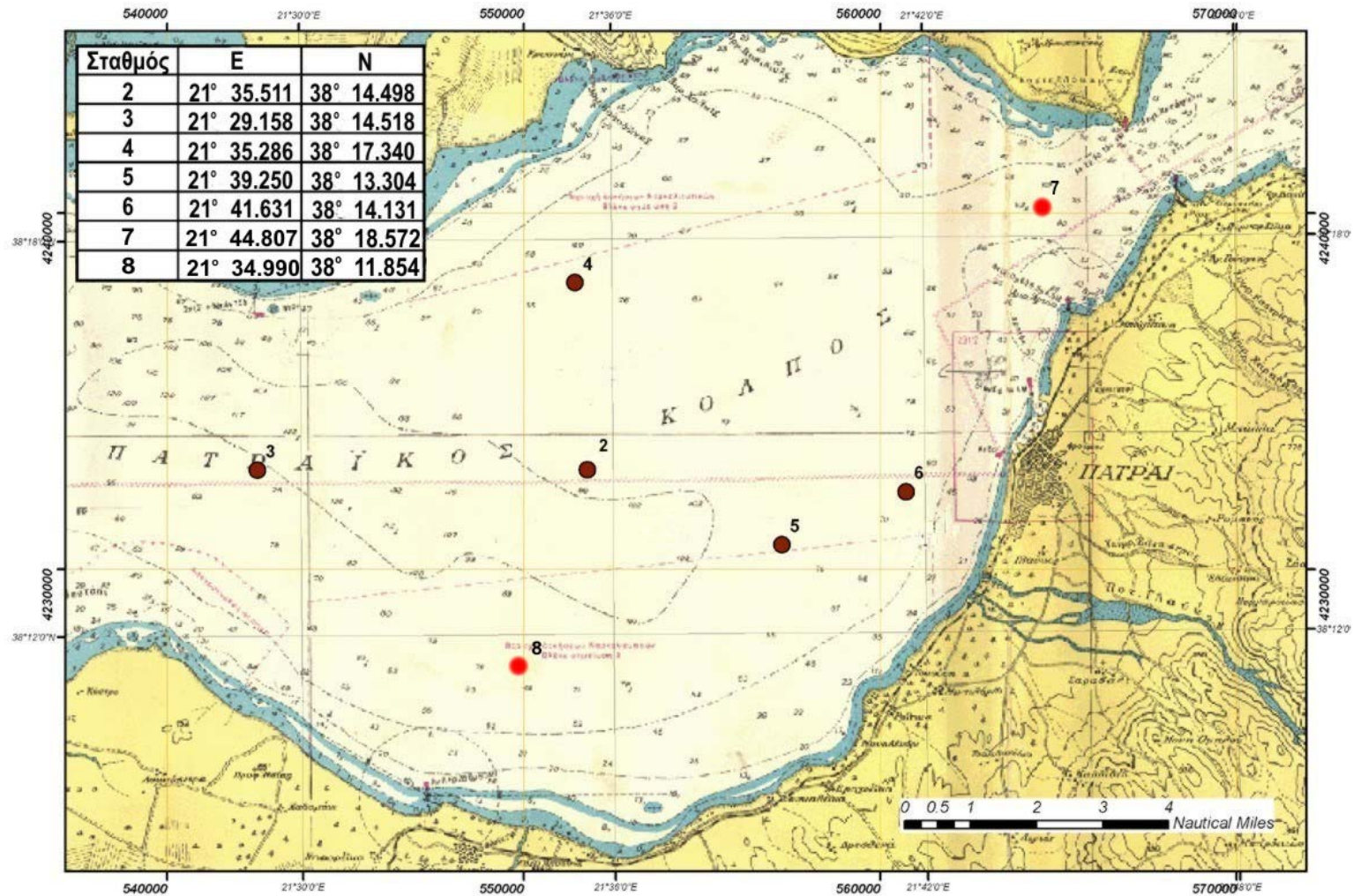
Συλλέχθηκαν 5 επιφανειακά δείγματα (4 περιφερειακά και ένα κεντρικό) (Εικόνα 4.9) για ανάλυση με τη μέθοδο συγκαταβύθισης στις 28 Σεπτεμβρίου 2004. Επίσης, στο κέντρο του Πατραϊκού κόλπου ελήφθησαν 3 δείγματα με τη μέθοδο *in situ* προσυγκέντρωσης για τον προσδιορισμό της κατακόρυφης κατανομής του  $^{137}\text{Cs}$  στην υδάτινη στήλη.

#### **4.6.3 Πατραϊκός κόλπος (Μάρτιος 2005)**

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε νέα δειγματοληψία στον Πατραϊκό κόλπο (30 και 31 Μαρτίου 2005), με σκοπό να εξεταστεί η εποχιακή διακύμανση του  $^{137}\text{Cs}$ . Εκτός των 5 προηγούμενων σημείων επιλέχθηκαν 2 νέα, ένα στο στενό Ρίου – Αντιρρίου κι ένα κοντά στην ξηρά, ανάμεσα στους σταθμούς 3 και 5 (Εικόνα 4.10). Ελήφθησαν από 2 δείγματα σε κάθε σταθμό (ένα στην επιφάνεια κι ένα κοντά στο τελικό βάθος), εκτός από το σταθμό 2 και 3, στους οποίους ελήφθησαν 4 και 3 δείγματα αντίστοιχα. Η διαφοροποίηση αυτή έγινε εξαιτίας του ότι στους σταθμούς αυτούς τα τελικά βάθη είναι μεγαλύτερα και άρα για να γίνει πληρέστερος ο προσδιορισμός της κατανομής του  $^{137}\text{Cs}$  έπρεπε να ληφθούν περισσότερα δείγματα.



Εικόνα 4.9: Οι σταθμοί δειγματοληψίας στον Πατραϊκό κόλπο τον Σεπτέμβριο του 2004



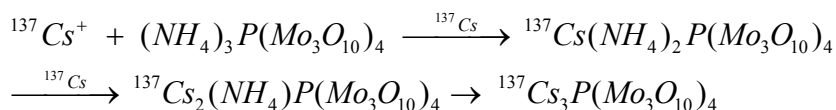
Εικόνα 4.10: Οι σταθμοί δειγματοληψίας στον Πατραϊκό κόλπο τον Μάρτιο του 2005

#### 4.7 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΡΑΔΙΟΧΗΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ $^{137}\text{Cs}$

Η ραδιοχημική ανάλυση περιλαμβάνει κάθε κατηγορία αναλυτικής διεργασίας, η οποία περιλαμβάνει χημική επεξεργασία. Η χημική επεξεργασία αποβλέπει στο διαχωρισμό μεμονωμένων στοιχείων ή ομάδων στοιχείων, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη εκλεκτικότητα και ευαισθησία για το στοιχείο που αναλύεται. Στη συνέχεια, η ενεργότητα του στοιχείου που προσδιορίζεται, μετρείται στα κλάσματα, τα οποία διαχωρίστηκαν<sup>88</sup>.

##### 4.7.1 AMP (ammonium molybdophosphate) μέθοδος συγκαταβύθισης

Η AMP μέθοδος βασίζεται στην ιοντοανταλλαγή του διαλυτού καισίου με το αμμώνιο του AMP  $[(\text{NH}_4)_3\text{P}(\text{Mo}_3\text{O}_{10})_4]$ , οπότε καταβυθίζεται χαρακτηριστικό κίτρινο ίζημα<sup>89 90 91</sup>. Ειδικότερα, δείγματα όγκου 60 – 100 l (ανάλογα με την ευαισθησία της γ-φασματοσκοπικής διάταξης) συγκεντρώνονται σε πλαστικά βαρέλια, αφού προηγουμένως έχουν εκπλυθεί με απεσταγμένο νερό και 10%  $\text{HNO}_3$ . Ακολουθεί οξίνιση με 65%  $\text{HNO}_3$  έως pH 2.0 – 2.5 επί τόπου για σταθεροποίηση και επίσης προστίθενται 0.2 Bq  $\text{l}^{-1}$   $^{134}\text{Cs}$  σαν ιχνηθέτης (ομόλογος ισοτοπικός φορέας). Ο ιχνηθέτης προστίθεται αφενός για τον υπολογισμό της απόδοσης της εν λόγω διαδικασίας και αφετέρου για την αύξηση της συγκέντρωσης του καισίου, γεγονός που βοηθά στην καταβύθιση. Ακολουθεί μεταφορά στο εργαστήριο, όπου λαμβάνει χώρα περαιτέρω οξίνιση με 65%  $\text{HNO}_3$  έως pH 1.5 και προσθήκη 400  $\text{mg l}^{-1}$  μικροκρυσταλλικού AMP και το διάλυμα αναδεύεται για 15 λεπτά. Το ίζημα αφήνεται να καταβυθιστεί για 48 ώρες και το υπερκείμενο υγρό απορρίπτεται (αφήνεται ελάχιστο υπερκείμενο υγρό, τόσο ώστε να διαβρέχεται το ίζημα). Το ίζημα μεταφέρεται σε ποτήρι ζέσης 2 l με έκπλυση με 0.05 N  $\text{HNO}_3$  και αφήνεται για περαιτέρω καταβύθιση. Το ίζημα διηθείται, μεταφέρεται σε κυάθιο μέτρησης (white cup) και ξηραίνεται στους 60 °C για 10 λεπτά. Τέλος, το κυάθιο μέτρησης καλύπτεται από ένα διαφανές πλέξιγκλας υλικό και αναλύεται με γ-φασματομετρία, λαμβάνοντας υπόψιν την ποσότητα του ιχνηθέτη, που προστέθηκε<sup>92 93</sup>. Η μέση χημική απόδοση της μεθόδου υπολογίζεται σε  $98 \pm 4 \%$ <sup>94 95</sup>. Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 4.11):



Εικόνα 4.11: Αντίδραση ιοντοανταλλαγής  $^{137}\text{Cs}$  με το AMP

#### **4.7.2 Μέθοδος in situ προσυγκέντρωσης (εμπλουτισμού) δείγματος με αντλία μεγάλου όγκου**

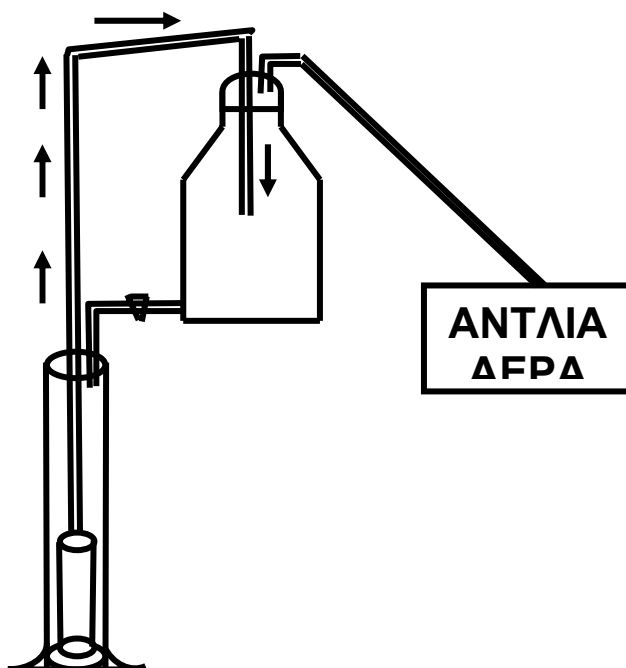
##### **1 Προετοιμασία των φίλτρων**

Πολλά σιδηροκυανιούχα μέταλλα μετάπτωσης έχουν χρησιμοποιηθεί για περίπου 30 χρόνια για να συλλέξουν καίσιο από το θαλασσινό νερό, μέσω καταβύθισης ή «επί τόπου» προσρόφησης<sup>96 97 98</sup>. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των σιδηροκυανιούχων μετάλλων μετάπτωσης είναι πολλά κι έχουν να κάνουν κυρίως με τη ζελατινώδη μορφή τους, δηλαδή μπορούν να προσκολλώνται πιο εύκολα ως υποστηρικτικά υλικά. Επίσης, η ιοντοανταλλακτική ικανότητα ορισμένων τέτοιων συμπλόκων είναι πάρα πολύ μεγάλη, μπορούν πολύ εύκολα να παρασκευαστούν στο εργαστήριο και τέλος το κόστος, που συνοδεύει τη χρήση τους, είναι πολύ χαμηλό<sup>99 100</sup>.

Οι τύποι των σιδηροκυανιούχων συμπλόκων, που χρησιμοποιούνται ως ανόργανοι ιοντοανταλλάκτες για το καίσιο (<sup>137</sup>Cs) περιλαμβάνουν τον σιδηροκυανιούχο χαλκό  $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ , τον σιδηροκυανιούχο ψευδάργυρο  $\text{Zn}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  και το κοβαλτιοκυανιούχο κάλιο  $\text{K}_4[\text{Co}(\text{CN})_6]$ <sup>101</sup>. Προτιμώνται συνήθως τα πρώτα δύο σύμπλοκα, εξαιτίας της υψηλής μηχανικής τους σταθερότητας και της πολύ μικρής περιεκτικότητας τους σε κάλιο. Η υψηλή μηχανική σταθερότητα είναι πολύ σημαντική για να μη μειωθεί καθόλου η προσρόφηση, όταν τα φίλτρα εκτεθούν στο θαλασσινό νερό. Πρακτικά, τα «επί τόπου» δειγματοληπτικά συστήματα για το καίσιο με χρήση σιδηροκυανιούχων συμπλόκων συνίστανται στην προσρόφηση του καϊσίου κατά τη διάρκεια κίνησης του πλοίου, με τη χρήση ειδικών φίλτρων για να συμβεί ιοντοανταλλαγή. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται ειδικά φίλτρα, που έχουν διαβραχεί με σιδηροκυανιούχο χαλκό  $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ <sup>102 103 104</sup>.

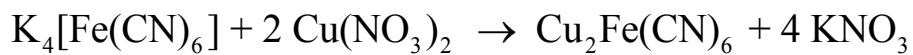
Χρησιμοποιούνται, αρχικά, έτοιμα φίλτρα πορώδους 1 μm διαβρεγμένα με  $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  διαφόρου συγκέντρωσης (2.5, 5.0, 7.5 mM) για να υπολογιστεί η βέλτιστη συγκέντρωση στην οποία αποτίθεται περισσότερο καίσιο στα φίλτρα, καθώς και το σφάλμα αυτών ως προς την πραγματική τιμή. Μετά τη δοκιμή των έτοιμων φίλτρων, επιχειρείται η διαβροχή (impregnation) κενών (blank) φίλτρων, ως εξής: 5 g  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  και 5 g  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  διαλύονται σε 5 l νερού και αφήνονται να αντιδράσουν έως σχηματισμού καφέ - κόκκινου ιζήματος. Το διάλυμα μεταφέρεται στη φιάλη Erlenmeyer. Γίνεται βύθιση του φίλτρου στον κύλινδρο των 2000 ml και το διάλυμα αφήνεται να υπερκαλύψει το φίλτρο (Εικόνα 4.12). Αμέσως μετά, με τη βοήθεια της αντλίας αέρα εφαρμόζεται κενό, ώστε το διάλυμα του ιοντοανταλλάκτη να αναγκαστεί να εισέλθει από το εξωτερικό προς το εσωτερικό μέρος του φίλτρου βίαια, καταλήγοντας πάλι στην φιάλη Erlenmeyer (Εικόνα 4.12). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τόσες φορές, ώστε να συμβεί όσο το δυνατό μεγαλύτερη εξασθένιση του καφέ-κόκκινου χρώματος. Τότε το  $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  έχει

αποτεθεί στο φίλτρο. Τέλος, το διαβρεγμένο φίλτρο ξηραίνεται σε φούρνο στους 60 - 80 °C, οπότε καθίσταται έτοιμο για χρήση .



Εικόνα 4.12: Διαβροχή φίλτρων

Παρακάτω φαίνεται η αντίδραση, που συμβαίνει για να παραχθεί ο επιθυμητός ιοντοανταλλάκτης, καθώς και η μέγιστη ποσότητα του οποίου μπορεί να αποτεθεί στο φίλτρο.



5.00 g	5.00 g		
13.58 mmol	26.66 mmol		
-26.66/2	-26.66/2	-26.66/2	
0.25 mmol	-	13.33 mmol (5 l)	
		4.52 g (5 l)	

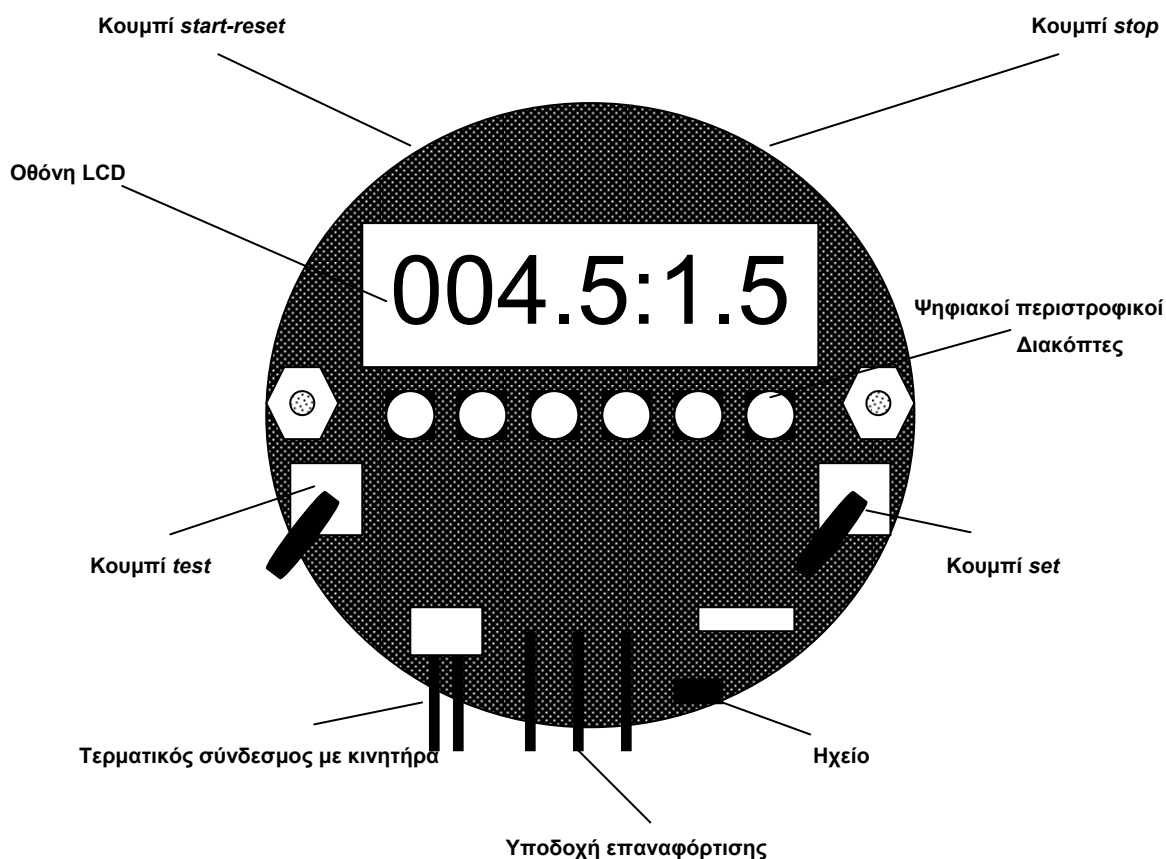
## 2 Προετοιμασία οργάνου

Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη και πρέπει να γίνεται δυο μήνες πριν την ημέρα της δειγματοληψίας. Γίνεται έλεγχος των κεφαλών της αντλίας για υπολείμματα άλατος κι άλλες συσσωρευμένες ακαθαρσίες καθώς και επάλειψη των θηκών των φίλτρων και του o-ring στο τελικό καπάκι με Vaseline στα σημεία που βιδώνουν. Εν συνεχεία γίνεται τσεκάρισμα της κατάστασης των μπαταριών και φόρτιση τους όταν είναι απαραίτητο. Επιπλέον, γίνεται έλεγχος των εργαλείων και των εφεδρικών που υπάρχουν. Τέλος, γίνεται το *test* για να επιβεβαιωθεί αν η αντλία δουλεύει ή όχι, λειτουργία που θα αναφερθεί παρακάτω<sup>81</sup>.

## 3 Επί τόπου (in situ) δειγματοληψία μεγάλου όγκου θαλασσινού νερού με προσυγκέντρωση <sup>137</sup>Cs

Στο εσωτερικό του σωλήνα πίεσης της αντλίας βρίσκεται ο πίνακας ελέγχου (Εικόνα 4.13). Αυτός αποτελείται από τα κουμπιά '*start*' για την έναρξη λειτουργίας της αντλίας, '*stop*' για τη διακοπή της, τα κουμπιά '*set*' και '*test*', που χρησιμεύουν για τη φόρτωση των χρόνων και την διαδικασία δοκιμής της αντλίας, την οθόνη LCD και τους περιστροφικούς διακόπτες ρύθμισης των χρόνων.

Πριν τη δειγματοληψία πραγματοποιείται πάντοτε ένα *test* για να πιστοποιηθεί η λειτουργία της αντλίας. Όταν διατηρείται πατημένο το κουμπί '*test*' κάθε δέκατο της μονάδας αντιστοιχεί σε δευτερόλεπτο και κάθε μονάδα σε 10 δευτερόλεπτα. Ρυθμίζεται με κατσαβίδι χρόνος αναμονής 1.5 (αριστερά) και 0.5 (δεξιά), δηλαδή 15 και 5 δευτερόλεπτα αντίστοιχα. Ακολουθεί σύνδεση της οθόνης LCD με τη μπαταρία, οπότε ανάβει. Γίνεται πέρασμα του μαγνήτη πάνω από το κουμπί '*stop*' για να ακυρωθεί η ασφάλιση της αντλίας (ακούγεται χαρακτηριστικός ήχος). Στη συνέχεια πιέζεται το κουμπί *set*, οπότε οι χρόνοι εμφανίζονται στην οθόνη. Γίνεται πέρασμα του μαγνήτη πάνω απ' το κουμπί '*start*', οπότε πάλι ακούγεται ο χαρακτηριστικός ήχος. Κρατείται πατημένο το κουμπί '*test*', οπότε αρχίζει η αντίστροφη μέτρηση για το χρόνο παραμονής, πριν ξεκινήσει η λειτουργία της αντλίας για 5 δευτερόλεπτα οπότε σταματά.



Εικόνα 4.13: Ο πίνακας ελέγχου του δειγματολήπτη

Πρέπει να έχει σημειωθεί η αρχική ένδειξη του ροομέτρου, για να υπολογιστεί στο τέλος ο όγκος του νερού που φιλτραρίστηκε. Για να τεθεί ο πραγματικός χρόνος απασφαλίζεται η αντλία, περνώντας τον μαγνήτη πάνω από το κουμπί 'stop' (ακούγεται ο χαρακτηριστικός ήχος). Ρυθμίζονται οι επιθυμητοί χρόνοι με ένα κατσαβίδι, μέσω των ψηφιακών διακοπών (κάθε δέκατο της μονάδας ισοδυναμεί με 6 λεπτά και κάθε μονάδα με ώρα). Πιέζεται το κουμπί 'set' και οι χρόνοι φορτώνονται στη ψηφιακή οθόνη. Η διαδικασία της χρονομέτρησης ξεκινά μόνο όταν ο μαγνήτης θα παραμείνει πάνω απ' το κουμπί 'start' για περισσότερο από 3 δευτερόλεπτα (ακούγεται ο χαρακτηριστικός ήχος).

#### 4 Ανάκτηση φίλτρων

Το όργανο στήνεται στο κατάστρωμα, ασφαρίζεται και σκουπίζεται το πλεονάζων νερό. Αμέσως μετά σημειώνεται η τελική ένδειξη του ροομέτρου και απομακρύνονται τα φίλτρα, τα οποία μεταφέρονται στο εργαστήριο για ραδιοχημική ανάλυση. Ανοίγεται το τελικό o-ring του οργάνου με το ειδικό εξάρτημα C-spanner και τσεκάρονται οι ενδείξεις του χρονομέτρου να είναι μηδέν (αν όχι, οι χρόνοι συγκρατούνται και υπολογίζεται ο

χρόνος άντλησης). Προσοχή! Μεταξύ διαδοχικών δειγματοληψιών πρέπει να ελέγχεται η τάση των μπαταριών.

#### 5 Συντήρηση – αποθήκευση

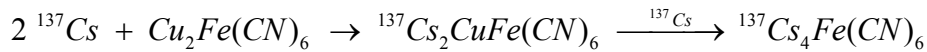
Ξεπλένονται καλά οι θήκες πολυαιθυλενίου με νερό για να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα άλατος κι άλλες συσσωρευμένες ακαθαρσίες. Γίνεται επάλειψη των o-rings των θηκών και του τελικού με Vaseline. Καθαρίζεται καλά η αντλία και το ροόμετρο με καθαρό νερό και αποφορτίζονται οι μπαταρίες για να αυξηθεί ο χρόνος ζωής τους (οι μπαταρίες πρέπει να αποθηκεύονται φορτισμένες). Εν συνεχεία γίνεται αποσύνδεση του πακέτου των μπαταριών, μέσω του ειδικού συνδέσμου. Τέλος, το όργανο πακετάρεται .

#### 6 Επεξεργασία στο εργαστήριο

Τα φίλτρα μεταφέρονται στο εργαστήριο για περαιτέρω επεξεργασία η οποία περιλαμβάνει, αρχικά, την ξήρανση τους. Αφήνονται για μια ημέρα στους 180 – 200 °C Αμέσως μετά, ανά 2 ώρες η θερμοκρασία αυξάνει κατά 40 °C μέχρι τελικής θερμοκρασίας 360 °C, οπότε και αφήνονται για άλλη μια ημέρα. Η στάχτη συλλέγεται προσεκτικά, μεταφέρεται σε ειδικά δοχεία (πλαστικά κυάθια μέτρησης) και αναλύεται με συμβατική γ - φασματομετρία. Υπό την προϋπόθεση ότι τα δυο διαβρεγμένα φίλτρα έχουν την ίδια ικανότητα συλλογής και άρα προσρόφησης (Εικόνα 4.14) του ίδιου κλάσματος καισίου, μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα του διαλυτού ραδιενεργού καισίου (που περνά από την αντλία). Αυτή η ποσότητα συμβολίζεται με  $A(^{137}\text{Cs})$  και εκφράζει τον όγκο του νερού, που φιλτράρεται, λαμβάνοντας υπόψη τα δυο φίλτρα, που χρησιμοποιούνται ως παγίδες (scavengers) και ισούται με:

$$A(^{137}\text{Cs}) = \frac{A_1}{E} = \frac{A_1}{1 - \frac{A_2}{A_1}}$$

όπου  $A_1$  και  $A_2$  είναι τα ποσά ραδιενέργειας σε Bq  $\text{m}^{-3}$  στο 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> φίλτρο αντίστοιχα. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι για βέλτιστα αποτελέσματα ο λόγος  $A_2/A_1$  πρέπει να είναι μεταξύ 0.2 και 0.3 για περίπου 1000 l όγκου. Μετά από μεγάλο όγκου φιλτράρισμα (πάνω από 2000 l) υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν υψηλές τιμές του λόγου  $A_2/A_1$ , περίπου 0.5 - 0.8. Αυτό πρέπει να είναι αποτέλεσμα της απώλειας του  $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  από το πρώτο φίλτρο και παγίδευσης του στο δεύτερο ή ενός κακώς κατασκευασμένου ή τοποθετημένου πρώτου φίλτρου, το οποίο επιτρέπει στο θαλασσινό νερό να ρέει κατά μήκος του φίλτρου χωρίς αποτελεσματική επαφή με τον προσροφητή.



Εικόνα 4.14: Αντίδραση ιοντοανταλλαγής  $^{137}\text{Cs}$  με το  $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$

## 4.8 ΓΑΜΜΑ – ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

### 4.8.1 Αρχή μεθόδου

Η μέθοδος δίνει πληροφορίες σχετικά με τη ραδιενέργεια συγκεκριμένων ραδιονουκλιδίων σε ένα δείγμα, που παράγονται κατά την αυθόρμητη διάσπαση των πυρήνων σε διεγερμένες καταστάσεις των θυγατρικών νουκλιδίων. Ο ανιχνευτής καθαρού Γερμανίου (Ge) βρίσκεται σε κατάσταση θωράκισης (λευκός κύλινδρος στα αριστερά, εικόνα 6.5), με σκοπό να μειώσει την ανίχνευση  $\gamma$  - κβάντων από το γύρω περιβάλλον. Ο πολυκαναλικός αναλυτής βασίζεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και τέλος, υπάρχει ένα καταγραφικό σύστημα.

Η αρχή λειτουργίας του οργάνου βασίζεται στα  $\gamma$  - κβάντα, που εκπέμπονται από το δείγμα αλληλεπιδρώντας με το υλικό του ανιχνευτή Γερμανίου (Ge), και τα οποία δημιουργούν ελεύθερα ηλεκτρικά φορτία. Τα φορτία αυτά μετακινούνται λόγω της υψηλής τάσης, που εφαρμόζεται στον ανιχνευτή, δημιουργώντας ασθενή παλμό ηλεκτρικού ρεύματος (ακριβέστερα ηλεκτρικού φορτίου). Ο παλμός αυτός διαφορίζεται και ενισχύεται αρχικά από τον προενισχυτή στο βαθμό που απαιτείται για την προσαρμογή του στην ευαισθησία του βασικού ενισχυτή. Ο τελευταίος ενισχύει γραμμικά περαιτέρω και διαμορφώνει τους παλμούς κατά τρόπο απαραίτητο για τη βέλτιστη λειτουργία του μετατροπέα πλάτους. Στη συνέχεια οι παλμοί μετατρέπονται από αναλογικοί σε ψηφιακοί. Ο έλεγχος του ύψους του παλμού (ψηφιακά) γίνεται από τον πολυκαναλικό αναλυτή (multichannel analyzer).

Τα περιεχόμενα της μνήμης μπορούν να απεικονίζονται γραφικά στην οθόνη του πολυκαναλικού ανιχνευτή, να μεταφέρονται για επεξεργασία στη μνήμη ηλεκτρονικού υπολογιστή PDP 11/23 ή IBM AT και να καταγράφονται σε εκτυπωτή. Η γραμμικότητα του συνόλου των μετατροπών εξασφαλίζει την αναλογική σχέση μεταξύ της ενέργειας, που χάνει το  $\gamma$  - κβάντο στον όγκο του ανιχνευτή, και του αριθμού του στοιχείου της μνήμης που αντιστοιχεί στο ύψος του παλμού, στην οποία καταγράφεται το συμβάν της ανίχνευσης. Ο αριθμός των καταγραφών σε κάθε κανάλι είναι ανάλογος του αριθμού των συμβάντων αυτών, της συγκεκριμένης περιοχής ενέργειας.

Ένα μέρος των  $\gamma$  - κβάντων χάνουν το σύνολο της ενέργειας (απορροφώνται) στον ανιχνευτή και το μέρος αυτό δημιουργεί τις λεγόμενες φωτοκορυφές του φάσματος. Η

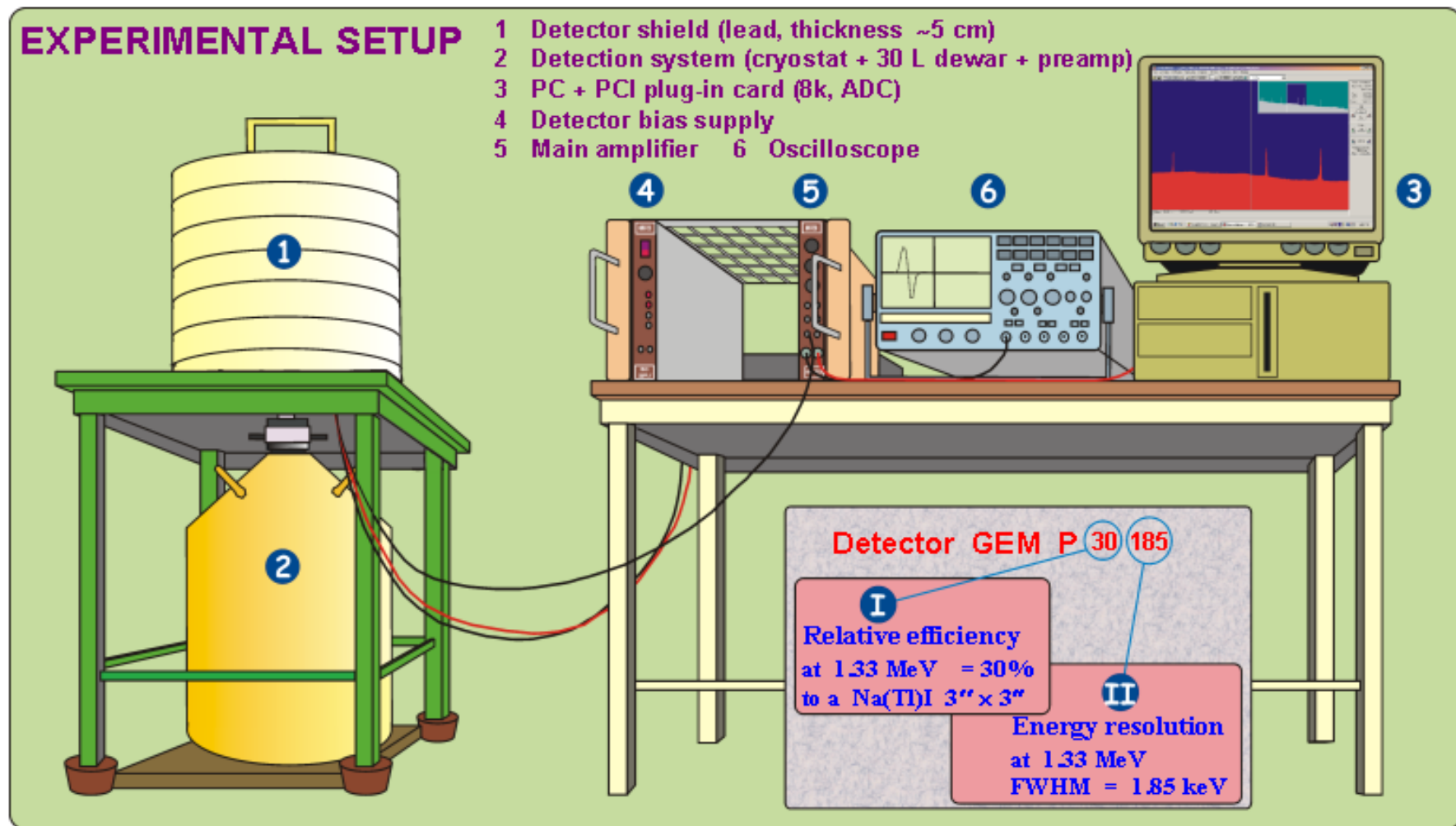
πλήρης απορρόφηση της ενέργειας γίνεται στην περίπτωση αλληλεπίδρασης του  $\gamma$  - κβάντου με το υλικό του ανιχνευτή, μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου ή σειράς αλληλεπιδράσεων που καταλήγουν στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα πλήρους απορρόφησης της ενέργειας του  $\gamma$  κβάντου μέσω γένεσης ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου (δίδυμη γένεση), υπό την προϋπόθεση ότι τα δύο αυτά σωματίδια θα απορροφηθούν στον όγκο του ανιχνευτή. Η δίδυμη γένεση προϋποθέτει ενέργεια  $\gamma \geq (m_e^+ + m_e^-) = 1.022 \text{ MeV}$  και την παρουσία δυναμικού.

Ένα άλλο μέρος των κβάντων υφίστανται απώλεια μέρους της ενέργειας τους και απαρτίζουν τα συνεχή τμήματα 'Compton' και οπισθοσκέδασης του φάσματος, ενώ ένα άλλο μέρος των κβάντων δεν ανιχνεύεται καθόλου, γιατί δεν αλληλεπιδρά με το υλικό του ανιχνευτή .

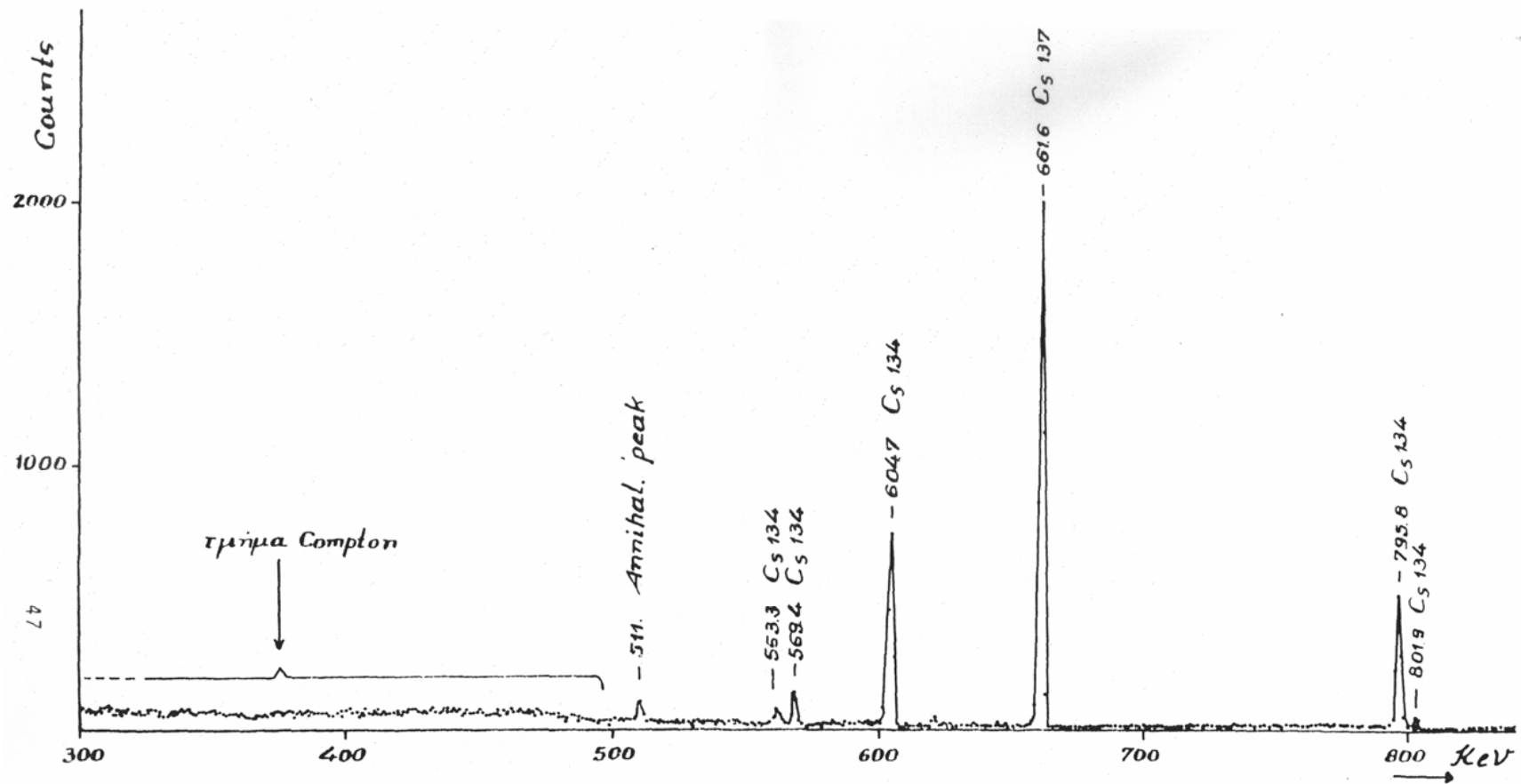
Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 4.15) φαίνονται αναλυτικά τα μέρη ενός συστήματος  $\gamma$  - φασματομετρίας και αμέσως μετά ένα παράδειγμα τυπικού φάσματος  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$  (Εικόνα 4.16). Η περιοχή ενεργειών περικλείεται μεταξύ 300 – 850 keV, ενώ η βαθμονόμηση είναι 1 κανάλι ανά keV (ch / keV).

Η κορυφή εξαϋλωσης (annihilation peak), που φαίνεται στην εικόνα 6.13, οφείλεται στα συμβάντα εξαϋλωσης ηλεκτρονίου και ποζιτρονίου, τα οποία προκαλούνται στο υλικό που περιβάλλει τον ανιχνευτή (π.χ. υλικό θωράκισης, το δείγμα κ.λ.π.). Κατά την εξαϋλωση δημιουργούνται 2  $\gamma$  - κβάντα ενέργειας 511 keV .

Το εμβαδόν της φωτοκορυφής ισούται με το άθροισμα των περιεχομένων, που την απαρτίζουν, αφού αφαιρεθεί το τμήμα του υποβάθρου.



Εικόνα 4.15: Σχεδιάγραμμα συστήματος γάμμα – φασματομετρίας με ομοαξονικό ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου απόδοσης 90% σε σχέση με ανιχνευτή NaI 3x3 (inch)



Εικόνα 4.16: Φάσμα  $^{137}\text{Cs}$  +  $^{134}\text{Cs}$ . Περιοχή ενεργειών 300 – 850 KeV. Βαθμονόμηση ενέργειας 1 KeV/ch

#### 4.8.2 Βαθμονόμηση της ενέργειας του συστήματος γ - φασματομετρίας

Για τη βαθμονόμηση της ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλοι οι τύποι γ-ραδιενεργών πηγών με πολύ καλά γνωστές ενέργειες. Κανονικά, δεν απαιτείται ανάλογο σχήμα, τύπος, δοχείο ή ενεργότητα της πηγής με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του δείγματος, εφόσον οι ενέργειες των μη σκεδαζόμενων γ- ακτίνων είναι χαρακτηριστικές του ραδιονουκλιδίου κι όχι της πηγής. Όμως, για πολύ ακριβείς μετρήσεις πρόσθετα κριτήρια, όμως μέγεθος, τοποθέτηση ως προς τον ανιχνευτή, υλικό - φορέας της πηγής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Η βαθμονόμηση της ενέργειας γίνεται περιοδικά με τη χρήση προτύπων ραδιενεργών πηγών ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) και κυρίως  $^{226}\text{Ra}$ , εξαιτίας της πληθώρας των φωτοκορυφών των θυγατρικών του παραγώγων  $^{214}\text{Pb}$  και  $^{214}\text{Bi}$ , που καλύπτουν την περιοχή ενεργειών 185 – 2000 KeV, συμπεριλαμβανομένου και του  $^{226}\text{Ra}$ . Στην περιοχή χαμηλών ενεργειών (< 200 KeV) η βαθμονόμηση γίνεται με τη χρήση ραδιενεργού πηγής από μετάλλευμα ουρανίου. Χρησιμοποιούνται οι φωτοκορυφές  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  και  $^{210}\text{Pb}$ . Οι ενέργειες των χρησιμοποιούμενων φωτοκορυφών στο σύνολο του ενεργειακού φάσματος φαίνονται στον Πίνακας 4.2<sup>105</sup>. Η βαθμονόμηση της ενέργειας χρησιμοποιείται έως ότου αλλάξει κάποια από τις συνθήκες της μέτρησης (πχ. πτώση τάσης), οπότε και πραγματοποιείται νέα βαθμονόμηση.

Πίνακας 4.2: Πίνακας ενεργειών γ - κβάντων των ραδιονουκλιδίων της οικογένειας του  $^{238}\text{U}$  που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση της ενέργειας στις μετρήσεις γ - φασματομετρίας

Νουκλίδιο	$E_\gamma$ , keV	Νουκλίδιο	$E_\gamma$ , keV
$^{210}\text{Pb}$	46.52	$^{214}\text{Pb}$	351.99
$^{234}\text{Th}$	63.30	$^{214}\text{Bi}$	609.37
$^{234}\text{Th}$	92.80	$^{214}\text{Bi}$	768.40
$^{235}\text{U}$	185.72	$^{214}\text{Bi}$	1120.40
$^{226}\text{Ra}$	186.00	$^{214}\text{Bi}$	1238.20
$^{214}\text{Pb}$	241.92	$^{214}\text{Bi}$	1764.60
$^{214}\text{Pb}$	295.22		

#### **4.8.3 Βαθμονόμηση της απόδοσης του συστήματος γ - φασματομετρίας**

Για τη βαθμονόμηση της απόδοσης του συγκεκριμένου συστήματος επιδιώκεται, σε κάθε περίπτωση μέτρησης, το ύψος του δείγματος να διατηρείται σταθερό. Επειδή αυτό δεν είναι πάντοτε δυνατό έχουν γίνει βαθμονομήσεις για τρεις διαφορετικές τιμές ύψους δείγματος για τη συγκεκριμένη γεωμετρία δείγματος. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης της απόδοσης για συγκεκριμένη γεωμετρία προσδιορίζεται ο συντελεστής απόδοσης για διάφορες ενέργειες στην περιοχή 50 - 200 keV. Η απόδοση του συστήματος μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας των γ - κβάντων στην περιοχή από 150 keV ( $E > 150$  keV), λόγω της μείωσης της πιθανότητας αλληλεπίδρασης με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Η απόδοση μειώνεται, επίσης, με τη μείωση της ενέργειας στην περιοχή  $E < 150$  keV, λόγω της αύξησης της αυτοαπορρόφησης στο δείγμα, καθώς και της απορρόφησης στα υλικά, που περιβάλλουν τον ανιχνευτή.

Βαθμονόμηση απόδοσης ενός συστήματος γ - φασματομετρίας ονομάζεται ο προσδιορισμός του συντελεστή  $\epsilon$  στη σχέση  $\sigma = \epsilon \times I$ , όπου:

$I$  = ο ρυθμός εκπομπής γ - κβάντων δεδομένης ενέργειας από το μετρούμενο δείγμα.

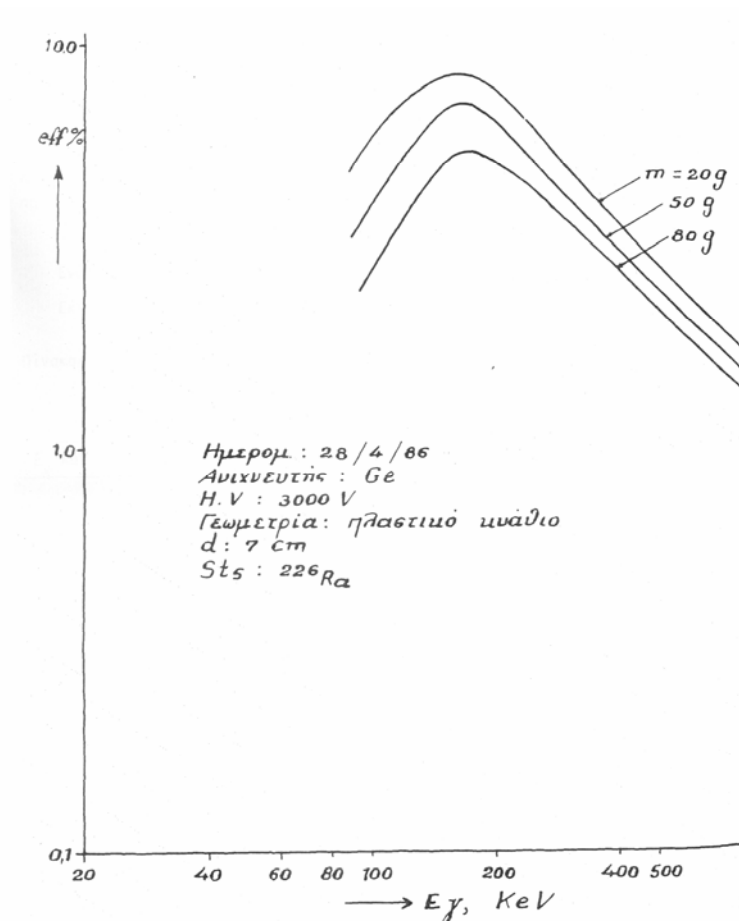
$\sigma$  = ο ρυθμός ανίχνευσης γ - κβάντων στην αντίστοιχη φωτοκορυφή.

$\epsilon$  = συντελεστής που είναι συνάρτηση της ενέργειας (δεδομένη για κάθε συγκεκριμένο ανιχνευτή) και της γεωμετρίας μέτρησης (γεωμετρία δείγματος και ανιχνευτή και σχετική τοποθέτηση τους στο χώρο). Η βαθμονόμηση της απόδοσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία συνίσταται στον προσδιορισμό της συνάρτησης  $\epsilon$  σε κάθε περιοχή ενεργειών γ - κβάντων.

Η ανάλυση του ανιχνευτή (Full Width at Half Maximum, FWHM) ελέγχεται περιοδικά στα 1.33 MeV, ενέργεια που αντιστοιχεί στη φωτοκορυφή του  $^{60}\text{Co}$ .

Η απόδοση του ανιχνευτή υπολογίζεται σε κάθε ενέργεια με τη χρήση πρότυπης ραδιενεργού πηγής  $^{226}\text{Ra}$ , σε ισορροπία με πηγή  $^{222}\text{Rn}$  και των προϊόντων διάσπασής του, στην ίδια γεωμετρία με το κύριο μέτρησης. Στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών 40 – 150 keV εφαρμόστηκε ανάλογη μέθοδος με πρότυπη πηγή  $^{238}\text{U}$ .

Τέλος, υπολογίζεται η καμπύλη της απόδοσης, η οποία είναι πειραματική (Εικόνα 4.17) κι έτσι συμπεριλαμβάνει και το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης, που υπάρχει κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στις χαμηλές ενέργειες.



Εικόνα 4.17: Η απόδοση του ανιχνευτή ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων

#### 4.8.4 Ποιοτική ανάλυση ραδιενέργειας δείγματος

Η ποιοτική ανάλυση, δηλαδή η εξακρίβωση της ταυτότητας των ραδιονουκλιδίων στα οποία οφείλεται το δεδομένο φάσμα γίνεται μέσω της ανάλυσης των ενεργειών των φωτοκορυφών του φάσματος, υπό την προϋπόθεση μιας επαρκώς ακριβούς βαθμονόμησης ενέργειας, που επιπλέον παραμένει σταθερή σε συνάρτηση με το χρόνο. Στην πράξη, η σταθερότητα αυτή δεν είναι πάντοτε ικανοποιητική και για το λόγο αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις αυξημένων απαιτήσεων εφαρμόζεται η μέθοδος της αυτοβαθμονόμησης, σε περιπτώσεις δειγμάτων, που το μέρος των φωτοκορυφών και των ενεργειών τους στο φάσμα του δείγματος είναι γνωστό με επαρκώς καλή στατιστική. Στην περίπτωση αυτή οι φωτοκορυφές χρησιμοποιούνται για την «αυτοβαθμονόμηση» ενέργειας, ενώ οι ενέργειες των υπολοίπων υπολογίζονται βάσει της βαθμονόμησης. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η παράκαμψη της ενδεχόμενης διολίσθησης της βαθμονόμησης της ενέργειας με το χρόνο.

Για την ποιοτική ανάλυση του φάσματος χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι πίνακες ενεργειών  $\gamma$  - ακτινοβολίας των διαφόρων ραδιονουκλιδίων<sup>106</sup>. Στις περιπτώσεις, που

περισσότερα από ένα ραδιονουκλίδια παρουσιάζουν παρεμφερείς ενέργειες, η εξακρίβωση γίνεται βάσει συμπληρωματικών στοιχείων όπως:

- 1 Η παρουσία ή όχι άλλων φωτοκορυφών, που εκπέμπει το υπό εξέταση ραδιονουκλίδιο.
- 2 Ο χρόνος υποδιπλασιασμού του υπό εξέταση ραδιονουκλιδίου σε συνάρτηση με το χρόνο μεταξύ δειγματοληψίας και μέτρησης.
- 3 Ο χρόνος δημιουργίας του ραδιονουκλιδίου σε συνάρτηση με τα δεδομένα που γνωρίζουμε για το δείγμα, π.χ. στις περιπτώσεις δειγμάτων ιζημάτων από μεγάλα βάθη της θάλασσας, πρακτικά αποκλείουμε την παρουσία τεχνητής προέλευσης ραδιοισοτόπων, δεδομένου του αργού ρυθμού ιζηματογένεσης και της σχετικά προσφατης εμφάνισης των ραδιονουκλιδίων τεχνητής προέλευσης στο περιβάλλον.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, που δύο ή περισσότερες φωτοκορυφές βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από τη διακριτική ικανότητα του συστήματος και δεν υπάρχουν άλλες φωτοκορυφές, για επιβεβαίωση χρησιμοποιούνται ειδικά προγράμματα ανάλυσης της σύνθετης φωτοκορυφής, τα οποία με μεγαλύτερη ή μικρότερη επιτυχία προσδιορίζουν τις συντεταγμένες της, δηλαδή από ποιές φωτοκορυφές αποτελείται. Στις περιπτώσεις αυτές η πιθανότητα σφάλματος είναι οπωσδήποτε αυξημένη<sup>98 105</sup>.

#### **4.8.5 Ποσοτική ανάλυση ραδιενέργειας δείγματος**

Η ποσοτική ανάλυση συνίσταται στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιενέργειας (ενεργότητας) καθε συγκεκριμένου νουκλιδίου στο δείγμα. Η ανάλυση αυτή γίνεται σχεδόν πάντα βάσει της βαθμονόμηση της απόδοσης για τη δεδομένη γεωμετρία του δείγματος και την εφαρμογή διορθώσεων αυτοαπορρόφησης σε σχέση με την πυκνότητα του δείγματος. Για κάθε συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο υπάρχουν ορισμένες (και πιθανόν μια) φωτοκορυφές κατάλληλες για την ποσοτική ανάλυση του ραδιονουκλιδίου ανάλογα με τη σχετική τους ένταση (ποσοστό εκπομπής  $\gamma$  - κβάντων ανά διάσπαση) και τη θέση ως προς τις άλλες φωτοκορυφές και το τμήμα 'Compton' του φάσματος, που προκαλείται από φωτοκορυφές μεγαλύτερης ενέργειας, που βρίσκονται στην περιοχή της φωτοκορυφής.

Στις μετρήσεις χαμηλού επιπέδου ραδιενέργειας περιβάλλοντος το μέγιστο ανεκτό σχετικό σφάλμα μέτρησης θεωρείται το 30%<sup>99 106</sup>.

#### **4.8.6 Υπολογισμός της ενεργότητας**

Η ενεργότητα  $A_i$  (activity) του δεδομένου ραδιονουκλιδίου  $i$  ενέργειας φωτοκορυφής  $E_i$  στο μετρούμενο δείγμα προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$A_i = \frac{cps}{\varepsilon \times I} A_i$$

όπου: cps = ο ρυθμός κρούσεων φωτοκορυφής ανά δευτερόλεπτο,

$\varepsilon$  = η απόδοση του συστήματος για τη συγκεκριμένη ενέργεια  $\gamma$  - κβάντου (efficiency),

$I$  = ο αριθμός των παραγόμενων φωτονίων ανά διάσπαση του συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου  $i$ .

Ο ρυθμός κρούσεων (cps) στην φωτοκορυφή ενέργειας  $E_i$  δίνεται από τη σχέση:

$$n = n_0 - n_b$$

όπου:  $n_0 = C_0 / T_0$ : ρυθμός κρούσεων φωτοκορυφής δείγματος cps,

$n_b = C_b / T_b$ : ρυθμός κρούσεων φωτοκορυφής υποβάθρου (background) cps, και  $C_0$ ,  $C_b$ : αριθμός κρούσεων φωτοκορυφής δείγματος και υποβάθρου αντίστοιχα,

$T_0$ ,  $T_b$ : χρόνος μέτρησης δείγματος και υποβάθρου αντίστοιχα.

Ο αριθμός κρούσεων  $C_0$  φωτοκορυφής προσδιορίζεται ως «εμβαδόν» φωτοκορυφής με τη βοήθεια του χρησιμοποιούμενου προγράμματος CANBERRA Genie 2000. Το ποσοστό εκπομπής  $I$  είναι γνωστό από ειδικούς πίνακες  $\gamma$  - φασματομετρίας με δεδομένο (σχετικά μικρό) σφάλμα. Τέλος, φάσμα υποβάθρου (background) είναι το φάσμα που θα προκύψει από τη μέτρηση δείγματος, πανομοιότυπου με το μετρούμενο, στο οποίο όμως απουσιάζει το νουκλίδιο, που προκαλεί τη δεδομένη φωτοκορυφή .

#### **4.8.7 Προσδιορισμός ορίου ανίχνευσης και σφαλμάτων μέτρησης και συγκέντρωσης**

Ο προσδιορισμός του ορίου ανίχνευσης για συγκεκριμένο χρόνο μέτρησης (70000 sec) και σε συγκεκριμένη γεωμετρία κυαθίου μέτρησης (white cup) γίνεται ως εξής:

$$\frac{2 \times \sqrt{(\text{κρούσεις background})}}{\text{χρόνος μέτρησης}} = cps$$

Έπειτα, προσδιορίζουμε το όριο ανίχνευσης σε Bq από τον τύπο cps / ( $I \times \varepsilon$ ) και τέλος εκφράζουμε το όριο ανίχνευσης σε Bq / Kg ή Bq / l διαιρώντας με τη δεδομένη μάζα ή τον όγκο του δείγματος <sup>107 108</sup>.

Το σφάλμα μέτρησης δίνεται από τον τύπο:

$$\delta n_{net} = \frac{\sqrt{\ln t + \frac{k^2}{4} \times (C_L + C_R)}}{T}$$

όπου:  $\ln t$  = σύνολο κρούσεων της φωτοκορυφής,

$k$  = αριθμός καναλιών,

$C_L$  = κανάλι αριστερά από την φωτοκορυφή,

$C_R$  = κανάλι δεξιά από την φωτοκορυφή,

T = χρόνος.

Το σφάλμα της συγκέντρωσης (ενεργότητας) δίνεται από τον τύπο:

$$\delta A_i = \frac{\sqrt{\delta n_{net}^2 + \frac{n_{net}^2 \times \delta \varepsilon^2}{\varepsilon^2}}}{I \times \varepsilon}$$

όπου  $\delta \varepsilon$  = σφάλμα της απόδοσης στη συγκεκριμένη ενέργεια  $E_i$  της φωτοκορυφής και  
 $n_{net}$  = αριθμός καθαρών κρούσεων σε συγκεκριμένη φωτοκορυφή<sup>79</sup>.

Για το  $^{137}\text{Cs}$   $I = 0.851$  και  $\varepsilon = 0.0535$ , ενώ το όριο ανίχνευσης (LLD) της μετρητικής διάταξης για το  $^{137}\text{Cs}$ , με την υπόθεση ότι το κάθε δείγμα έχει σταθερό όγκο 100 l είναι  $0.05 \text{ Bq m}^{-3}$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ**

### **ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**



## 5 ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 5.1 ΑΝΑΚΤΗΣΗ

Από το πρότυπο διάλυμα  $^{134}\text{Cs}$  ενεργότητας 5 Bq/ml (Isotope Products Europe Blaseg GMBH) (μετρήθηκε στις 11/01/2005) λαμβάνονται 0.8, 1.2 και 1.6 μl, τα οποία αραιώνονται με απεσταγμένο ύδωρ σε ογκομετρική φιάλη 1 l. Τα παραχθέντα διαλύματα ενεργότητας 4, 6 και 8 Bq m<sup>-3</sup> χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ανάκτησης των φίλτρων με την ίδια διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη διαβροχή των φίλτρων με τον ιοντοανταλλάκτη (Εικόνα 4.9). Χρησιμοποιήθηκαν 6 φίλτρα για τον προσδιορισμό της ανάκτησης της μεθόδου προσυγκέντρωσης (2 για κάθε πρότυπο), τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Πριν τον έλεγχο της ανάκτησης πραγματοποιήθηκε τυφλό πείραμα ως εξής: κατασκευάστηκαν 2 φίλτρα (Blank), όπως ακριβώς περιγράφεται στην παράγραφο 4.6.2. Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας την ίδια διάταξη (Εικόνα 4.12) πέρασαν από τα φίλτρα 200 l απεσταγμένου ύδατος, τα φίλτρα αποτεφρώθηκαν, μεταφέρθηκαν σε πλαστικά κυάθια μέτρησης και μετρήθηκαν με γ-φασματομετρία.

Εικόνα 5.1: Αναλυτικά χαρακτηριστικά φίλτρων

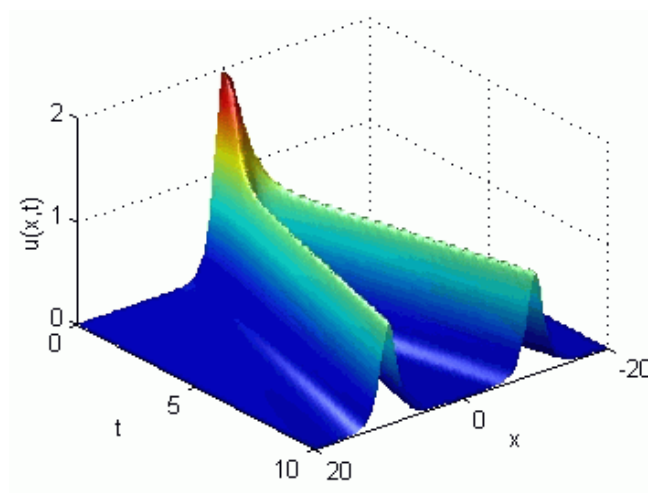
<b>Ημερομηνία</b>	13/05/2004			
<b>Πορώδες (μm)</b>	1	1		
	Τυφλό	Πρότυπο 1	Πρότυπο 2	Πρότυπο 3
<b>Συγκέντρωση ενεργότητας (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	0.2 ± 0.1 (n = 2)	3.5 ± 0.4 (n = 2)	5.2 ± 0.9 (n = 2)	7.6 ± 1.0 (n = 2)
<b>Ανάκτηση %</b>		88	87	95
<b>Mean ± SD</b>		90 ± 6		

$$LOD = 3 \times SD_{Blank} = 0.3 \text{ Bq m}^{-3}$$

$$LOQ = 10 \times SD_{Blank} = 1.0 \text{ Bq m}^{-3}$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

### ΚΑΤΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΒΑΘΟΥΣ ΑΠΟ ΤΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΤΟΥ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΠΑΤΡΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ

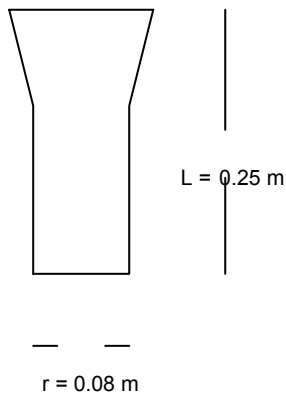


## 6 ΚΑΤΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΒΑΘΟΥΣ ΑΠΟ ΤΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΤΟΥ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΠΑΤΡΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Από την Υδρολογική Υπηρεσία του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας βρέθηκε ότι η μέση ταχύτητα των ρευμάτων στην περιοχή είναι της τάξεως των 0.4 m/sec.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι η αντλία είναι τέλειος κύλινδρος.



$$\text{Άρα } V_k = \pi r^2 L = 0.017 \text{ m}^3$$

Αν ήταν σφαίρα θα καταλάμβανε όγκο:

$$V_s = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = \frac{1}{6} \pi d^3 \Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{6V_s}{\pi}}$$

όπου d η διάμετρος της σφαίρας.

Υποθέτουμε ότι ο κύλινδρος καταλαμβάνει τον ίδιο όγκο με μια σφαίρα, άρα  $V_k = V_s \Rightarrow d \approx 0.40 \text{ m}$ .

Υπολογισμός της δύναμης του ρεύματος: Η δύναμη δίνεται από τον τύπο:

$$F_D = C_D \frac{\pi}{8} \rho_i d^2 V^2$$

όπου  $\rho_i$  η πυκνότητα του νερού,

$C_D$  σταθερά που εξαρτάται από το κριτήριο Reynolds ως εξής:

Στην περιοχή Stokes ( $Re \ll 1000$ ) έχουμε  $C_D = 24/Re$ , ενώ στην περιοχή Newton ( $Re > 100000$ ) το  $C_D \approx 0.44$ .

Κριτήριο Reynolds:  $Re = \frac{\rho U d}{n} = \frac{1000 \text{ kg m}^{-3} \cdot 0.4 \text{ m sec}^{-1} \cdot 0.4 \text{ m}}{0.001 \text{ Pa sec}}$

$$Re = 160000$$

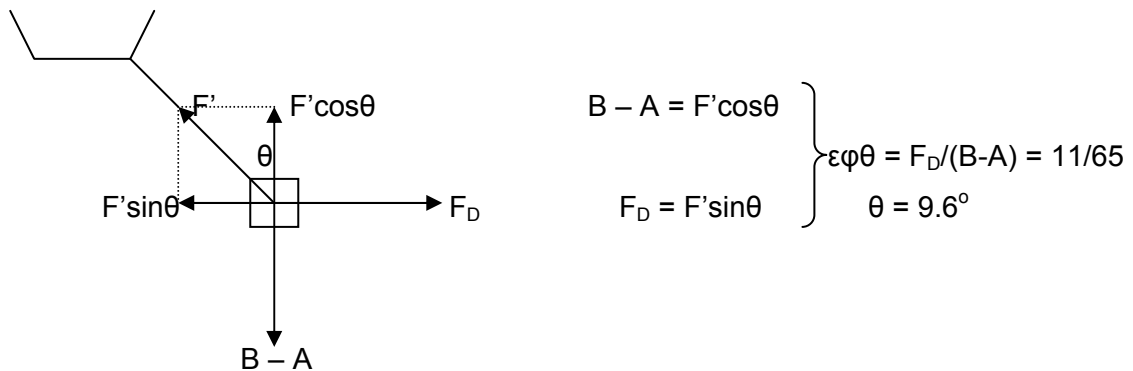
U ταχύτητα ρευμάτων, n ιξώδες νερού

Μονάδες:  $\text{Pa sec} = \text{N sec/m}^2 = \text{kg (m/sec}^2) (\text{sec/m}^2) = \text{kg/(m sec)}$

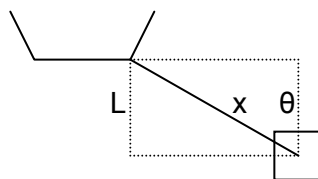
Άρα έχουμε την ακραία περίπτωση της περιοχής Newton, οπότε  $C_D \approx 0.44$

Συνεπώς  $F_D = C_D \pi/8 \rho d^2 V^2 = 11.05 \text{ N}$

Επίσης ισχύει:  $B - A = 1/6 (\rho_s - \rho_l) \pi d^3 g = (\rho_s - \rho_l) Vg = 65 \text{ N}$  (Εικόνα 6.1)



Εικόνα 6.1: Ισορροπία δυνάμεων στο σύστημα πλοίο – αντλία



Εικόνα 6.2: Υπολογισμός απόκλισης βάθους

$$\text{Άρα } \cos \theta = L/x$$

$$L = x \cos \theta$$

$$L = 0.986 x$$

## 6.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΣΤΑ ΒΑΘΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Αμέσως μετά τον τελικό υπολογισμό της εξίσωσης, η οποία δίνει το πραγματικό βάθος στο οποίο γίνεται η δειγματοληψία, πραγματοποιούνται δοκιμές των

χρησιμοποιούμενων βαθών, για να δειχθεί αν και κατά πόσο η απόκλιση αυτή πράγματι επηρεάζει τα αποτελέσματα (Πίνακας 6.1).

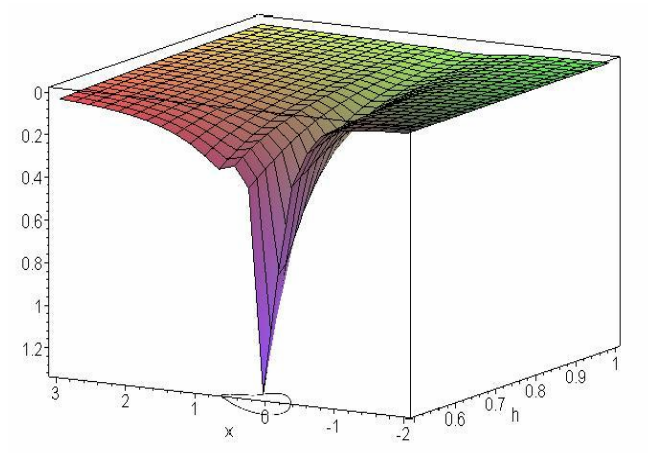
Πίνακας 6.1: Δοκιμές απόκλισης βάθους

Βάθη δειγματοληψιών (m)	Διορθωμένα βάθη (m)	% Σφάλμα
-5.0	-4.9	2.0
-46.8	-46.1	1.5
-54.0	-53.2	1.5
-68.4	-67.4	1.5
-80.0	78.9	1.4
-100.0	98.6	1.4

Παρατηρείται ότι το επί % σφάλμα είναι πολύ μικρό, γεγονός που σημαίνει ότι δεν δημιουργείται κανένα πρόβλημα στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων του εκάστοτε βάθους δειγματοληψίας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ



## 7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 7.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 7.1.1 Κρισσαίος κόλπος

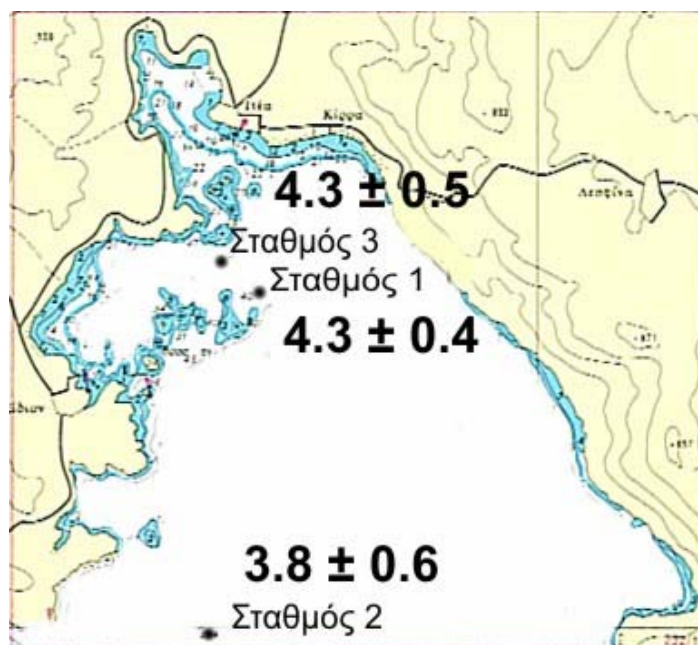
Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων της περιοχής του Κρισσαίου κόλπου απεικονίζονται στον Πίνακα 7.1. Στον Πίνακα 7.2 παρατίθεται η οριζόντια διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  και οι αποδόσεις, καθώς επίσης κι ο αντίστοιχος χάρτης (Εικόνα 7.1). Τέλος, στον Πίνακα 7.3 παρατίθενται ορισμένα στοιχεία και δοκιμές για τη μέθοδο της προσυγκέντρωσης με αντλία μεγάλου όγκου. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς η απόδοση προσρόφησης του φίλτρου αυξάνεται, αυξανόμενης της συγκέντρωσης του ιοντοανταλλάκτη. Τελικό συμπέρασμα είναι πως τα προκατασκευασμένα από την εταιρία Challenger Oceanic φίλτρα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο θαλάσσιο περιβάλλον της Ελλάδας, εξαιτίας του μεγάλου σφάλματος που παρουσιάζουν στην κατακράτηση του  $^{137}\text{Cs}$ . Συνεπώς, είναι επιτακτική η ανάγκη για προετοιμασία φίλτρων στο εργαστήριο.

Πίνακας 7.1: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων των τριών σταθμών του Κρισσαίου κόλπου

Ημερομηνία		Περιοχή	Συντεταγμένες	Βάθος Δειγματοληψίας (m)	Μέγιστο Βάθος (m)	Αγωγιμότητα (mS cm <sup>-1</sup> )	Αλατότητα (‰)	Θερμοκρασία (°C)	pH
10 07 2004	<b>Σταθμός 1</b>	Κορινθιακός Κόλπος	26° 0.0 N	-2.00	-50	56.7	37.7	25.9	8.14
		(Άγιος Δημήτριος)	23° 8.4 E						
10 07 2004	<b>Σταθμός 2</b>	Κορινθιακός Κόλπος	25° 0.5 N	-2.00	-220	57.8	38.6	26.3	8.15
		(Τράχηλα)	19° 9.5 E						
14 07 2004	<b>Σταθμός 3</b>	Κορινθιακός Κόλπος	25° 1.5 N	-2.00	-40	55.2	38.1	23.2	8.19
		(Μολημένο)	24° 3.8 E						

Πίνακας 7.2: Οριζόντια διασπορά  $^{137}\text{Cs}$  στον Κρισαϊό κόλπο

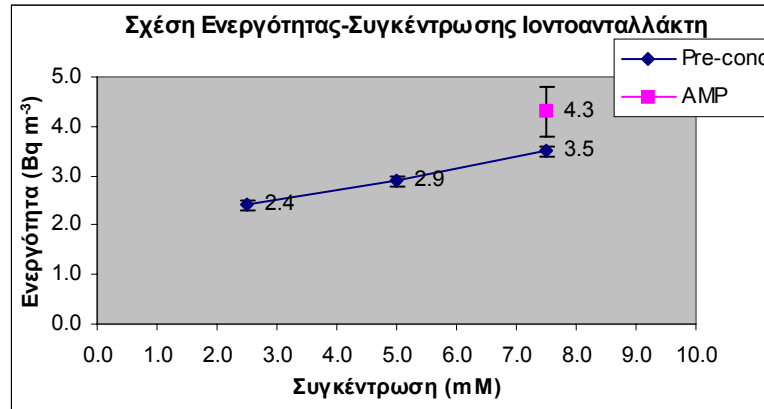
	Ημερομηνία	Συγκέντρωση Ενεργότητας (Bq m <sup>-3</sup> )	Απόδοση %
Σταθμός 1	10/07/2004	4.3 ± 0.4	74
Σταθμός 2	10/07/2004	3.8 ± 0.6	85
Σταθμός 3	14/07/2004	4.3 ± 0.5	77



Εικόνα 7.1: Οριζόντια διασπορά  $^{137}\text{Cs}$  στον Κρισαϊό κόλπο. Οι τιμές δίνονται σε Bq m<sup>-3</sup>

Πίνακας 7.3: Συγκεντρώσεις ενεργότητας του σταθμού 3 με τη μέθοδο *in situ* προσυγκέντρωσης. Δοκιμή φίλτρων διαφόρου συγκέντρωσης ιοντοαλλακτή

Ημερομηνία	14 07 2004					
Περιοχή	Κορινθιακός Κόλπος					
Συντεταγμένες	25° 1.5 N 24° 3.8 E					
Πορώδες (μm)	5		5		5	
Όγκοι (ml)	7205	7860	7865	8639	8646	9250
Τελικός Όγκος (ml)	655		774		604	
Συγκεντρώσεις Φίλτρων	2.5 mM		5.0 mM		7.5 mM	
Ενεργότητα Φίλτρων (Bq m <sup>-3</sup> )	A <sub>1</sub> = 1.3 ± 0.0	A <sub>2</sub> = 0.6 ± 0.0	A <sub>1</sub> = 2.0 ± 0.0	A <sub>2</sub> = 0.6 ± 0.0	A <sub>1</sub> = 2.4 ± 0.0	A <sub>2</sub> = 0.7 ± 0.0
Λόγος	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.48		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.32		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.30	
Τελική Ενεργότητα (Bq m <sup>-3</sup> )	<b>A<sub>total</sub> = 2.4 ± 0.1</b>		<b>A<sub>total</sub> = 2.9 ± 0.1</b>		<b>A<sub>total</sub> = 3.5 ± 0.1</b>	
Σφάλμα (%)	44		32		20	



Οι παρατηρούμενες τιμές για την οριζόντια διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  στον Κρυσσαίο κόλπο είναι απολύτως συγκρίσιμες με εκείνες που επικρατούν σε περιοχές ημικλειστών κόλπων. Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  κυμαίνονται από 3 – 5 Bq m<sup>-3</sup> στην περιοχή. Σε σύγκριση με τον Σαρωνικό κόλπο οι τιμές είναι λίγο μικρότερες ενώ σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές, οι οποίες επικρατούν στο Ιόνιο Πέλαγος οι παρούσες είναι απολύτως συγκρίσιμες. Γενικά οι τιμές αυτές κατανέμονται στο κατώτερο επίπεδο του φάσματος τιμών περιοχών ημικλειστών κόλπων, όπου έχουν καταγραφεί τιμές έως και 4 φορές υψηλότερες. Η επίδραση της γειτνιάζουσας ξηράς είναι μικρή, λόγω πιθανόν της εποχής δειγματοληψίας (θερινή περίοδος, σε σχέση με την χειμερινή, η οποία συνοδεύεται από μεταφορά φορτίου από την ξηρά, μέσω καιρικών διεργασιών).

Σε σχέση με τις τιμές που επικρατούν σε άλλες περιοχές της Μεσογείου θαλάσσης παρατηρείται σύγκλιση. Για παράδειγμα οι συγκεντρώσεις ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  στις θάλασσες του Άλμποραν, της Λιβύης, της Λεβαντίνης, της Τυρρηνικής και τέλος του κόλπου της Λυόν (ημικλειστός κόλπος) κυμαίνονται από 3 – 5 Bq m<sup>-3</sup> (Πίνακας 7.17).

Σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές, οι οποίες επικρατούν σε ανοικτούς ωκεανούς δεν παρατηρείται σύγκλιση. Για παράδειγμα οι συγκεντρώσεις ενεργότητας  $^{137}\text{Cs}$  στον Ατλαντικό Ωκεανό κυμαίνονται από 0.5 – 1.5 Bq m<sup>-3</sup> (Πίνακας 7.17), τιμές πολύ χαμηλότερες από αυτές που παρατηρούνται σε ημικλειστούς κόλπους.

### **7.1.2 Πατραϊκός κόλπος (Σεπτέμβριος 2004)**

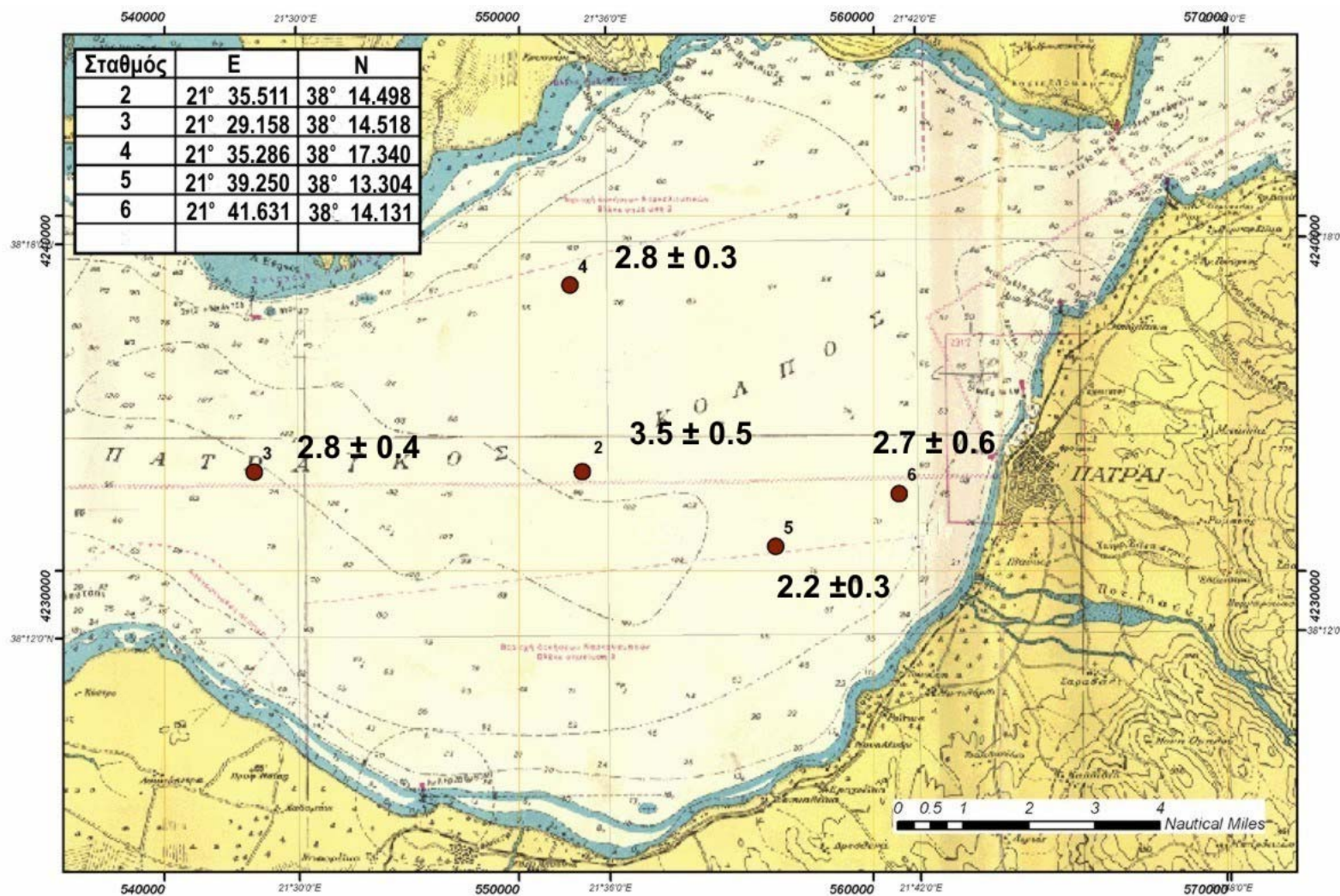
Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων της περιοχής του Πατραϊκού κόλπου για το διάστημα Σεπτεμβρίου 2004 φαίνονται στον Πίνακα 7.4. Στον Πίνακα 7.5 δίνεται η οριζόντια διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  στα 5 σημεία του Πατραϊκού κόλπου και ο αντίστοιχος χάρτης (Εικόνα 7.2). Τέλος, στον Πίνακα 7.6 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των φίλτρων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο κέντρο του Πατραϊκού κόλπου (Σταθμός 2), καθώς και η κατακόρυφη κατανομή στο εν λόγω σημείο. Απεικονίζονται αντίστοιχα η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας, της αλατότητας και του pH συναρτήσει του βάθους (Εικόνα 7.3), η κατακόρυφη κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  στο κέντρο του κόλπου και, τέλος, η διακύμανση της ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  συναρτήσει της αλατότητας (Εικόνα 7.4).

Πίνακας 7.4: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων του Πατραϊκού κόλπου

Ημερομηνία		Περιοχή	Συντεταγμένες	Βάθος Δειγματοληψίας (m)	Αγωγιμότητα (mS cm <sup>-1</sup> )	Αλατότητα (‰)	Θερμοκρασία (°C)	pH
28 09 2004	<b>Σταθμός 2.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.498 N 21° 35.511 E	-5.0	58.2	38.9	23.4	8.09
28 09 2004	<b>Σταθμός 2.2</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.498 N 21° 35.511 E	-46.8	58.1	38.7	19.2	7.96
28 09 2004	<b>Σταθμός 2.3</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.498 N 21° 35.511 E	-100.0	57.4	37.8	16.5	7.46
28 09 2004	<b>Σταθμός 3</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.518 N 21° 29.158 E	-5.0	55.4	36.8	24.4	7.80
28 09 2004	<b>Σταθμός 4</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 17.340 N 21° 35.286 E	-5.0	55.8	37.1	23.6	8.02
28 09 2004	<b>Σταθμός 5</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 13.304 21° 39.250	-5.0	54.2	38.7	21.7	8.96
28 09 2004	<b>Σταθμός 6</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.131 N 21° 41.631 E	-5.0	56.7	37.8	23.0	8.14

Πίνακας 7.5: Οριζόντια διασπορά <sup>137</sup>Cs στον Πατραϊκό κόλπο

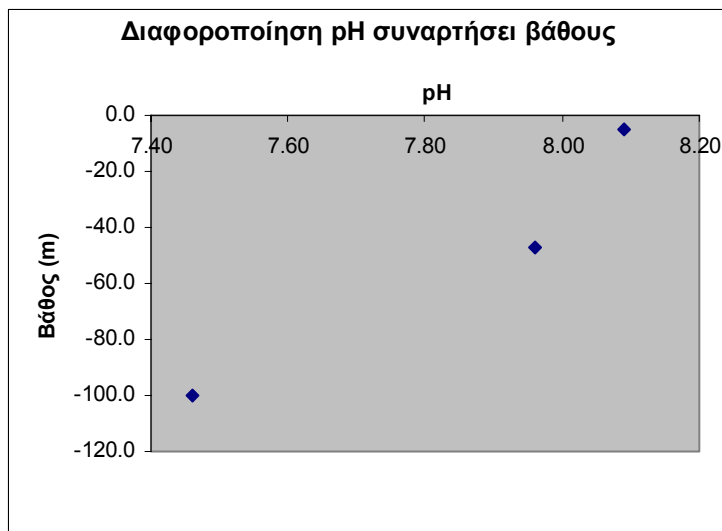
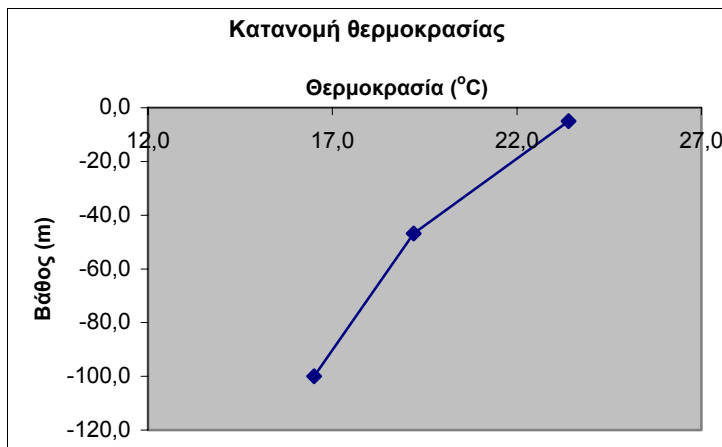
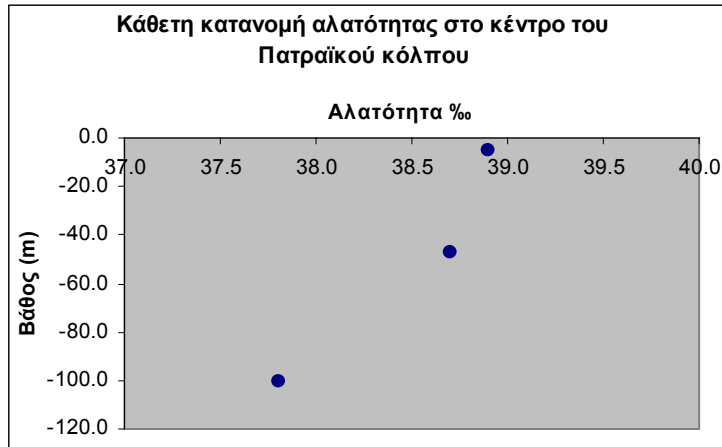
	<b>Ημερομηνία</b>	<b>Ενεργότητα (AMP Μέθοδος) (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Απόδοση %</b>
<b>Σταθμός 2</b>	28/09/2004	3.5 ± 0.5	82
<b>Σταθμός 3</b>	28/09/2004	2.8 ± 0.4	100
<b>Σταθμός 4</b>	28/09/2004	2.8 ± 0.3	100
<b>Σταθμός 5</b>	28/09/2004	2.2 ± 0.3	100
<b>Σταθμός 6</b>	28/09/2004	2.7 ± 0.6	85



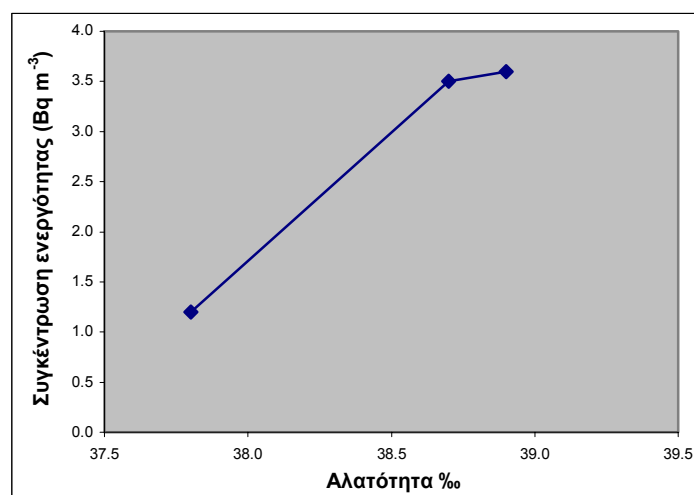
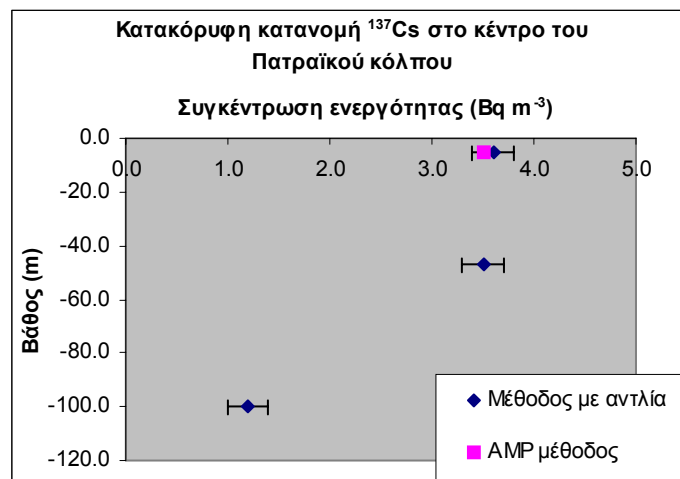
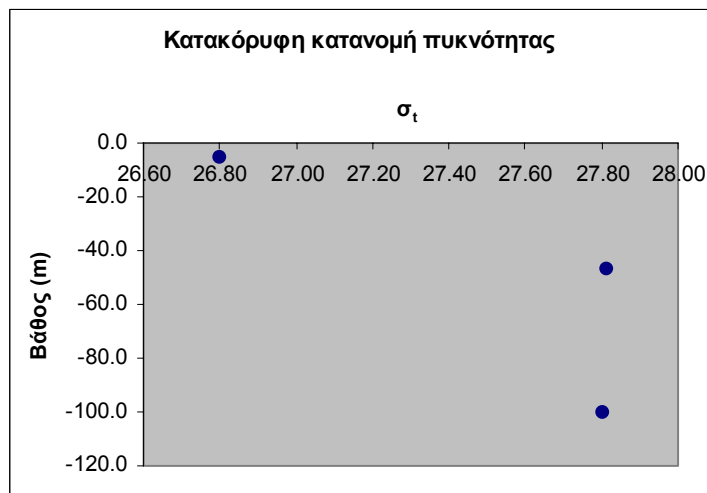
Εικόνα 7.2: Οριζόντια διασπορά  $^{137}\text{Cs}$  στον Πατραϊκό κόλπο. Οι τιμές δίνονται σε  $\text{Bq m}^{-3}$

Πίνακας 7.6: Χαρακτηριστικά φίλτρων – Κατακόρυφη κατανομή <sup>137</sup>Cs στο σταθμό 2 στο κέντρο του Πατραϊκού κόλπου

Ημερομηνία	28/09/2004					
Περιοχή	Πατραϊκός Κόλπος					
Συντεταγμένες	38° 14.498 N 21° 35.511 E					
Πορώδες (μm)	5		5		5	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
Βάρος φίλτρου πριν τη διαβροχή (g)	167.34	161.16	152.38	145.58	160.02	147.34
Βάρος φίλτρου μετά τη διαβροχή (g)	171.75	165.28	156.83	149.63	164.41	151.47
Απόβαρο (g)	4.41	4.12	4.45	4.05	4.39	4.13
Κορεσμός %	97.6	91.2	98.5	89.4	96.9	91.4
	<b>Σταθμός 2.1</b>		<b>Σταθμός 2.2</b>		<b>Σταθμός 2.3</b>	
Όγκοι (ml)	15344	15914	14801	15344	13308	14791
Τελικός Όγκος (ml)	570		543		1483	
Συγκεντρώσεις Φίλτρων	2.66 mM		2.66 mM		2.66 mM	
Ενεργότητα Φίλτρων (Bq m <sup>-3</sup> )	A <sub>1</sub> = 1.8 ± 0.0	A <sub>2</sub> = 0.9 ± 0.0	A <sub>1</sub> = 2.5 ± 0.1	A <sub>2</sub> = 0.7 ± 0.0	A <sub>1</sub> = 0.9 ± 0.0	A <sub>2</sub> = 0.2 ± 0.0
	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.50		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.28		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.26	
Τελική Ενεργότητα (Bq m <sup>-3</sup> )	A <sub>total</sub> = 3.6 ± 0.2		A <sub>total</sub> = 3.5 ± 0.2		A <sub>total</sub> = 1.2 ± 0.1	



Εικόνα 7.3: Κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας, αλατότητας και pH στο σταθμό 2 (κέντρο Πατραϊκού Κόλπου)



Εικόνα 7.4: Κατακόρυφη κατανομή πυκνότητας και  $^{137}\text{Cs}$  στο σταθμό 2 (κέντρο Πατραϊκού κόλπου) - Διαφοροποίηση συγκέντρωσης ενεργότητας σε σχέση με την αλατότητα

Όσον αφορά στην οριζόντια διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$ , οι τιμές στα επιφανειακά ύδατα του Πατραϊκού κόλπου κυμαίνονται από 2.2 έως 3.5 Bq m<sup>-3</sup>. Οι τιμές αυτές είναι απολύτως συγκρίσιμες με τις τιμές που επικρατούν σε ημικλειστούς κόλπους. Για παράδειγμα, σε σύγκριση με τις τιμές που προσδιορίστηκαν στον Κορινθιακό κόλπο υπάρχει μεγάλη ομοιότητα. Ειδικότερα, στους σταθμούς 5 και 6 θα περίμενε κανείς μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, εξαιτίας της εκροής του Γλαύκου ποταμού στο μέσο περίπου των σταθμών αυτών. Όπως προκύπτει από τις τιμές της αλατότητας στους σταθμούς αυτούς, οι οποίες θα έπρεπε να είναι χαμηλές σε σύγκριση με εκείνες στο κέντρο του κόλπου, η ποσότητα των υδάτων (fresh waters), που εκρέονται στον Πατραϊκό κόλπο είναι μάλλον μικρή. Αυτό δικαιολογείται και από το γεγονός ότι η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στο τέλος της θερμής περιόδου. Συνεπώς, η επιβάρυνση σε  $^{137}\text{Cs}$ , εξαιτίας απορροών είναι μάλλον ασήμαντη, πράγμα το οποίο πιστοποιείται και από τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην περιοχή. Από τις μικρές διακυμάνσεις των τιμών της επιφανειακής στοιβάδας του Πατραϊκού κόλπου φαίνεται η ομοιογένεια, η οποία υπάρχει στην περιοχή. Στο σταθμό 2, στο κέντρο του κόλπου, παρατηρείται η μεγαλύτερη επιφανειακή τιμή, γεγονός αξιοσημείωτο για ημικλειστό κόλπο. Αυτό δείχνει ότι μάλλον δεν υπάρχει ισχυρή επίδραση της ξηράς. Όμως, η υψηλή τιμή στο κέντρο του κόλπου δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα ρεύματα, που επικρατούν στον Πατραϊκό κόλπο, έχουν κατά κύριο λόγο κυκλική κατεύθυνση. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε συσσώρευση των συστατικών των υδάτων (στερεών και μη) στο κέντρο του κόλπου.

Σε σχέση με τις επικρατούσες τιμές σε περιοχές του Ιονίου Πελάγους, με το οποίο υπάρχει άμεση γειτνίαση, παρατηρείται σύγκλιση των συγκεντρώσεων ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  (3 - 6 Bq m<sup>-3</sup>), ενώ σε σχέση με τις τιμές, που επικρατούν στο βορειοανατολικό Αιγαίο παραμένουν σε χαμηλές τιμές (Πίνακας 7.18).

Σε σχέση με άλλες περιοχές της Μεσογείου θαλάσσης οι τιμές είναι παρόμοιες, ενώ σε σχέση με τις τιμές, που παρατηρούνται σε ανοιχτούς ωκεανούς, είναι υψηλές (Πίνακας 7.17). Αυτό δικαιολογείται από τη χαμηλή κινητικότητα των υδάτων των ημικλειστών κόλπων (μικρότερης έντασης ρεύματα), στην οποία οφείλεται η συσσώρευση ρύπων.

Όσον αφορά στη κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  στην υδάτινη στήλη στο κέντρο του Πατραϊκού κόλπου (σταθμός 2) η κατάσταση έχει ως εξής: Παρατηρείται υψηλότερη θερμοκρασία στην επιφανειακή στοιβάδα, εξαιτίας της έντονης ηλιοφάνειας, η οποία συνοδεύει τους θερμούς μήνες του έτους και μείωση σε σχέση με το βάθος (Εικόνα 7.3). Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έντονη εξάτμιση και άρα την αύξηση της αλατότητας της επιφανειακής στοιβάδας και τη μείωση της σε σχέση με το βάθος, πράγμα το οποίο πιστοποιείται και από τις μετρήσεις στην περιοχή (Εικόνα 7.3). Συνεπώς, είναι απόλυτα

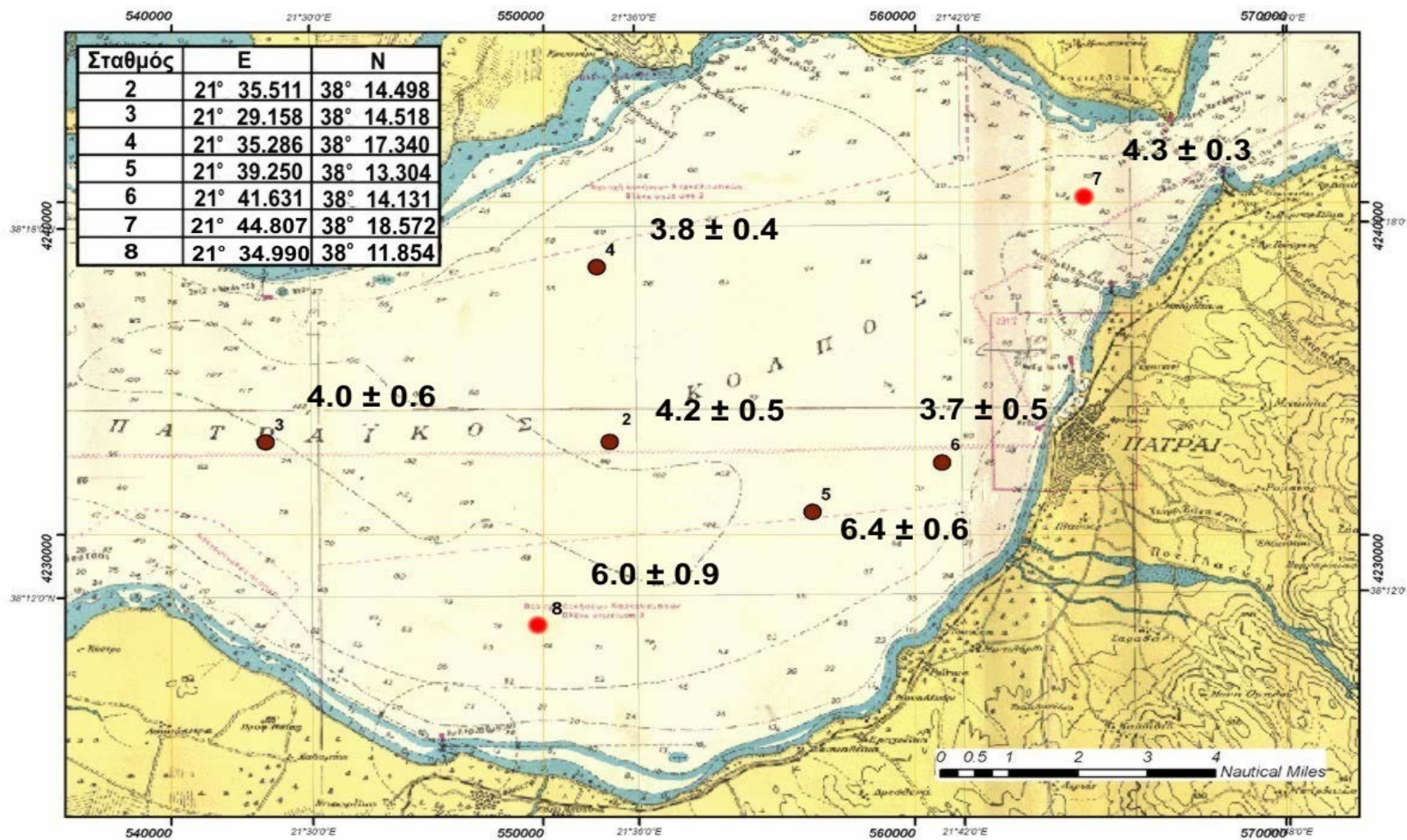
φυσιολογικό να παρατηρούνται υψηλότερες συγκεντρώσεις  $^{137}\text{Cs}$  στην επιφανειακή στοιβάδα και να μειώνονται αυξανόμενου του βάθους, δεδομένου ότι το  $^{137}\text{Cs}$  συμμετέχει στην αλατότητα του νερού (conservative) (Εικόνα 7.4).

### 7.1.3 Πατραϊκός κόλπος (Μάρτιος 2005)

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων της περιοχής του Πατραϊκού κόλπου για το διάστημα Μαρτίου 2005 για τους διάφορους σταθμούς δειγματοληψίας δίνονται στους: Πίνακας 7.8, Πίνακας 7.10 – Πίνακας 7.14 και Πίνακας 7.16. Στον Πίνακας 7.7 δίνεται η οριζόντια διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  στα 7 σημεία του Πατραϊκού κόλπου και ο αντίστοιχος χάρτης (Εικόνα 7.5). Τέλος, στους: Πίνακας 7.9 – Πίνακας 7.13 και Πίνακας 7.15 – Πίνακας 7.16 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των φίλτρων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στους σταθμούς δειγματοληψίας του Πατραϊκού κόλπου. Απεικονίζονται αντίστοιχα η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας, της αλατότητας και του pH συναρτήσει του βάθους για τον κάθε σταθμό (Εικόνα 7.7, Εικόνα 7.8, Εικόνα 7.10, Εικόνα 7.12, Εικόνα 7.14, Εικόνα 7.16 και Εικόνα 7.18), καθώς και η κατακόρυφη κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  στο κέντρο του κόλπου και η διακύμανση της ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  συναρτήσει της αλατότητας (Εικόνα 7.7, Εικόνα 7.9, Εικόνα 7.11, Εικόνα 7.13, Εικόνα 7.15, Εικόνα 7.17, Εικόνα 7.19).

Πίνακας 7.7: Οριζόντια διασπορά  $^{137}\text{Cs}$  στον Πατραϊκό κόλπο

	Ημερομηνία	Ενεργότητα (AMP Μέθοδος) (Bq m <sup>-3</sup> )	Απόδοση %
<b>Σταθμός 2</b>	31/03/2005	4.2 ± 0.5	83
<b>Σταθμός 3</b>	30/03/2005	4.0 ± 0.6	92
<b>Σταθμός 4</b>	30/03/2005	3.8 ± 0.4	91
<b>Σταθμός 5</b>	31/03/2005	6.4 ± 0.6	86
<b>Σταθμός 6</b>	31/03/2005	3.7 ± 0.5	90
<b>Σταθμός 7</b>	30/03/2005	4.3 ± 0.3	85
<b>Σταθμός 8</b>	30/03/2005	6.0 ± 0.9	97



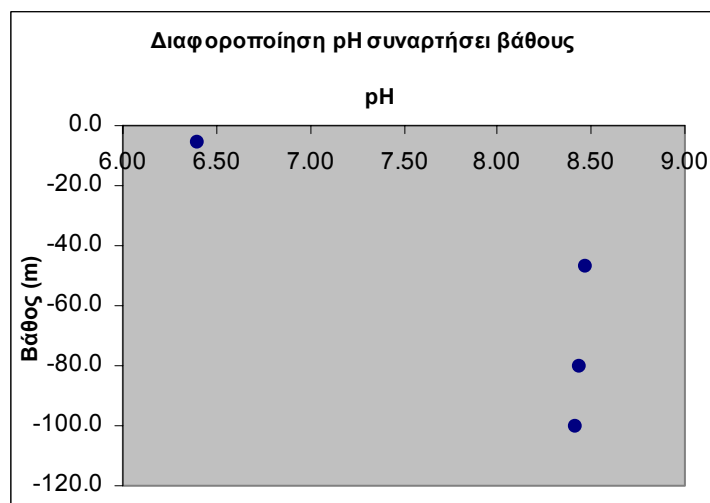
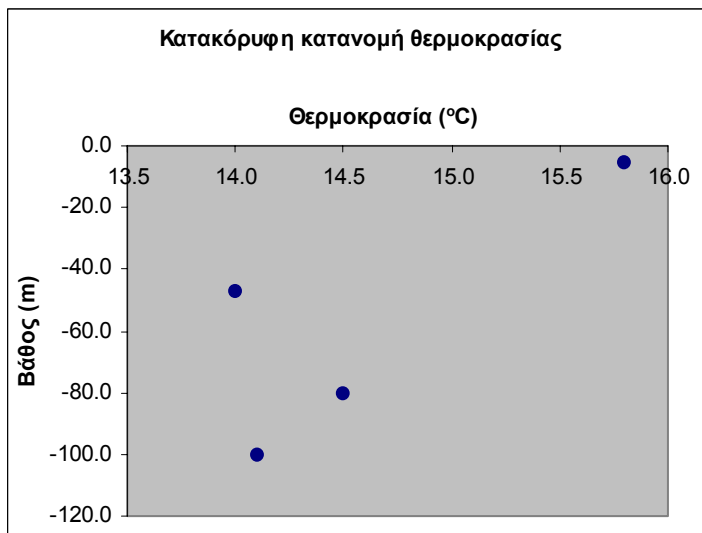
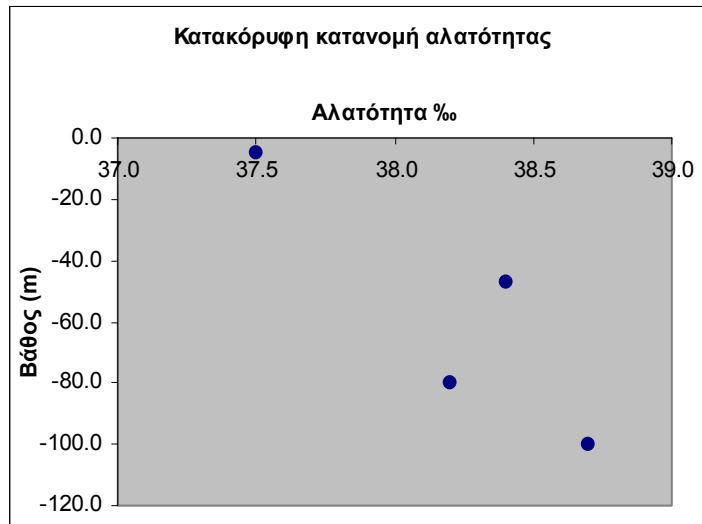
Εικόνα 7.5: Οριζόντια διασπορά  $^{137}\text{Cs}$  στον Πατραϊκό κόλπο. Οι τιμές δίνονται σε  $\text{Bq m}^{-3}$

Πίνακας 7.8: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων του σταθμού 2 του Πατραϊκού κόλπου

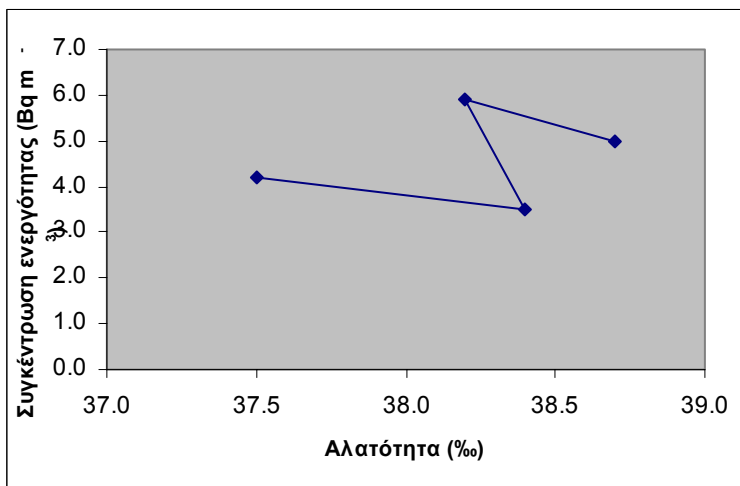
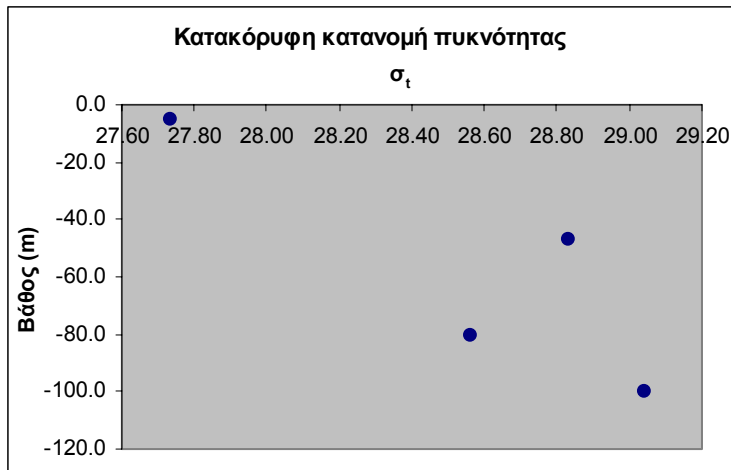
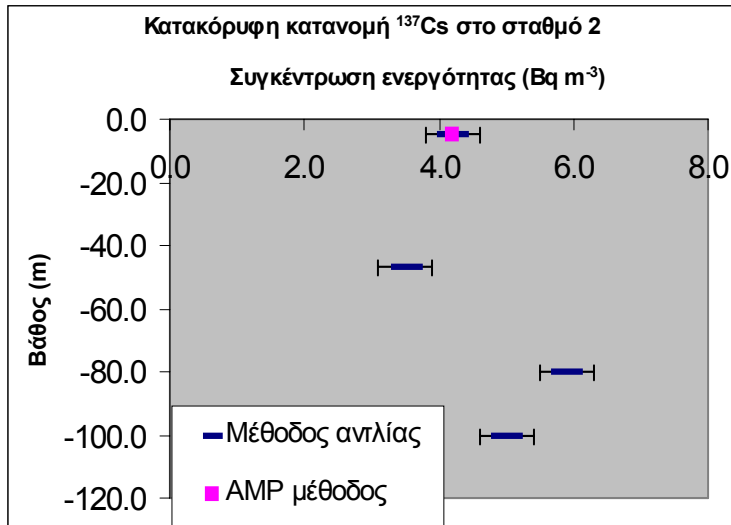
Ημερομηνία		Περιοχή	Συντεταγμένες	Βάθος Δειγματοληψίας (m)	Αγωγιμότητα (mS cm <sup>-1</sup> )	Αλατότητα (‰)	Θερμοκρασία (°C)	pH
31/03/05	<b>Σταθμός 2.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.498 N 21° 35.511 E	-5.0	46.5	37.5	15.8	6.40
31/03/05	<b>Σταθμός 2.2</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.498 N 21° 35.511 E	-46.8	45.8	38.4	14.0	8.47
31/03/05	<b>Σταθμός 2.3</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.498 N 21° 35.511 E	-80.0	45.7	38.2	14.5	8.43
31/03/05	<b>Σταθμός 2.4</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.498 N 21° 35.511 E	-100.0	45.9	38.7	14.1	8.41

Πίνακας 7.9: Χαρακτηριστικά των φίλρων που χρησιμοποιήθηκαν στο σταθμό 2

Ημερομηνία	31/03/2005							
Περιοχή	Πατραϊκός Κόλπος							
Συντεταγμένες	38° 14.498 N 21° 35.511 E							
Πορώδες (μm)	1		1		1		1	
Αριθμός φίλτρου	1α	1β	2α	2β	3α	3β	4α	4β
Βάρος φίλτρου πριν τη διαβροχή (g)	167.34	138.67	152.38	159.88	160.02	135.49	142.46	133.84
Βάρος φίλτρου μετά τη διαβροχή (g)	171.75	142.98	157.83	164.01	164.41	139.75	146.48	137.83
Απόβαρο (g)	4.41	4.31	4.45	4.13	4.39	4.26	4.02	3.99
Κορεσμός %	97.6	95.5	98.5	91.3	96.9	94.3	88.9	88.3
	<b>Σταθμός 2.1</b>		<b>Σταθμός 2.2</b>		<b>Σταθμός 2.3</b>		<b>Σταθμός 2.4</b>	
Όγκοι [V <sub>a</sub> , V <sub>b</sub> ] (ml)	16867	16941	16941	17111	17111	17408	17408	17631
Τελικός Όγκος (ml)	74		170		297		223	
Συγκεντρώσεις Φίλτρων	2.66 mM		2.66 mM		2.66 mM		2.66 mM	
Ενεργότητα Φίλτρων (Bq m <sup>-3</sup> )	A <sub>1</sub> = 3.1 ± 0.4	A <sub>2</sub> = 0.8 ± 0.3	A <sub>1</sub> = 3.0 ± 0.2	A <sub>2</sub> = 0.4 ± 0.1	A <sub>1</sub> = 1.9 ± 0.1	A <sub>2</sub> = 1.3 ± 0.1	A <sub>1</sub> = 2.0 ± 0.1	A <sub>2</sub> = 1.2 ± 0.1
	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.26		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.13		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.68		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.60	
Τελική Ενεργότητα (Bq m <sup>-3</sup> )	A <sub>total</sub> = 4.2 ± 0.4		A <sub>total</sub> = 3.5 ± 0.3		A <sub>total</sub> = 5.9 ± 0.3		A <sub>total</sub> = 5.0 ± 0.3	



Εικόνα 7.6: Κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας, αλατότητας και pH στο σταθμό 2 (κέντρο Πατραϊκού κόλπου)

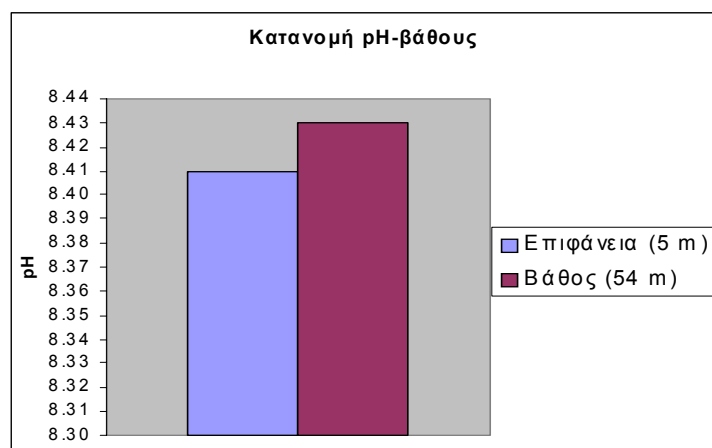
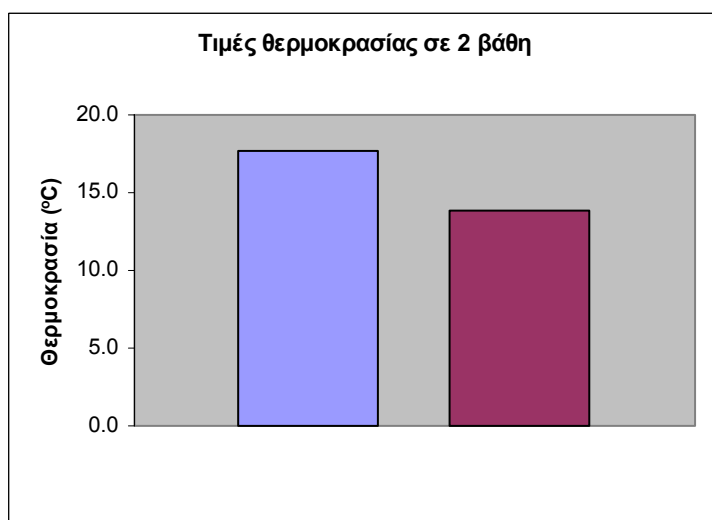
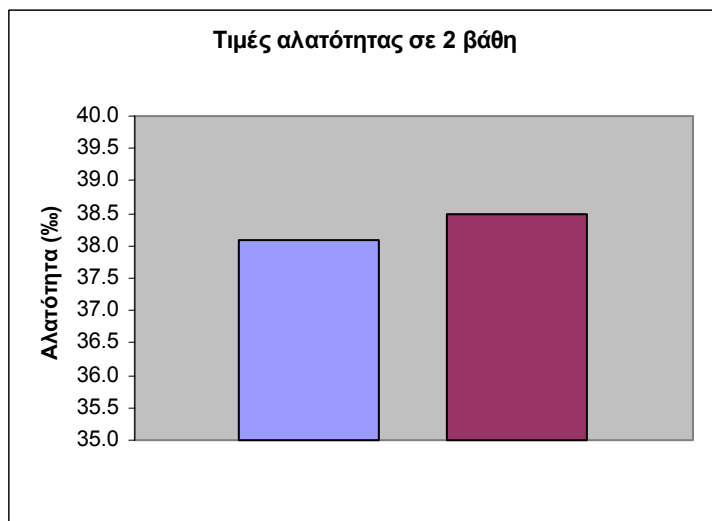


Εικόνα 7.7: Κατακόρυφη κατανομή πυκνότητας και  $^{137}\text{Cs}$  στο σταθμό 2 (κέντρο Πατραϊκού κόλπου) – Διαφοροποίηση συγκέντρωσης ενεργότητας σε σχέση με την αλατότητα

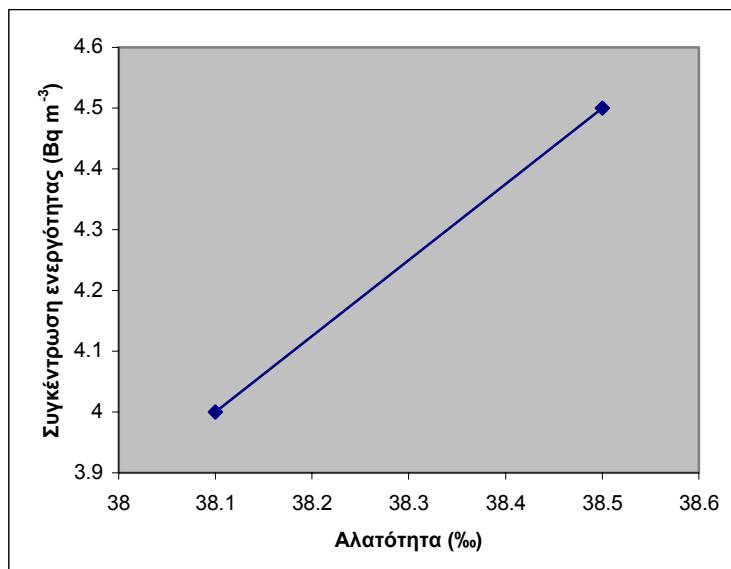
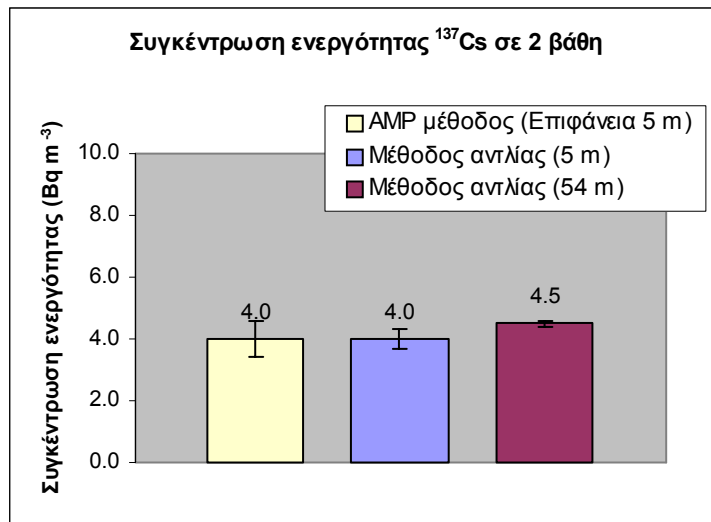
Πίνακας 7.10: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων του σταθμού 3 του Πατραϊκού κόλπου και χαρακτηριστικά των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν

Ημερομηνία		Περιοχή	Συντεταγμένες	Βάθος Δειγματοληψίας (m)	Αγωγιμότητα (mS cm <sup>-1</sup> )	Αλατότητα (‰)	Θερμοκρασία (°C)	pH
30/03/2005	<b>Σταθμός 3.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.518 N 21° 29.158 E	-5.0	49.2	38.1	17.7	8.41
30/03/2005	<b>Σταθμός 3.2</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.518 N 21° 29.158 E	-54.0	46.0	38.5	13.8	8.43

<b>Ημερομηνία</b>	30/03/2005			
<b>Περιοχή</b>	Πατραϊκός Κόλπος			
<b>Συντεταγμένες</b>	38° 14.518 N 21° 29.158 E			
<b>Πορώδες (μm)</b>	1		1	
<b>Αριθμός φίλτρου</b>	5α	5β	6α	6β
<b>Βάρος φίλτρου πριν τη διαβροχή (g)</b>	138.23	160.33	151.72	132.46
<b>Βάρος φίλτρου μετά τη διαβροχή (g)</b>	142.56	164.34	156.05	136.58
<b>Απόβαρο (g)</b>	4.33	4.01	4.33	4.12
<b>Κορεσμός %</b>	95.7	88.7	95.7	88.7
	<b>Σταθμός 3.1</b>		<b>Σταθμός 3.2</b>	
<b>Όγκοι [V<sub>a</sub>, V<sub>b</sub>] (ml)</b>	16313	16443	16444	16616
<b>Τελικός Όγκος (ml)</b>	130		172	
<b>Συγκεντρώσεις Φίλτρων</b>	2.66 mM		2.66 mM	
<b>Ενεργότητα Φίλτρων (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	A <sub>1</sub> = 2.5 ± 0.2	A <sub>2</sub> = 0.9 ± 0.2	A <sub>1</sub> = 2.6 ± 0.2	A <sub>2</sub> = 1.1 ± 0.1
	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.37		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.42	
<b>Τελική Ενεργότητα (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	A <sub>total</sub> = 4.0 ± 0.3		A <sub>total</sub> = 4.5 ± 0.1	



Εικόνα 7.8: Κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας, αλατότητας και pH στο σταθμό 3

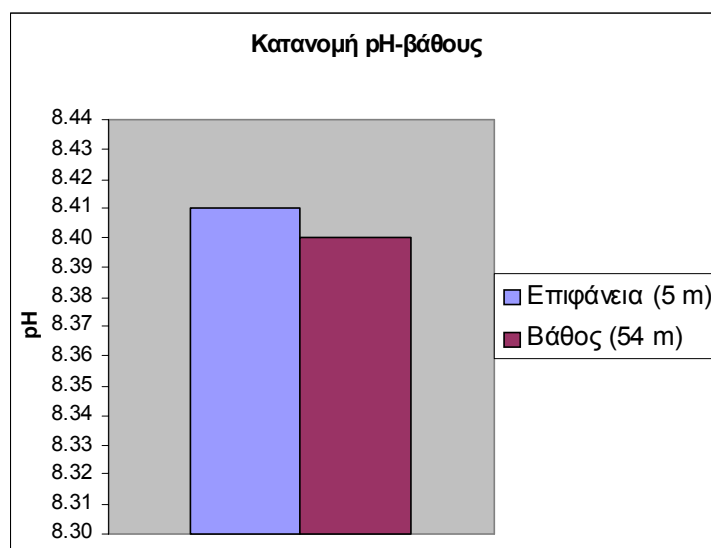
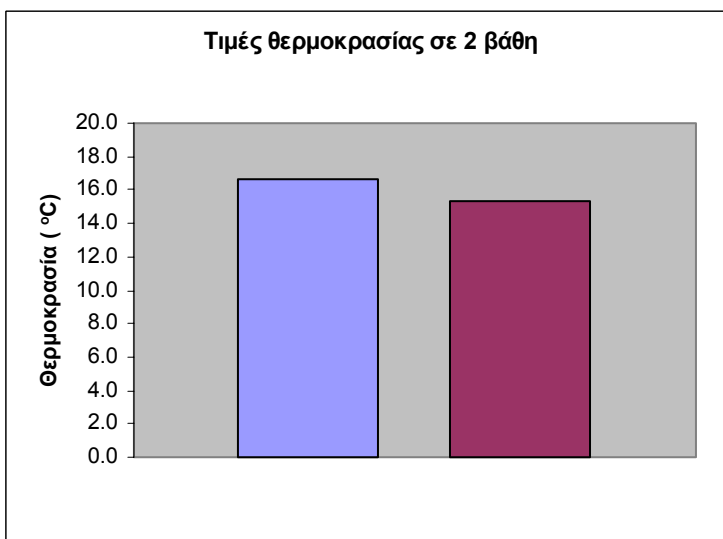
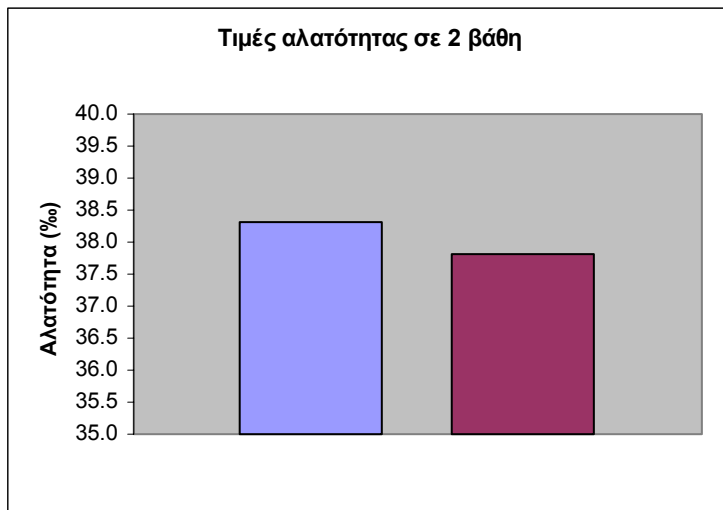


Εικόνα 7.9: Κατακόρυφη κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  στο σταθμό 3 – Διαφοροποίηση συγκέντρωσης ενεργότητας σε σχέση με την αλατότητα

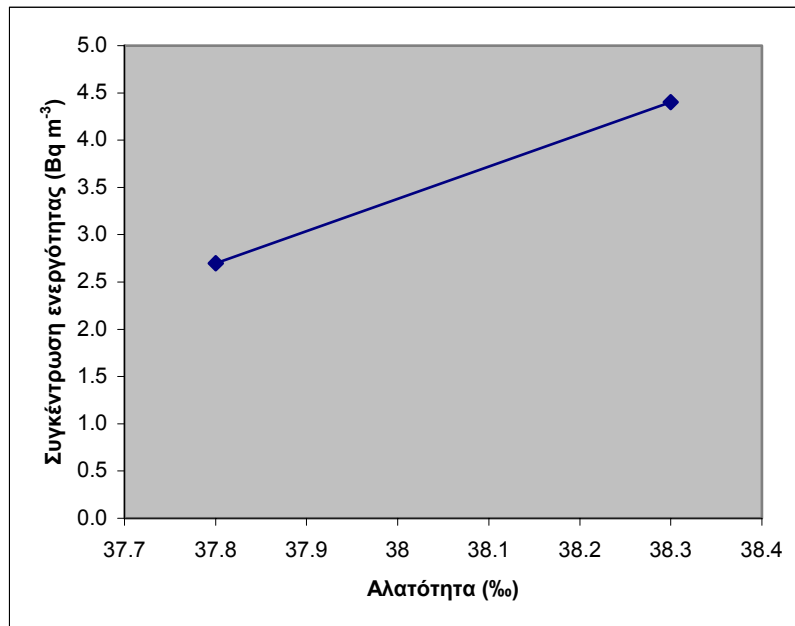
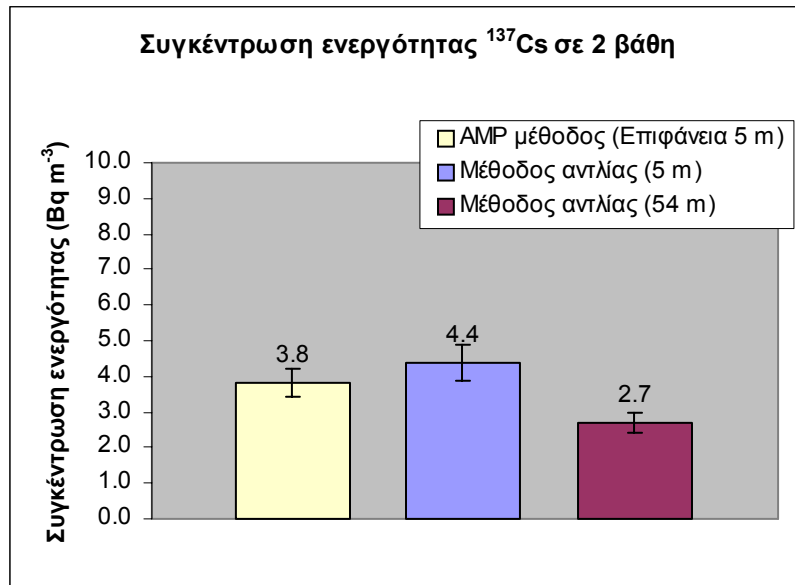
Πίνακας 7.11: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων του σταθμού 4 του Πατραϊκού κόλπου και χαρακτηριστικά των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν

Ημερομηνία		Περιοχή	Συντεταγμένες	Βάθος Δειγματοληψίας (m)	Αγωγιμότητα (mS cm <sup>-1</sup> )	Αλατότητα (‰)	Θερμοκρασία (°C)	pH
30/03/2005	<b>Σταθμός 4.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 17.340 N 21° 35.286 E	-5.0	48.2	38.3	16.6	8.4 1
30/03/2005	<b>Σταθμός 4.2</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 17.340 N 21° 35.286 E	-54.0	46.3	37.8	15.3	8.4 0

<b>Ημερομηνία</b>	30/03/2005			
<b>Περιοχή</b>	Πατραϊκός Κόλπος			
<b>Συντεταγμένες</b>	38° 17.340 N 21° 35.286 E			
<b>Πορώδες (μm)</b>	1		1	
<b>Αριθμός φίλτρου</b>	7α	7β	8α	8β
<b>Βάρος φίλτρου πριν τη διαβροχή (g)</b>	138.79	142.13	158.75	154.56
<b>Βάρος φίλτρου μετά τη διαβροχή (g)</b>	143.14	146.23	163.21	158.52
<b>Απόβαρο (g)</b>	4.35	4.10	4.46	3.96
<b>Κορεσμός %</b>	96.4	90.7	98.5	87.6
	<b>Σταθμός 4.1</b>		<b>Σταθμός 4.2</b>	
<b>Όγκοι [V<sub>a</sub>, V<sub>b</sub>] (ml)</b>	16181	16284	16285	16311
<b>Τελικός Όγκος (ml)</b>	103		26	
<b>Συγκεντρώσεις Φίλτρων</b>	2.66 mM		2.66 mM	
<b>Ενεργότητα Φίλτρων (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	A <sub>1</sub> = 3.4 ± 0.3	A <sub>2</sub> = 0.8 ± 0.3	A <sub>1</sub> = 2.7 ± 0.3	A <sub>2</sub> = 1.9 ± 1.1
	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.23		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.71	
<b>Τελική Ενεργότητα (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	A <sub>total</sub> = 4.4 ± 0.5		A <sub>total</sub> = 2.7 ± 0.3	



Εικόνα 7.10: Κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας, αλατότητας και pH στο σταθμό 4

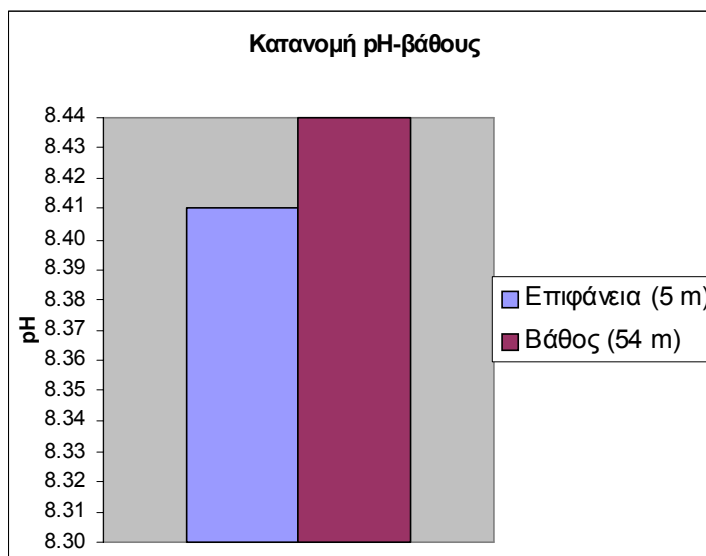
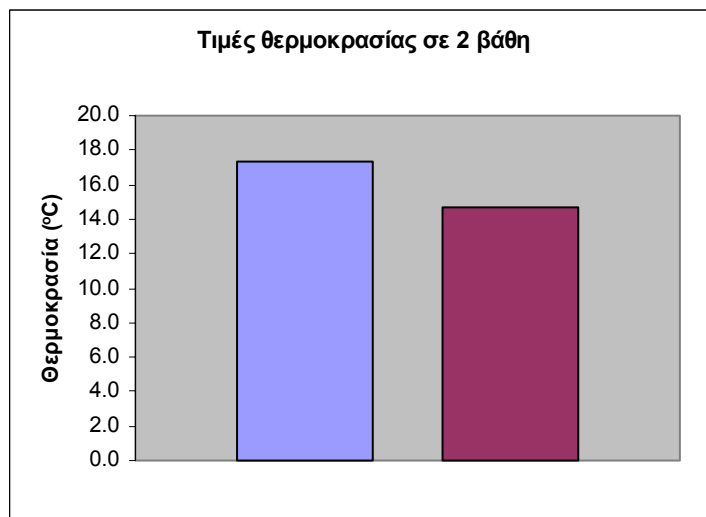
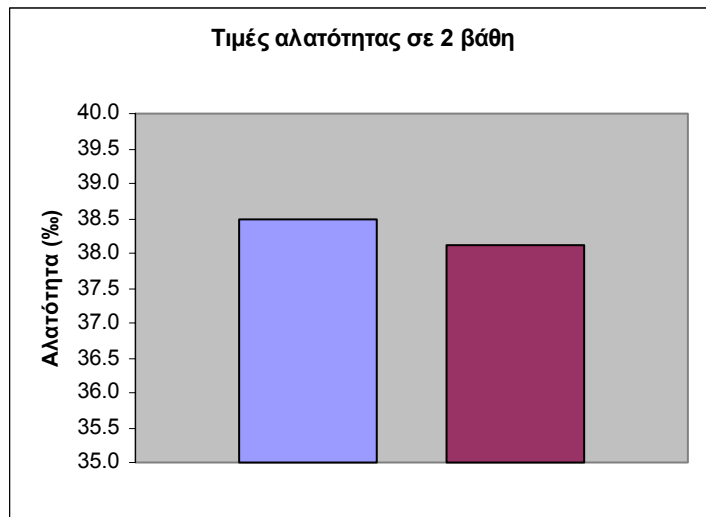


**Εικόνα 7.11:** Κατακόρυφη κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  στο σταθμό 4 – Διαφοροποίηση συγκέντρωσης ενεργότητας σε σχέση με την αλατότητα

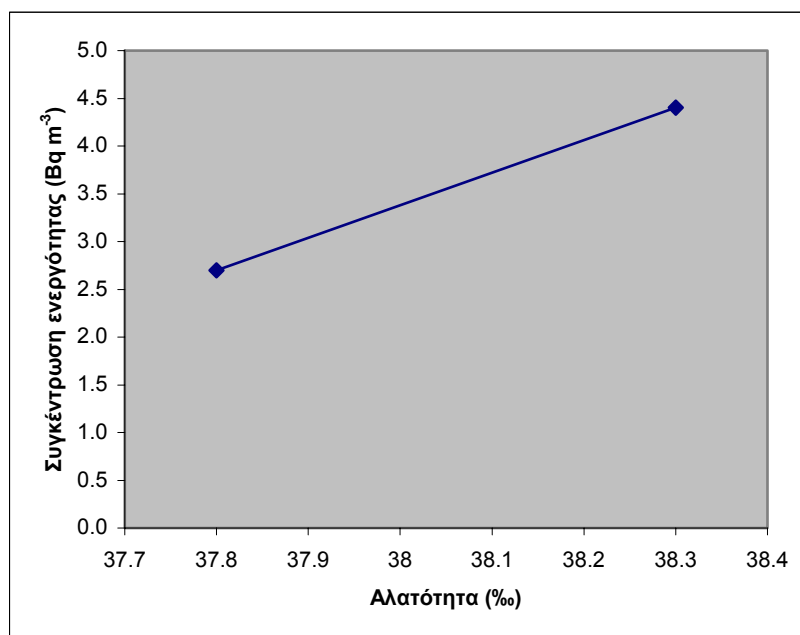
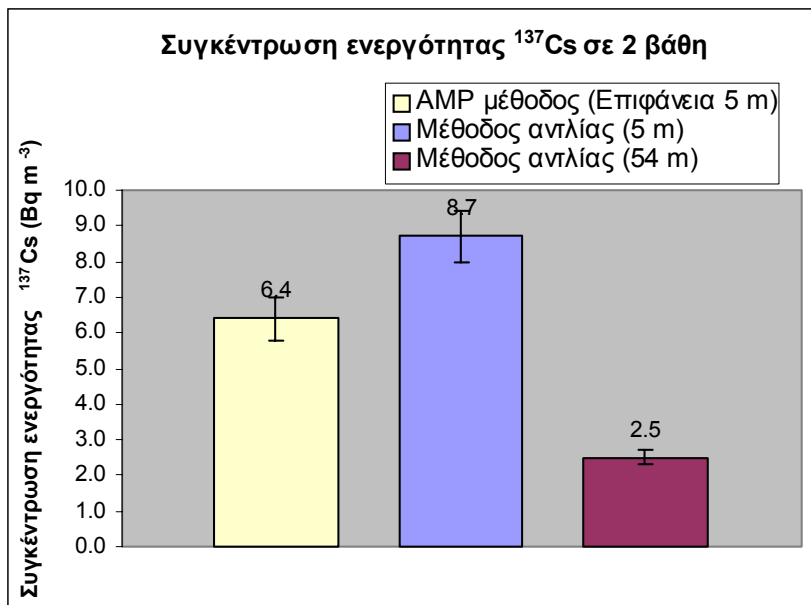
Πίνακας 7.12: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων του σταθμού 5 του Πατραϊκού κόλπου και χαρακτηριστικά των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν

Ημερομηνία		Περιοχή	Συντεταγμένες	Βάθος Δειγματοληψίας (m)	Αγωγιμότητα (mS cm <sup>-1</sup> )	Αλατότητα (%)	Θερμοκρασία (°C)	pH
31/03/2005	<b>Σταθμός 5.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 13.304 21° 39.250	-5.0	49.1	38.5	17.3	8.4 1
31/03/2005	<b>Σταθμός 5.2</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 13.304 21° 39.250	-54.0	46.0	38.1	14.7	8.4 4

<b>Ημερομηνία</b>	31/03/2005			
<b>Περιοχή</b>	Πατραϊκός Κόλπος			
<b>Συντεταγμένες</b>	38° 13.304 21° 39.250			
<b>Πορώδες (μm)</b>	1		1	
<b>Αριθμός φίλτρου</b>	9α	9β	10α	10β
<b>Βάρος φίλτρου πριν τη διαβροχή (g)</b>	138.49	165.12	146.66	159.99
<b>Βάρος φίλτρου μετά τη διαβροχή (g)</b>	142.82	169.23	151.08	164.00
<b>Απόβαρο (g)</b>	4.33	4.11	4.42	4.01
<b>Κορεσμός %</b>	95.7	91.0	97.6	88.6
	<b>Σταθμός 5.1</b>		<b>Σταθμός 5.2</b>	
<b>Όγκοι [V<sub>a</sub>, V<sub>b</sub>] (ml)</b>	17632	17913	17913	18302
<b>Τελικός Όγκος (ml)</b>	281		389	
<b>Συγκεντρώσεις Φίλτρων</b>	2.66 mM		2.66 mM	
<b>Ενεργότητα Φίλτρων (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	A <sub>1</sub> = 1.3 ± 0.1	A <sub>2</sub> = 1.1 ± 0.1	A <sub>1</sub> = 1.3 ± 0.1	A <sub>2</sub> = 0.6 ± 0.1
	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.85		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.46	
<b>Τελική Ενεργότητα (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	A <sub>total</sub> = 8.7 ± 0.7		A <sub>total</sub> = 2.5 ± 0.2	



Εικόνα 7.12: Κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας, αλατότητας και pH στο σταθμό 5

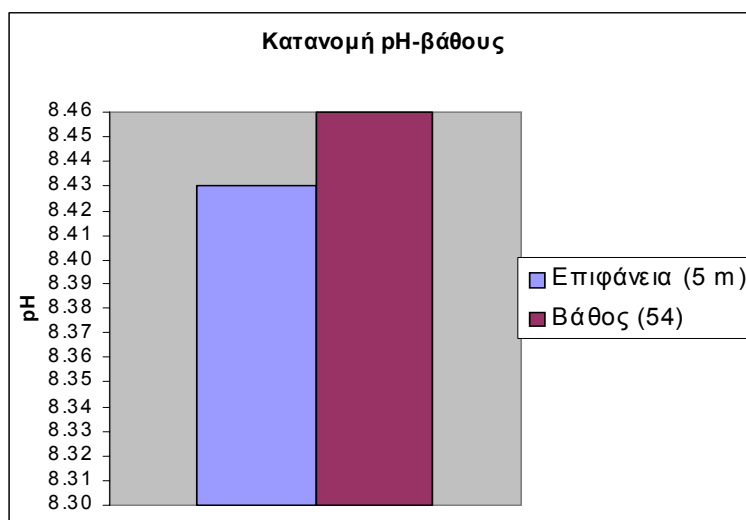
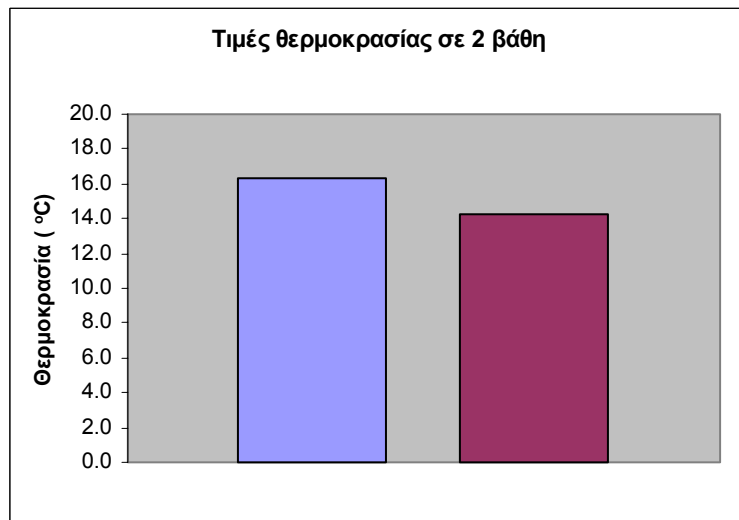
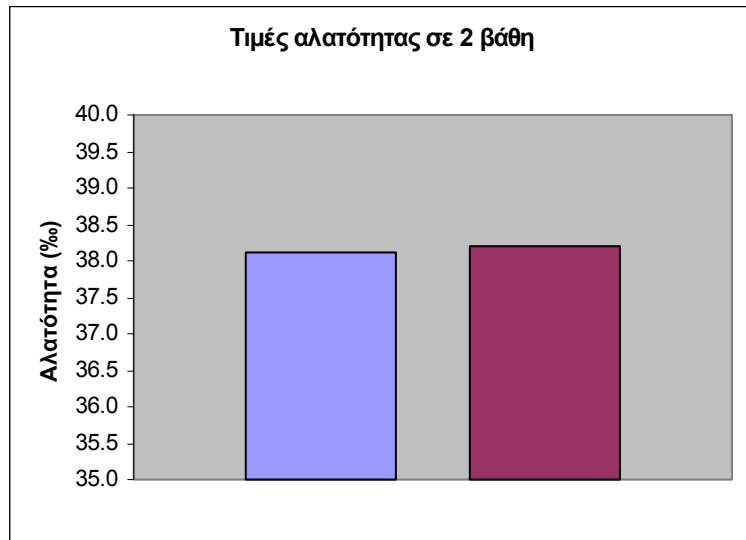


Εικόνα 7.13: Κατακόρυφη κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  στο σταθμό 5 – Διαφοροποίηση συγκέντρωσης ενεργότητας σε σχέση με την αλατότητα

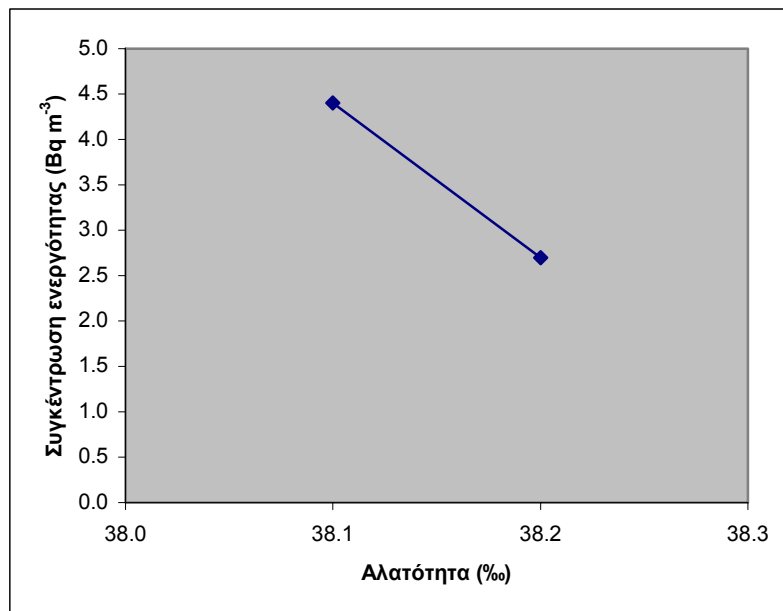
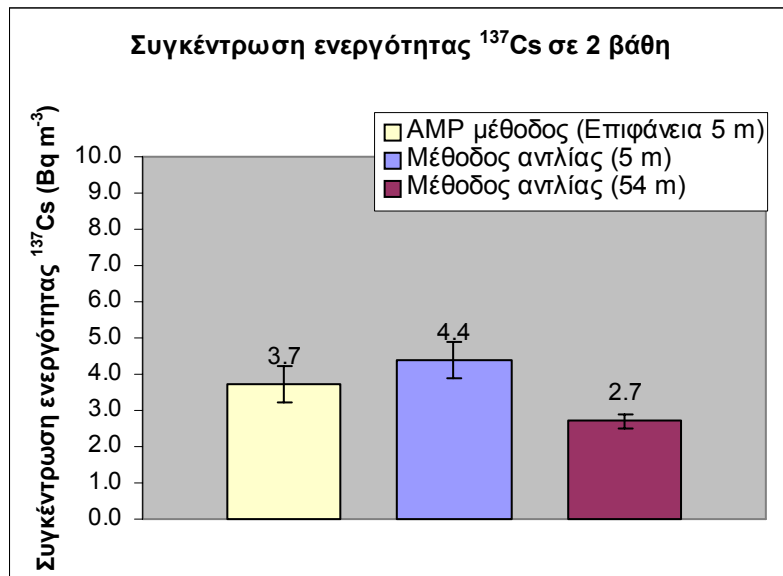
**Πίνακας 7.13: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων του σταθμού 6 του Πατραϊκού κόλπου και χαρακτηριστικά των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν**

Ημερομηνία		Περιοχή	Συντεταγμένες	Βάθος Δειγματοληψίας (m)	Αγωγιμότητα (mS cm <sup>-1</sup> )	Αλατότητα (‰)	Θερμοκρασία (°C)	pH
31/03/2005	<b>Σταθμός 6.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.131 N 21° 41.631 E	-5.0	47.8	38.1	16.3	8.43
31/03/2005	<b>Σταθμός 6.2</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 14.131 N 21° 41.631 E	-50.4	45.7	38.2	14.3	8.46

<b>Ημερομηνία</b>	31/03/2005			
<b>Περιοχή</b>	Πατραϊκός Κόλπος			
<b>Συντεταγμένες</b>	38° 14.131 N 21° 41.631 E			
<b>Πορώδες (μm)</b>	1		1	
<b>Αριθμός φίλτρου</b>	11α	11β	12α	12β
<b>Βάρος φίλτρου πριν τη διαβροχή (g)</b>	167.76	160.56	158.75	137.47
<b>Βάρος φίλτρου μετά τη διαβροχή (g)</b>	172.06	164.88	163.25	141.48
<b>Απόβαρο (g)</b>	4.30	4.32	4.50	4.01
<b>Κορεσμός %</b>	95.1	95.7	99.6	88.8
	<b>Σταθμός 6.1</b>		<b>Σταθμός 6.2</b>	
<b>Όγκοι [V<sub>a</sub>, V<sub>b</sub>] (ml)</b>	18302	18363	18363	18581
<b>Τελικός Όγκος (ml)</b>	61		218	
<b>Συγκεντρώσεις Φίλτρων</b>	2.66 mM		2.66 mM	
<b>Ενεργότητα Φίλτρων (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	A <sub>1</sub> = 3.0 ± 0.5	A <sub>2</sub> = 1.0 ± 0.3	A <sub>1</sub> = 2.0 ± 0.1	A <sub>2</sub> = 0.5 ± 0.1
	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.33		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.24	
<b>Τελική Ενεργότητα (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	A <sub>total</sub> = 4.4 ± 0.5		A <sub>total</sub> = 2.7 ± 0.2	



Εικόνα 7.14: Κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας, αλατότητας και pH στο σταθμό 6



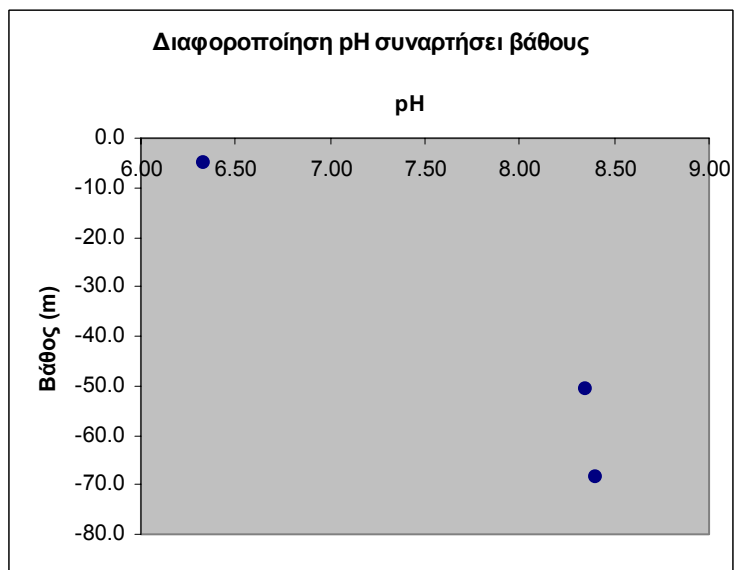
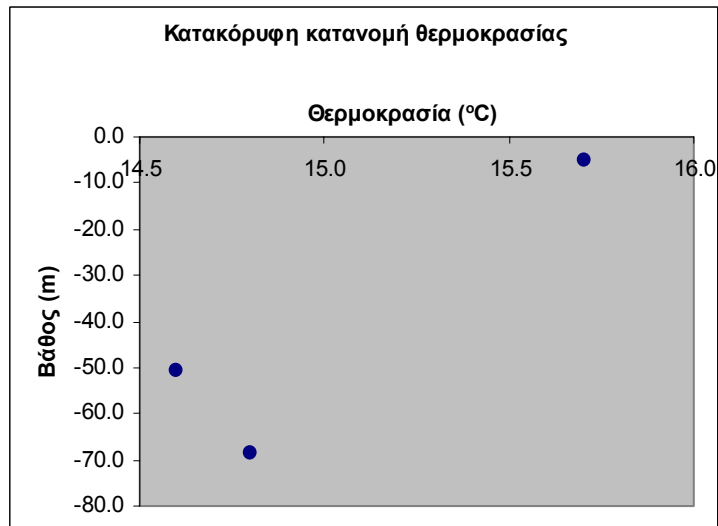
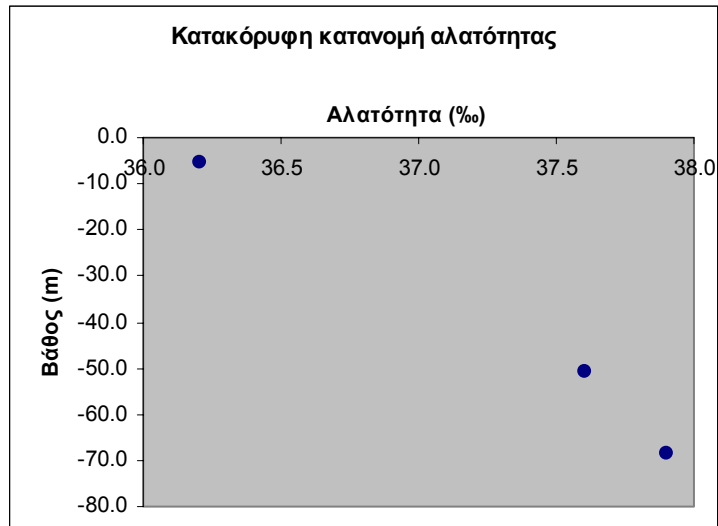
Εικόνα 7.15: Κατακόρυφη κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  στο σταθμό 6 – Διαφοροποίηση συγκέντρωσης ενεργότητας σε σχέση με την αλατότητα

Πίνακας 7.14: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων του σταθμού 7 του Πατραϊκού κόλπου

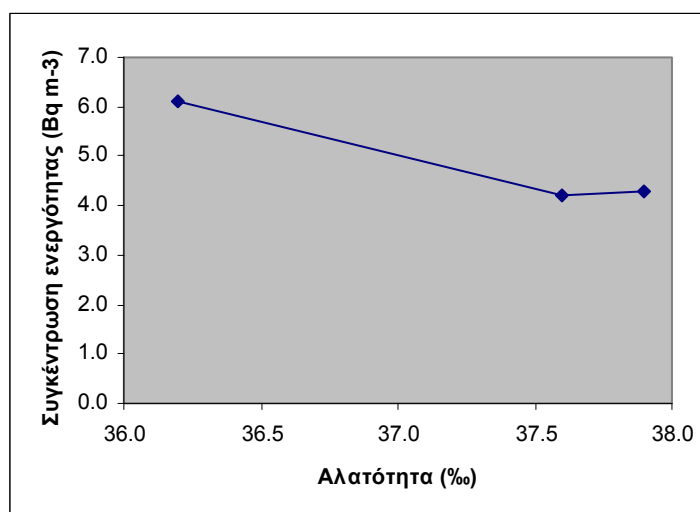
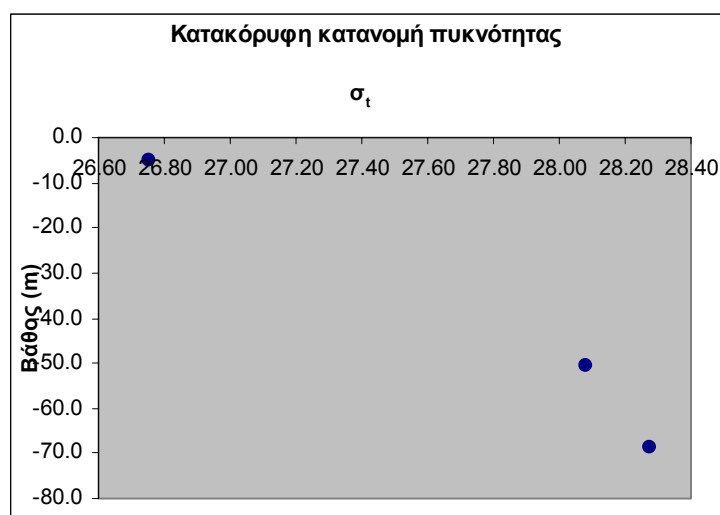
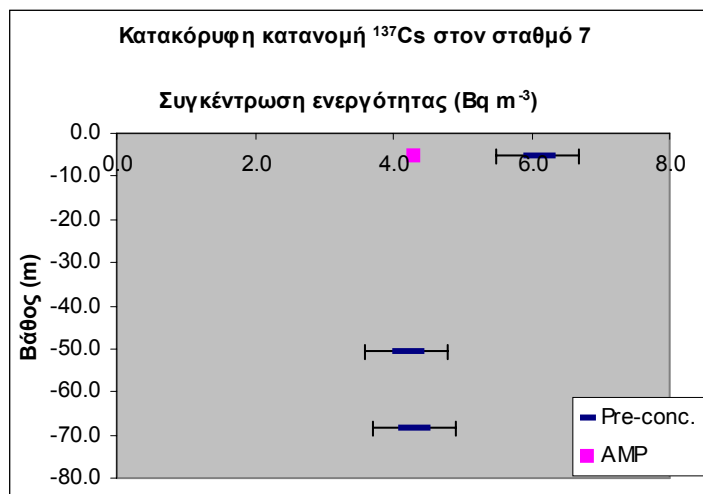
Ημερομηνία		Περιοχή	Συντεταγμένες	Βάθος Δειγματοληψίας (m)	Αγωγιμότητα (mS cm <sup>-1</sup> )	Αλατότητα (‰)	Θερμοκρασία (°C)	pH
30/03/05	<b>Σταθμός 7.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 18.572 N	-5.0	44.8	36.2	15.7	6.33
			21° 44.807 E					
30/03/05	<b>Σταθμός 7.2</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 18.572 N	-50.4	45.6	37.6	14.6	8.35
			21° 44.807 E					
30/03/05	<b>Σταθμός 7.3</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 18.572 N	-68.4	45.9	37.9	14.8	8.40
			21° 44.807 E					

Πίνακας 7.15: Χαρακτηριστικά των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο σταθμό 7 του Πατραϊκού κόλπου

Ημερομηνία	30/03/05					
Περιοχή	Πατραϊκός Κόλπος					
Συντεταγμένες	38° 18.572 N					
	21° 44.807 E					
Πορώδες (μm)	1		1		1	
Αριθμός φίλτρου	18α	18β	19α	19β	17α	17β
Βάρος φίλτρου πριν τη διαβροχή (g)	167.34	140.13	146.18	146.35	129.78	150.15
Βάρος φίλτρου μετά τη διαβροχή (g)	171.73	144.15	150.43	150.55	134.07	154.13
Απόβαρο (g)	4.39	4.02	4.25	4.20	4.29	3.98
Κορεσμός %	97.2	88.8	94.2	93.0	94.8	88.1
	<b>Σταθμός 7.1</b>		<b>Σταθμός 7.2</b>		<b>Σταθμός 7.3</b>	
Όγκοι [V <sub>a</sub> ,V <sub>b</sub> ] (ml)	15918	15965	15966	16069	16069	16181
Τελικός Όγκος (ml)	47		103		112	
Συγκεντρώσεις Φίλτρων	2.66 mM		2.66 mM		2.66 mM	
Ενεργότητα Φίλτρων (Bq m <sup>-3</sup> )	A <sub>1</sub> = 2.8 ± 0.6	A <sub>2</sub> = 1.5 ± 0.4	A <sub>1</sub> = 3.5 ± 0.2	A <sub>2</sub> = 0.6 ± 0.2	A <sub>1</sub> = 3.8 ± 0.2	A <sub>2</sub> = 0.5 ± 0.1
	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.54		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.17		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.12	
Τελική Ενεργότητα (Bq m <sup>-3</sup> )	A <sub>total</sub> = 6.1 ± 0.6		A <sub>total</sub> = 4.2 ± 0.3		A <sub>total</sub> = 4.3 ± 0.4	



Εικόνα 7.16: Κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας, αλατότητας και pH στο σταθμό 7

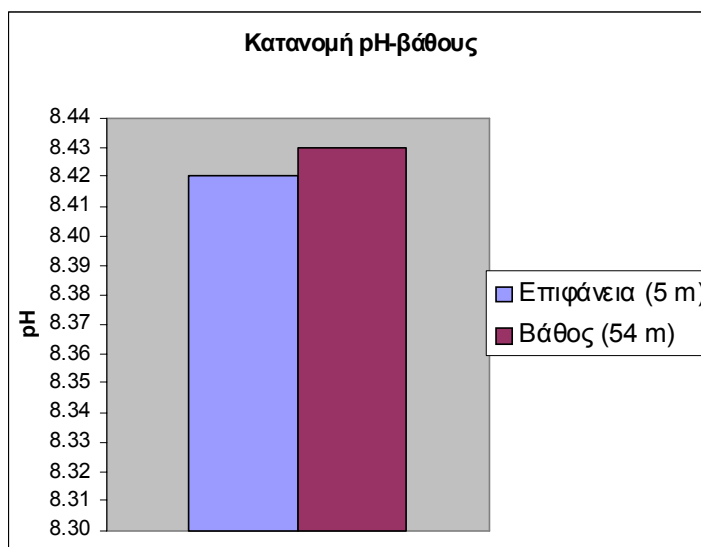
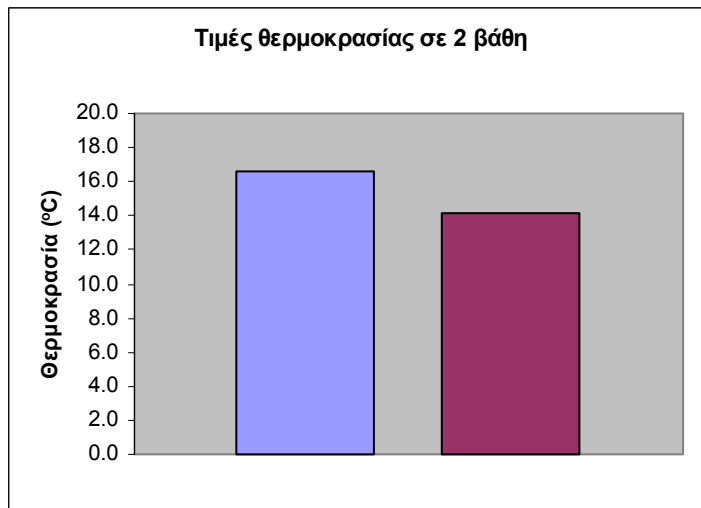
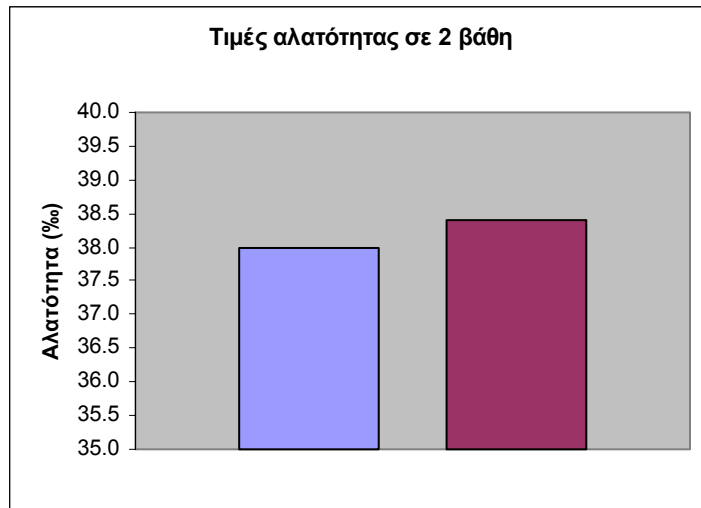


Εικόνα 7.17: Κατακόρυφη κατανομή πυκνότητας και  $^{137}\text{Cs}$  στο σταθμό 7 – Διαφοροποίηση συγκέντρωσης ενεργότητας σε σχέση με την αλατότητα

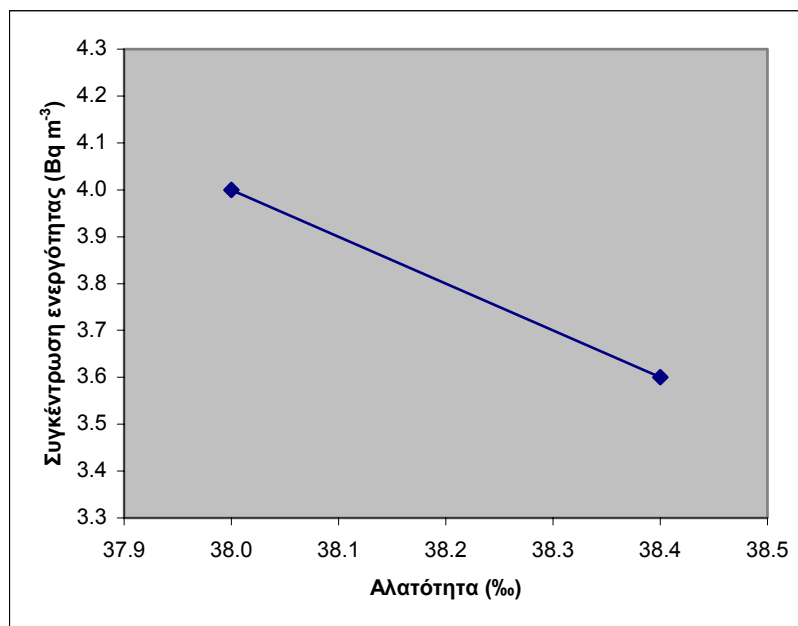
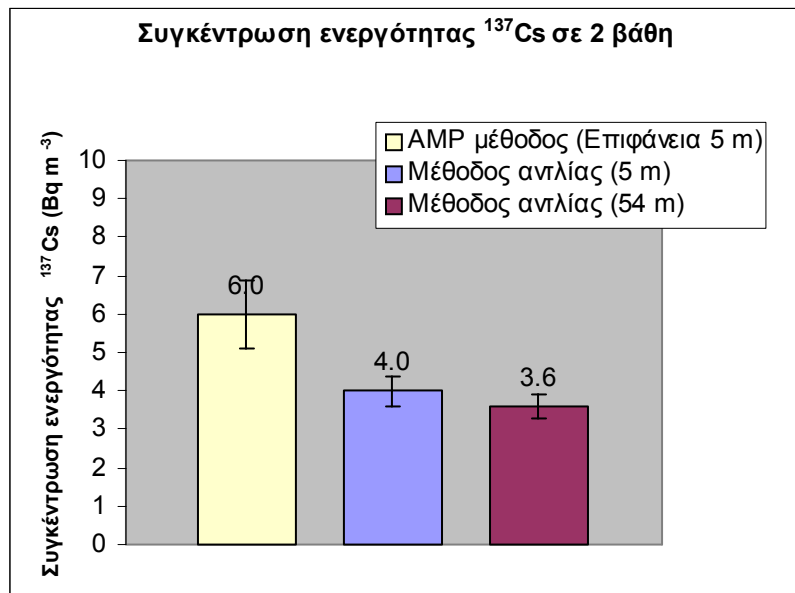
Πίνακας 7.16: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων του σταθμού 8 του Πατραϊκού κόλπου και χαρακτηριστικά των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν

Ημερομηνία		Περιοχή	Συντεταγμένες	Βάθος Δειγματοληψίας (m)	Αγωγιμότητα (mS cm <sup>-1</sup> )	Αλατότητα (‰)	Θερμοκρασία (°C)	pH
31/03/05	<b>Σταθμός 8.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 11.854 N 21° 34.490 E	-5.0	47.8	38.0	16.6	8.4 2
31/03/05	<b>Σταθμός 8.2</b>	Πατραϊκός Κόλπος	38° 11.854 N 21° 34.490 E	-50.4	45.6	38.4	14.1	8.4 3

<b>Ημερομηνία</b>	31/03/05			
<b>Περιοχή</b>	Πατραϊκός Κόλπος			
<b>Συντεταγμένες</b>	38° 11.854 N 21° 34.490 E			
<b>Πορώδες (μm)</b>	1		1	
<b>Αριθμός φίλτρου</b>	20α	20β	21α	21β
<b>Βάρος φίλτρου πριν τη διαβροχή (g)</b>	155.56	144.65	133.34	161.81
<b>Βάρος φίλτρου μετά τη διαβροχή (g)</b>	159.86	148.63	137.54	165.92
<b>Απόβαρο (g)</b>	4.30	3.98	4.20	4.11
<b>Κορεσμός %</b>	95.2	88.1	92.9	90.8
	<b>Σταθμός 8.1</b>		<b>Σταθμός 8.2</b>	
<b>Όγκοι [V<sub>a</sub>, V<sub>b</sub>] (ml)</b>	16617	16689	16690	16866
<b>Τελικός Όγκος (ml)</b>	72		176	
<b>Συγκεντρώσεις Φίλτρων</b>	2.66 mM		2.66 mM	
<b>Ενεργότητα Φίλτρων (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	A <sub>1</sub> = 2.8 ± 0.4	A <sub>2</sub> = 0.8 ± 0.2	A <sub>1</sub> = 2.4 ± 0.2	A <sub>2</sub> = 0.8 ± 0.2
	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.30		A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> = 0.33	
<b>Τελική Ενεργότητα (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	A <sub>total</sub> = 4.0 ± 0.4		A <sub>total</sub> = 3.6 ± 0.32	



Εικόνα 7.18: Κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας, αλατότητας και pH στο σταθμό 8



Εικόνα 7.19: Κατακόρυφη κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  στο σταθμό 8 – Διαφοροποίηση συγκέντρωσης ενεργότητας σε σχέση με την αλατότητα

Όσον αφορά στην οριζόντια διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  οι τιμές στα επιφανειακά ύδατα του Πατραϊκού κόλπου κυμαίνονται από 3.7 - 6.4 Bq m<sup>-3</sup>. Σε σχέση με τις παρατηρούμενες στην περιοχή τιμές του Σεπτεμβρίου 2004 παρατηρείται αύξηση. Το γεγονός αυτό εξηγείται με βάση την παραδοχή των έντονων επιδράσεων από την ξηρά, εξαιτίας της εποχής δειγματοληψίας (Μάρτιος 2005), η οποία συνοδευόταν από έντονες απορροές. Στο τέλος της ψυχρής περιόδου οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται στους περιφερειακούς σταθμούς και ειδικότερα στα σημεία εκροής του Γλαύκου ποταμού (σταθμός 5, νότιος Πατραϊκός κόλπος), καθώς και στο σταθμό 8, ο οποίος γειτνιάζει με την ξηρά. Αυτό οφείλεται από τη μια στις έντονες απορροές, που παρατηρούνται σε εκείνο το σημείο του έτους, από την άλλη στη μεταφορά φορτίου από την ξηρά, ως αποτέλεσμα καιρικών φαινομένων.

Όσον αφορά στην κατακόρυφη κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  στο κέντρο του Πατραϊκού κόλπου (σταθμός 2) παρατηρείται υψηλότερη θερμοκρασία στην επιφανειακή στοιβάδα, εξαιτίας της ηλιοφάνειας, η οποία επικρατούσε τις ημέρες της δειγματοληψίας στην περιοχή (Εικόνα 7.6). Εξαιτίας του ότι η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στο τέλος της ψυχρής περιόδου του έτους, οπότε υπάρχει η επίδραση των έντονων κλιματολογικών φαινομένων, η αλατότητα στην επιφανειακή στοιβάδα είναι μειωμένη (Εικόνα 7.6). Η συγκέντρωση ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  στην επιφανειακή στοιβάδα είναι μειωμένη και αυξάνεται σε σχέση με το βάθος (Εικόνα 7.7). Αυτό μπορεί να οφείλεται σε α) μεταφορά επιφανειακών σε χαμηλότερα βάθη, λόγω των ρευμάτων της περιοχής, β) σε επαναιώρηση  $^{137}\text{Cs}$  από τα ιζήματα και γ) σε βιολογικές δράσεις (νυχθημερη η/και εποχιακή δράση του πλαγκτού, περιπτώματα βενθοπελαγικών οργανισμών, θάνατοι οργανισμών).

Στο σταθμό 3 παρατηρείται υψηλή θερμοκρασία στην επιφάνεια και χαμηλή στη βαθύτερη στοιβάδα, πιθανόν εξαιτίας της ηλιοφάνειας (Εικόνα 7.8). Η αλατότητα παρουσιάζει αντίστροφη διαφοροποίηση με τη θερμοκρασία σε σχέση με το βάθος με χαμηλές τιμές στα επιφανειακά ύδατα και αύξηση ανάλογη με το βάθος (Εικόνα 7.8). Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  κατανέμονται σε σχέση με το βάθος, όπως ακριβώς και η αλατότητα με υψηλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (Εικόνα 7.9). Αυτό μπορεί να οφείλεται σε αβιοτικούς η/και βιολογικούς παράγοντες (μεταναστεύσεις πλαγκτού, οργανική ύλη - χουμικά συστατικά προερχόμενα από οργανισμούς, σε συνδυασμό με τα ρεύματα της περιοχής).

Στο σταθμό 4 η θερμοκρασία είναι υψηλή στην επιφανειακή στοιβάδα και μειώνεται όσο αυξάνει το βάθος, όπως ακριβώς και η αλατότητα (Εικόνα 7.11). Ομοίως, αυξημένη τιμή παρατηρείται και για το  $^{137}\text{Cs}$  στην επιφάνεια σε σχέση με την τιμή στο τελικό βάθος, ενώ ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης τείνει στη μονάδα (Εικόνα 7.11). Το γεγονός

αυτό μπορεί να εξηγηθεί πιθανότατα με βάση το γεγονός της γειννίασης του σταθμού με την ξηρά. Οι έντονες απορροές από την ξηρά το χειμώνα σε συνδυασμό με τα μικρότερα ρεύματα, που επικρατούν στο σταθμό 4 (περιφερειακός σταθμός) καθιστούν τις επιφανειακές τιμές της συγκέντρωσης ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  ελαφρώς υψηλότερες.

Στους σταθμούς 5 και 6 παρατηρείται η ίδια κατάσταση ως προς τη θερμοκρασία (Εικόνα 7.12 και Εικόνα 7.14) και τη συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$ , με τις υψηλότερες τιμές να παρατηρούνται στην επιφανειακή στοιβάδα (Εικόνα 7.13 και Εικόνα 7.15). Οι δυο σταθμοί βρίσκονται στις εκβολές του Γλαύκου ποταμού, με το σταθμό 6 να γειννιάζει πιο άμεσα, γεγονός το οποίο φαίνεται στην μειωμένη αλατότητα των επιφανειακών υδάτων του σταθμού (Εικόνα 7.14)

Ο σταθμός 7, ο οποίος βρίσκεται κοντά στη ζεύξη Ρίου - Αντιρρίου, παρουσιάζει μια διαφορετική κατάσταση. Η θερμοκρασία είναι υψηλή στην επιφάνεια, λόγω της έντονης ηλιοφάνειας, και μειώνεται με το βάθος (Εικόνα 7.16). Η αλατότητα φυσιολογικά είναι μειωμένη στην επιφάνεια, εξαιτίας της μεσολάβησης της ψυχρής περιόδου του έτους, αλλά κι εξαιτίας των έντονων ρευμάτων και ανέμων στη περιοχή, που προκαλούν ισχυρή ανάμιξη των επιφανειακών υδάτων (Εικόνα 7.16). Οι συγκεντρώσεις του  $^{137}\text{Cs}$  παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένες στη περιοχή, σε όλα τα βάθη, σε σχέση με άλλους σταθμούς του Πατραϊκού κόλπου (Εικόνα 7.17). Αυτό μάλλον είναι αποτέλεσμα των διεργασιών κατασκευής της γέφυρας. Κατά την κατασκευή των πυλώνων της γέφυρας μεταφέρονται οικοδομικά υλικά από την ξηρά. Μέρος των επιβαρυμένων σε  $^{137}\text{Cs}$  υλικών αναδιαλύεται στο νερό, με αποτέλεσμα να υπάρξει περαιτέρω επίδραση.

Ο σταθμός 8 δεν παρουσιάζει καμιά ιδιαιτερότητα με αυξημένη θερμοκρασία στην επιφάνεια, η οποία μειώνεται σε σχέση με το βάθος και χαμηλή αλατότητα, η οποία αυξάνεται σε σχέση με το βάθος. Αντίθετα με την αλατότητα, η συγκέντρωση ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  είναι αυξημένη στην επιφανειακή στοιβάδα και μειώνεται σε βάθος (Εικόνα 7.18), μάλλον εξαιτίας της γειννίασης του σταθμού 8 με την ξηρά.

Σε σύγκριση με τη βιβλιογραφία υπάρχει σύγκλιση στη μορφοποίηση της κατανομής του  $^{137}\text{Cs}$ , με τις τιμές γενικά να παρουσιάζονται αυξημένες στην επιφανειακή στοιβάδα και να μειώνονται σε σχέση με το βάθος κάτω από το θερμοκλινές<sup>54 109</sup>.

Πίνακας 7.17: Ενδεικτικές τιμές συγκέντρωσεων ενεργότητας <sup>137</sup>Cs στο θαλάσσιο περιβάλλον με βάση την πρόσφατη βιβλιογραφία

Έτος	Περιοχή	Μέση συγκέντρωση <sup>137</sup> Cs (Bq m <sup>-3</sup> )	SD	Αναφορά
2002 1998	Μ. Θάλασσα	18.29 (1) 30 (2)	2.14	1. Gulin, S.B., Stokozov, N.A., <i>J. Environ. Radioact.</i> , <b>2005</b> , in press <sup>110</sup> . 2. Egorov, V.N., Povinec, P.P., Polikarov, G.G., Stokozov, N.A., Gulin, S.B., Kulebakina, L.G. & Osvath I., <i>J. Environ. Radioact.</i> , <b>1999</b> , <b>43</b> , 137-155 <sup>111</sup> .
1999	Β. Αιγαίο Πέλαγος	13.3	1.3	Φλώρου Ε., Π. Κρητίδης, Χ. Χαλούλου, 'Εκτίμηση ραδιολογικής κατάστασης του Θερμικού κόλπου: Πηγές – Διασπορά - Βιοδείκτες παρακολούθησης', 1ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη, 2002.
2002	Ν. Ιόνιο Πέλαγος	1.96	0.26	Gulin, S.B., Stokozov, N.A., <i>J. Environ. Radioact.</i> , 2005, in press.
2003	Πατραϊκός κόλπος	13.5	1.1	ERL unpublished data <sup>112</sup>
1993	Κυπριακό Πέλαγος	9	3	Radiation Protection 70, Marina-Med Project, EUR 15564 EN, <b>1994</b> .
1995	Θάλασσα Λεβαντίνης	3.5		Papucci, C., Delfanti, R., <i>Sci. Total Envir.</i> , <b>1999</b> , <b>237/238</b> , 67-75.
1995	Λυβικό Πέλαγος	3.3		Papucci, C., Delfanti, R., <i>Sci. Total Envir.</i> , <b>1999</b> , <b>237/238</b> , 67-75.
1991	Αδριατική Θάλασσα	5,5	1.2	Radiation Protection 70, Marina-Med Project, EUR 15564 EN, <b>1994</b> <sup>113</sup> .
1991	Τυρρηνική Θάλασσα	4.0	0.2	Radiation Protection 70, Marina-Med Project, EUR 15564 EN, <b>1994</b> .
1991	Θάλασσα Αλγερίας	4.2	0.1	Radiation Protection 70, Marina-Med Project, EUR 15564 EN, <b>1994</b> .
1990	Θάλασσα Λιγουρίας	6.5	2.3	Radiation Protection 70, Marina-Med Project, EUR 15564 EN, <b>1994</b> .
1988	Στενό Λυόν	4.0	2.0	Radiation Protection 70, Marina-Med Project, EUR 15564 EN, <b>1994</b> .
1991	Θάλασσα Αλμποραν	3.9		Radiation Protection 70, Marina-Med Project, EUR 15564 EN, <b>1994</b> .
1999	Στενό Γιβραλτάρ	1.51 2.28	0.19 0.29	Gasco, C., Anton, M.P., Delphanti, R., Gonzalez, A.M., Meral, J., Papucci, C., <i>J. Environ. Radioact.</i> , <b>2002</b> , <b>62</b> , 241-262 <sup>114</sup> .
2003	Βαλτική Θάλασσα	47.7	1.0	Helsinki Commission Project Group for Monitoring of Radioactive Substances in the Baltic Sea (MORS), Ninth Meeting, Tallinn, Estonia, 1-3 June <b>2004</b> <sup>115</sup> .
2001	Ασιατική πλευρά Ειρηνικού	3.0	1.2	Duran, E.B., Povinec, P.P., Fowler, S.W., Airey, P.L., Hong, G.H., <i>J. Environ. Radioact.</i> , <b>2004</b> , <b>76</b> , 139-160 <sup>116</sup> .
2002	Β. Ατλαντικός	1.25	0.24	Gulin, S.B., Stokozov, N.A., <i>J. Environ. Radioact.</i> , <b>2005</b> , in press.
2002	Ν. Ατλαντικός	0.95	0.22	Gulin, S.B., Stokozov, N.A., <i>J. Environ. Radioact.</i> , <b>2005</b> , in press.

Πίνακας 7.18: Σύγκλιση των δυο μεθόδων προσδιορισμού <sup>137</sup>Cs

Ημερομηνία		Περιοχή	Συγκέντρωση ενεργότητας (AMP) (Bq m <sup>-3</sup> )	Συγκέντρωση ενεργότητας (Pre-conc.) (Bq m <sup>-3</sup> )	Διαφορά (%)	Λόγος A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub>
28/09/2004	<b>Σταθμός 2.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	3.5 ± 0.5	3.6 ± 0.2	3	0.50
31/03/2005	<b>Σταθμός 2.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	4.2 ± 0.5	4.2 ± 0.4	0	0.26
30/03/2005	<b>Σταθμός 3.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	4.0 ± 0.6	4.0 ± 0.3	0	0.37
30/03/2005	<b>Σταθμός 4.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	3.8 ± 0.4	4.4 ± 0.5	15	0.23
31/03/2005	<b>Σταθμός 5.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	6.4 ± 0.6	8.7 ± 0.7	25	0.85
31/03/2005	<b>Σταθμός 6.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	3.7 ± 0.5	4.4 ± 0.5	15	0.33
30/03/2005	<b>Σταθμός 7.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	4.3 ± 0.3	6.1 ± 1.0	35	0.54
31/03/2005	<b>Σταθμός 8.1</b>	Πατραϊκός Κόλπος	6.0 ± 0.9	4.0 ± 0.4	34	0.30
<b>MEAN ± SD</b>					<b>107 ± 20</b>	

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 8.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η μέθοδος της “επι τόπου” προ-συγκέντρωσης  $^{137}\text{Cs}$  με χρήση αντλίας δειγματοληψίας μεγάλου όγκου πλεονεκτεί έναντι της συμβατικής AMP στα εξής:
  - a) Δεν απαιτείται η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ύδατος στο εργαστήριο για ραδιοχημική ανάλυση, αλλά μόνο των φίλτρων.
  - b) Η επεξεργασία, η οποία ακολουθεί στο εργαστήριο, είναι απλούστερη σε σχέση με τη ραδιοχημική επεξεργασία, η οποία απαιτείται στη μέθοδο AMP.
  - c) Η μέθοδος “επι τόπου” προ-συγκέντρωσης  $^{137}\text{Cs}$  με χρήση αντλίας επιτρέπει την αύξηση του όγκου του δείγματος έως κορεσμού των φίλτρων. Ο μέγιστος όγκος του δείγματος για τα συγκεκριμένα φίλτρα θεωρητικά ανέρχεται σε  $10000\text{ m}^3$ , ενώ πειραματικά έχει βρεθεί ότι φιλτράρονται μέχρι  $1\text{ m}^3$  σε 1 h. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  να ανέρχεται σε επίπεδα, τα οποία επιτρέπουν πολύ καλή στατιστική μέτρησης σε σχέση με το οριο ανίχνευσης (LLD) της γ- φασματομετρίας.
2. Η μέθοδος της “επι τόπου” προ-συγκέντρωσης  $^{137}\text{Cs}$  με χρήση αντλίας δειγματοληψίας μεγάλου όγκου παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:
  - a) Το κόστος, το οποίο συνοδεύει τη χρήση της συσκευής, είναι υψηλό, εξαιτίας των χρησιμοποιούμενων αναλώσιμων (ειδικών φίλτρων, μπαταριών, αντλίας).
  - b) Απαιτείται προεπεξεργασία για τη δειγματοληψία, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην AMP μέθοδο συγκαταβύθισης. Σε έκτακτα ραδιολογικά περιστατικά δεν είναι τόσο εύχρηστη, λόγω του ότι απαιτείται ειδικευμένο προσωπικό για τη δειγματοληψία.
3. Όπως προκύπτει από δείγματα, τα οποία ελήφθησαν από επιλεγμένους σταθμούς δειγματοληψίας και με τις δυο μεθόδους, η παρατηρούμενη σύγκλιση της μεθόδου “επι τόπου” προσυγκέντρωσης με αντλία μεγάλου όγκου με τη συμβατική AMP μέθοδο είναι υψηλή, με μέση διαφορά στις τελικές τιμές της τάξεως του 7 %.

## 8.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

1. Όπως προκύπτει από τη δοκιμή των φίλτρων – παγίδων τα βιομηχανικά φίλτρα (κατασκευασμένα από την εταιρία Challenger Oceanic) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ελλαδικό υδάτινο περιβάλλον, λόγω του μεγάλου σφάλματος στην κατακράτηση  $^{137}\text{Cs}$ , που παρουσιάζουν. Επομένως, η εργαστηριακή παρασκευή φίλτρων είναι απαραίτητη, δεδομένου του διαφορετικού πορώδους.
2. Με βάση τη δοκιμή προτύπων διαλυμάτων (συγκέντρωσης ενεργότητας  $^{134}\text{Cs}$ : 4, 6, 8 Bq  $\text{m}^{-3}$ ) σε προ-κατασκευασμένα στο εργαστήριο φίλτρα, η ανάκτηση των φίλτρων είναι υψηλή, με μέση τιμή  $90 \pm 6 \%$ .
3. Όπως προκύπτει από τη δοκιμή “τυφλού πειράματος” (blank) στα εργαστηριακά παρασκευασμένα φίλτρα, το όριο ανίχνευσης (LOD) της μεθόδου “επι τόπου” προσυγκέντρωσης είναι χαμηλό, 0.3 Bq  $\text{m}^{-3}$  (ανεξαρτήτως του όγκου που πέρασε από τα φίλτρα) σε σχέση με την παρατηρούμενη συγκέντρωση ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  σε πραγματικά περιβαλλοντικά δείγματα.

## 8.3 ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

1. Οι τιμές στον Κρυσσαίο κόλπο είναι συγκρίσιμες με εκείνες περιοχών ημικλειστών κόλπων και κυμαίνονται από 3 – 5 Bq  $\text{m}^{-3}$ . Γενικά οι τιμές αυτές κατανέμονται στο κατώτερο επίπεδο του φάσματος τιμών περιοχών ημικλειστών κόλπων, όπου έχουν καταγραφεί τιμές έως και 4 φορές υψηλότερες. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η επίδραση της γειτνιάζουσας ξηράς είναι μικρή, λόγω πιθανόν της εποχής δειγματοληψίας (θερινή περίοδος, σε σχέση με την χειμερινή, η οποία συνοδεύεται από μεταφορά φορτίου από την ξηρά, μέσω καιρικών διεργασιών).
2. Οι επιφανειακές τιμές στον Πατραϊκό κόλπο είναι χαμηλές στο τέλος της θερμής περιόδου και κυμαίνονται από 2.2 – 3.5 Bq  $\text{m}^{-3}$  ανάλογα με το σταθμό δειγματοληψίας. Από τις μικρές διακυμάνσεις των τιμών της επιφανειακής στοιβάδας του Πατραϊκού κόλπου φαινεται η ομοιογένεια, η οποία υπάρχει στην περιοχή. Μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στο κέντρο του κόλπου. Αυτό ίσως είναι αποτέλεσμα των κυκλικών θαλασσιών ρευμάτων, τα οποία παρατηρούνται στην περιοχή, γεγονός που οδηγεί στη συσσώρευση ρύπων στο κέντρο του κόλπου.

3. Στο τέλος της ψυχρής περιόδου παρατηρείται μια εντελώς διαφορετική κατάσταση με τις τιμές να κυμαίνονται από 3.7 – 6.4 Bq m<sup>-3</sup>, ανάλογα με το σταθμό δειγματοληψίας. Το γεγονός αυτό εξηγείται με βάση την παραδοχή των έντονων επιδράσεων από την ξηρά, εξαιτίας της εποχής δειγματοληψίας (Μάρτιος 2005), η οποία συνοδευόταν από έντονες απορροές. Στο τέλος της ψυχρής περιόδου οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται στους περιφερειακούς σταθμούς και ειδικότερα στα σημεία εκροής του Γλαύκου ποταμού (σταθμός 5, νότιος Πατραϊκός κόλπος), καθώς και στο σταθμό 8, ο οποίος γεινιάζει με την ξηρά. Αυτό οφείλεται από τη μια στις έντονες απορροές, που παρατηρούνται σε εκείνο το σημείο του έτους, από την άλλη στη μεταφορά φορτίου από την ξηρά, ως αποτέλεσμα καιρικών φαινομένων.
4. Όσον αφορά στην κατακόρυφη κατανομή του <sup>137</sup>Cs, υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στην επιφανειακή στοιβάδα και μειώνονται όσο το βάθος αυξάνει. Στους σταθμούς 2 και 3 (κεντρικός και ανατολικός Πατραϊκός κόλπος) παρατηρείται ασυνέχεια στην κατακόρυφη κατανομή. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε αβιοτικούς η/και βιολογικούς παράγοντες (μεταναστεύσεις πλαγκτού, οργανική ύλη - χουμικά συστατικά προερχόμενα από οργανισμούς, σε συνδυασμό με τα ρεύματα της περιοχής).

#### 8.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

1. Η μέθοδος της “επι τόπου” προσυγκέντρωσης με αντλία μεγάλου όγκου μπορεί μελλοντικά να επεκταθεί σε προσδιορισμούς φυσικών ραδιονουκλιδίων, κυρίως των ισοτόπων του ουρανίου, με επιλογή των κατάλληλων ιοντο-ανταλλακτικών μέσων.
2. Επιπλέον, είναι δυνατό να γίνει επέκταση της μεθόδου της “επι τόπου” προσυγκέντρωσης με αντλία μεγάλου όγκου σε προσδιορισμό συμβατικών ρύπων. Για παράδειγμα με εφαρμογή κατάλληλων παγίδων στην αντλία δειγματοληψίας (πχ. ρητινών) είναι δυνατός ο προσδιορισμός βαρέων μετάλλων. Επίσης, υπάρχουν προδιαγραφές της επέκτασης της μεθόδου της “επι τόπου” προσυγκέντρωσης για προσδιορισμό οργανικών ουσιών στο θαλάσσιο περιβάλλον, ρύπων που βρίσκονται σε ίχνη.

Τέλος, η μέθοδος “επι τόπου” προσυγκέντρωσης με τη χρήση αντλίας μπορεί να κωδικοποιηθεί και να αποτελέσει εργαλείο για προσανατολισμένη και εφαρμοσμένη μελέτη στα υδάτινα οικοσυστήματα, σε ευρύ φάσμα ρύπων.

## 9 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

### Διασπορά και κατανομή $^{137}\text{Cs}$ στην υδάτινη στήλη του Κορινθιακού και Πατραϊκού κόλπου: Προσδιορισμός συγκεντρώσεων ενεργότητας με δυο μεθόδους

Νικόλαος Κ. Ευαγγελίου

*Ερευνητική Εργασία Διπλώματος Ειδίκευσης στη Χημεία και Τεχνολογία Περιβάλλοντος  
υποβληθείσα στο Τμήμα Χημείας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών,  
Μάιος 2005*

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων ενεργότητας του ραδιονουκλιδίου  $^{137}\text{Cs}$  στο θαλάσσιο περιβάλλον των περιοχών του Κορινθιακού και Πατραϊκού κόλπου με δυο μεθοδολογίες, συγκριτικά. Η πρώτη είναι η συμβατική μέθοδος – AMP (Ammonium Molybdophosphate,  $(\text{NH}_4)_3\text{P}(\text{Mo}_3\text{O}_{10})_4$ ), η οποία είναι ραδιοχημική επεξεργασία, βασιζόμενη στη συγκαταβύθιση του  $^{137}\text{Cs}$  με μικροκρυσταλλικό AMP, χρησιμοποιώντας  $^{134}\text{Cs}$  ως φορέα και ιχνηθέτη απόδοσης (yield tracer). Η άλλη μέθοδος βασίζεται στην επί τόπου (*in situ*) προσυγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  με τη χρήση φυγοκεντρικής αντλίας μεγάλου όγκου (Mark III Centrifugal Pump, Challenger Oceanic, England). Η αντλία, η λειτουργία της οποίας περιγράφεται αναλυτικά, αποτελείται από τον κινητήρα, 4 καλύμματα φίλτρων (τα οποία περιέχουν προ-επεξεργασμένα – εμποτισμένα φίλτρα), το ροόμετρο και το σωλήνα πίεσης, ο οποίος περιέχει τις μπαταρίες και τον πίνακα ελέγχου. Ο εμποτισμός των φίλτρων (impregnation) πραγματοποιείται στο εργαστήριο, με τη χρήση ειδικής διάταξης, κατάλληλα σχεδιασμένης ώστε το διάλυμα του ιοντο – ανταλλάκτη να περνά εξαναγκασμένα διαμέσου των φίλτρων. Μετά τον εμποτισμό, τα φίλτρα είναι έτοιμα για σχετική δειγματοληψία στο πεδίο. Μετά την δειγματοληψία, τα φίλτρα μεταφέρονται στο εργαστήριο και αφήνονται για ξήρανση και αποτέφρωση σε ειδικούς κλιβάνους.

Και στις δυο μεθόδους ακολουθείται μεταφορά των τελικών προϊόντων της επεξεργασίας (εργαστηριακού ιζήματος και στάχτης, αντίστοιχα) σε ειδικά κυάθια μέτρησης (white cup, ύψους 68 mm, διαμέτρου 200 mm με διάφανο κάλυμμα από Plexiglas 4 mm) για γ- φασματομετρία. Πραγματοποιείται μέτρηση σε γ- φασματομετρική διάταξη, η οποία αποτελείται από ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (Hp Ge detector) σχετικής απόδοσης 90 % (σε σχέση με ανιχνευτή NaI 3 x 3 inch) και ανάλυσης 2.1 keV στα 1.33 MeV (φωτοκορυφή  $^{60}\text{Co}$ ). Ο ανιχνευτής συνδέεται με πολυκαναλικό αναλυτή (Canberra Genie 2000) 16000 καναλιών και συνοδεύεται από πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (Canberra Genie

2000). Η βαθμονόμηση της ενέργειας γίνεται σε μια περιοχή 2000 keV σε 8000 κανάλια (0.25 keV/ch).

Για τη διασφάλιση της ποιότητας των αποτελεσμάτων παρασκευάζονται 6 πρότυπα διαλύματα  $^{134}\text{Cs}$  (2 σε κάθε συγκέντρωση) με παραπλήσιες συγκεντρώσεις με αυτές του  $^{137}\text{Cs}$  στη θάλασσα (4, 6, 8 Bq m<sup>-3</sup>). Τα εμποτισμένα (έτοιμα προς χρήση) φίλτρα εμβαπτίζονται στα πρότυπα διαλύματα κι εφαρμόζεται εξαναγκασμένη ροή αυτών. Ακολούθως, τα φίλτρα στεγνώνονται, αποτεφρώνονται και μετρώνται με γ-φασματομετρία. Η διαδικασία αυτή γίνεται για να υπολογιστεί η ανάκτηση της μεθόδου. Τέλος, δυο φίλτρα (έτοιμα προς χρήση), αφού αποτεφρωθούν μετρώνται με γ-φασματομετρία για να υπολογιστεί το όριο ανίχνευσης της μεθόδου και το ποσοστό επιμόλυνσης των φίλτρων από τις εργαστηριακές συνθήκες και τα χρησιμοποιούμενα αντιδραστήρια.

Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 3 ερευνητικές πλόες στο θαλάσσιο περιβάλλον της ευρύτερης περιοχής του Κορινθιακού και Πατραϊκού κόλπου. Συγκεκριμένα, έγινε 1 πλόα για δειγματοληψίες στον Κρισσαίο κόλπο, ο οποίος αποτελεί τμήμα του Κορινθιακού, και 2 στον Πατραϊκό κόλπο και συλλέχθηκαν 15 δείγματα για την AMP μέθοδο και 23 (46 φίλτρα) για τη μέθοδο της επί τόπου προσυγκέντρωσης  $^{137}\text{Cs}$  με αντλία μεγάλου όγκου. Οι δυο μέθοδοι αξιολογήθηκαν από τα κοινά αποτελέσματα. Ως μέθοδος αναφοράς χρησιμοποιήθηκε η AMP συμβατική ραδιοχημική μέθοδος, δεδομένου ότι αποτελεί βιβλιογραφικά κατοχυρωμένη μεθοδολογία με αναφερόμενη απόδοση προσδιορισμού ραδιονουκλιδίων στα υδάτινα οικοσυστήματα  $98 \pm 4 \%$ . Η μέση διαφορά στις τελικές τιμές των δυο μεθόδων είναι 7 %.

Η οριζόντια διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  την θερμή περίοδο του έτους (Ιούλιος 2004) στην περιοχή του Κρισσαίου κόλπου κυμαίνεται από 3 – 5 Bq m<sup>-3</sup>, ανάλογα με το σταθμό δειγματοληψίας. Η αντίστοιχη διασπορά στο τέλος της θερμής περιόδου (Σεπτέμβριος 2004) στον Πατραϊκό κόλπο είναι 2 – 4 Bq m<sup>-3</sup>, ενώ στο τέλος της ψυχρής περιόδου (Μάρτιος 2005) κυμαίνεται από 3 – 7 Bq m<sup>-3</sup>. Με βάση τα αποτελέσματα, καταδεικνύεται μείωση της συγκέντρωσης ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  στην επιφανειακή στοιβάδα της περιοχής. Οι τιμές αυτές είναι απολύτως συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες για διάφορες περιοχές της Μεσογείου θαλάσσης (Πίνακας 7.17), καθώς και με τις επικρατούσες τιμές του ελλαδικού θαλασσίου περιβάλλοντος (Πίνακας 7.18). Για παράδειγμα, στο βόρειο Αιγαίο οι επιφανειακές τιμές είναι περίπου  $13.3 \pm 1.3$  Bq m<sup>-3</sup>, στην Αδριατική είναι περίπου 5.5 Bq m<sup>-3</sup> και στη θάλασσα της Λεβαντίνης 3.5 Bq m<sup>-3</sup>.

Όσον αφορά στην κατακόρυφη κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  στην υδάτινη στήλη (profile), εν γένει, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται στην επιφανειακή στοιβάδα και μειώνονται ανάλογα με το βάθος. Οι αποκλίσεις από το μοντέλο αυτό αξιολογούνται. Επιχειρείται, επίσης, η συσχέτιση των συγκεντρώσεων ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδάτων της περιοχής (αλατότητα, θερμοκρασία, pH). Ειδικά στο κέντρο του Πατραϊκού κόλπου (σταθμός 2, μεγίστου βάθους 125 m) μελετάται η

εποχιακή διακύμανση του  $^{137}\text{Cs}$  σε τρεις στοιβάδες της υδάτινης στήλης. Σε σχέση με τις τιμές της παγκόσμιας βιβλιογραφίας παρατηρείται σύγκλιση στις συγκεντρώσεις του  $^{137}\text{Cs}$ . Αυξημένες συγκεντρώσεις  $^{137}\text{Cs}$  παρατηρούνται στην επιφανειακή στοιβάδα, με μέγιστο στη ζώνη του θερμοκλινούς, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη παρατηρείται έντονη μείωση.

**Λέξεις κλειδιά:**  $^{137}\text{Cs}$ , ραδιονουκλίδια, Μεσόγειος θάλασσα, διασπορά ραδιονουκλιδίων

## 10 SUMMARY

### **<sup>137</sup>Cs dispersion and distribution in the water column of Corinthiakos and Patraikos gulf: Determination of activity concentrations using two methods**

**Nikolaos K. Evaggeliou**

*A course work for MSc specialization in Chemistry and Environmental Technology submitted to the Department of Chemistry of the National and Capodistrian University of Athens, May 2005*

The present study utilizes and compares two methods of determining the activity concentrations of the <sup>137</sup>Cs radionuclide in the aquatic environment of the Corinthiakos and Patraikos gulfs. The first is the conventional AMP method (Ammonium Molybdophosphate, (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>P(Mo<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)<sub>4</sub>), a radiochemical pretreatment based on co-precipitation of <sup>137</sup>Cs by the micro-crystalline AMP, using <sup>134</sup>Cs as carrier and yield tracer. The second method is based on pre-concentration of <sup>137</sup>Cs *in situ* using a high volume centrifugal pump (Mark III Centrifugal Pump, Challenger Oceanic, England). The pump, whose function is described in detail, is comprised of a motor (pump), four cartridge housings (containing the pretreated – impregnated filters), a flow meter and a pressure tube containing the battery pack and a control panel. The filter impregnation process is carried out in the laboratory using special instrumentation designed to pass the ion-exchanger's solution through the blank filters rapidly. Once the impregnation process is finished, the filters are ready to use for field sampling. After the sampling procedure the filters are transferred to the laboratory, where they are dried and ashed in special ovens.

In both methods, the final products (precipitate and ash, respectively) are transferred into special measurement pots (white cups of 68 mm height and 200 mm in diameter, with a 4 mm thick transparent Plexiglas cover) for gamma – spectrometry measurements. The procedure is carried out in a gamma – spectrometry system comprised of a high-purity Germanium detector (Canberra Coaxial HpGe Detector System) with a relative efficiency of 90% (comparing to 3 x 3 NaI detector) and resolution of 2.1 keV (Full Width at Half Maximum) at 1.33 MeV (photopeak <sup>60</sup>Co). The HpGe detector is connected to a 16000 – channel analyzer (Canberra Genie 2000) and the whole system is controlled using specialized software (Canberra Genie 2000). The energy calibration is performed using a range of 2000 keV in 8000 channels (0.25 keV/ch).

For validation of the *in situ* pre-concentration method, six standard solutions of  $^{134}\text{Cs}$  (2 for each concentration) with a concentration similar to that of  $^{137}\text{Cs}$  in seawater samples (4, 6, 8  $\text{Bq m}^{-3}$ ) are produced. The impregnated (ready-to-use) filters are submerged in the standard solutions and forced flux is applied. Afterwards, the filters are dried, ashed and measured by gamma – spectrometry. This procedure is performed in order to determine the recovery of the filters used in the method. Finally, 2 more ready-to-use filters are ashed and measured by gamma – spectrometry in order to estimate the low limit detection and the contamination rate due to the laboratory environment and the reagents used.

A total of three expeditions in the marine environment of Corinthiakos and Patraikos gulfs took place. Specifically, there was 1 expedition in the Corinthiakos gulf and 2 in the Patraikos gulf. A total of 15 samples for the AMP method and 23 samples (46 filters) for the *in situ* pre – concentration method were collected. Both methods were evaluated using the common results. The conventional AMP radiochemical method was used as a reference point, since it is widely accepted in the relevant literature with a reported yield of  $98 \pm 4 \%$  for determination of radionuclide concentration in marine environments. The calculated difference of the two methods' end values is 7 %.

The horizontal distribution of  $^{137}\text{Cs}$  during the warm period (July 2004) in Krissaiois gulf area ranges from 3 to 5  $\text{Bq m}^{-3}$  depending on the sampling station. Respectively, the distribution at the end of the warm period (September 2004) in Patraikos gulf is 2 – 4  $\text{Bq m}^{-3}$ , while at the end of the cold period (March 2005) it ranges from 3 to 7  $\text{Bq m}^{-3}$ . Sampling station number 6, located in the port of Patra, is used to study the seasonal variation of  $^{137}\text{Cs}$  from 2003 to 2005 in detail. The results show a decrease of  $^{137}\text{Cs}$  activity concentration in the surface layer of the area. These values are fully comparable to those measured in various areas of the Mediterranean sea (Πίνακας 7.17) and to those measured in the greek marine environment (Πίνακας 7.18). For example, the respective values in North Aegean Sea are approximately  $13.5 \pm 1.3 \text{ Bq m}^{-3}$ , whereas in the values lay at in Adriatic Sea approximately  $5.5 \text{ Bq m}^{-3}$ , and in the Levantine Basin they are  $3.5 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Regarding the vertical profile of  $^{137}\text{Cs}$  in the water column, high concentrations are observed in the upper layer, decreasing with the depth. Any deviations by this model are justified using the supporting data of the environmental parameters. Therefore an attempt is made to establish a connection between  $^{137}\text{Cs}$  activity concentrations and the physical – chemical characteristics of the marine area (salinity, temperature, pH). Considering the seasonal variation of  $^{137}\text{Cs}$ , the station 2 (maximum depth of 125 m) in Patraikos gulf has been selected and  $^{137}\text{Cs}$  is studied in the water column of tree layers. In general, the obtained data of this study are laid in the range of values found in the literature. It is noteworthy that increased  $^{137}\text{Cs}$  concentrations are observed in the upper layer, with

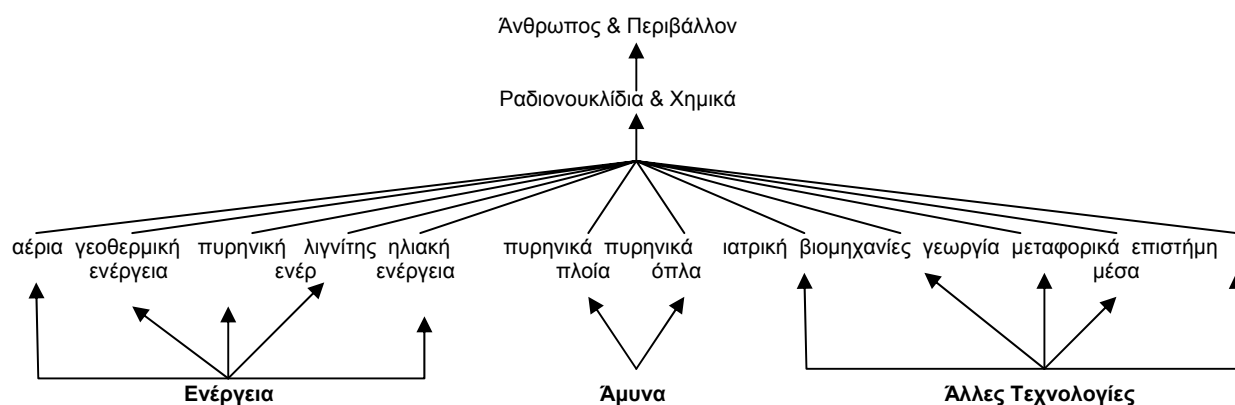
maximum values found in the thermohaline, while a drastic reduction in higher depths is noted.

**Keywords:**  $^{137}\text{Cs}$ , radionuclides, Mediterranean Sea, radionuclide distribution

## 11 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ

### 11.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ζωή έχει αναπτυχθεί σε φυσικά περιβάλλοντα ιοντίζουσας ακτινοβολίας, που βομβαρδίζονται ακατάπαυστα με κοσμικές ακτίνες και ακτινοβολίες πρωτογενών ραδιονουκλιδίων στην επιφάνεια της γης. Ωστόσο, η πανταχού παρούσα ακτινοβολία υποβάθρου έχει αυξηθεί αισθητά κατά τη διάρκεια των τελευταίων 30 και επιπλέον ετών, ως αποτέλεσμα δραστηριοτήτων του ανθρώπου, και έτσι έχουν εκφραστεί ανησυχίες για την ευημερία απανταχού των ειδών ζωής σε αυτή την επιπρόσθετη ακτινοβολία<sup>117</sup>. Η εξέλιξη της γνώσης και η αύξηση του πληθυσμού του ανθρωπίνου γένους έχουν οδηγήσει σε ουσιαστικές ανάγκες, η οποίες διαρκώς αυξάνονται και ουσιαστικά δημιουργούν αυτήν την ακτινοβολία. Συνοπτικά, αυτές είναι η ενέργεια, οι εξοπλισμοί και οι διάφορες τεχνολογίες που αναπτύσσονται κατά καιρούς<sup>118</sup> (Εικόνα 11.1).



Εικόνα 11.1: Οι τρεις κύριες κατηγορίες, οι δραστηριότητες των οποίων παράγουν ραδιενεργές ουσίες στο περιβάλλον

### 11.2 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ

Έχει περάσει σχεδόν ένας αιώνας από την ανακάλυψη του φαινομένου της ραδιενέργειας από τον Η. Becquerel το 1896. Από τότε οι αντιλήψεις που αφορούν στη δομή της ύλης έχουν αλλάξει σημαντικά. Το φαινόμενο της ραδιενέργειας παίζει σημαντικό ρόλο στην καθημερινή ζωή με τις ειρηνικές, όσο και με τις καταστροφικές χρήσεις του. Η σπουδαιότητα της έρευνας σε αυτό το πεδίο γίνεται προφανής, από το γεγονός ότι έχουν

απονεμηθεί 25 βραβεία Nobel (φυσικής και χημείας) για μελέτες που αφορούν στη ραδιοχημεία και την πυρηνική χημεία. Η έρευνα σήμερα στρέφεται στη βαθύτερη κατανόηση της πυρηνικής δομής, στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την εφαρμογή της, καθώς και στον πλήρη έλεγχο και την ανίχνευση της. Παρακάτω παρατίθενται οι σπουδαιότερες ανακαλύψεις στον τομέα της ραδιοχημείας και πυρηνικής φυσικής και γίνεται μια αναφορά στις τελευταίες εξελίξεις σε αυτό το πεδίο κατά τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα<sup>119</sup>.

### **11.2.1 Ανακάλυψη των ακτίνων-X (X-Rays)**

Το 1895 ο W. C. Rontgen ανακάλυψε τις ακτίνες-X με μια διάταξη σωλήνων καθοδικών ακτίνων. Αυτή αποτελούνταν από γυάλινο σωλήνα, σε κενό αέρος, που περιείχε δύο ηλεκτρόδια. Με εφαρμογή διαφοράς δυναμικού συνέβαινε εκπομπή ρεύματος ηλεκτρονίων από την κάθοδο (καθοδικές ακτίνες). Ο W. C. Rontgen παρατήρησε ότι οι καθοδικές ακτίνες όταν προσέκρουαν σε μεταλλικούς στόχους ήταν πολύ διεισδυτικές. Επίσης, μπορούσαν να μαυρίσουν φωτογραφική πλάκα, να προκαλέσουν φθορισμό σε κάποια ορυκτά και άλατα, συμπεριφορά που είχε ομοιότητες με εκείνη του ηλιακού φωτός.

### **11.2.2 Ανακάλυψη της ραδιενέργειας**

Το 1896 ο H. Becquerel μελέτησε το φθορισμό του θειικού καλίου του ουρανιού  $K_2UO_2(SO_4) \cdot 2H_2O$ . Τοποθέτησε κρυστάλλους του άλατος αυτού σε φωτογραφικές πλάκες που είχε επικαλύψει με αδιαφανή υλικά. Εξέθεσε τις πλάκες αυτές στο ηλιακό φως, οπότε άρχισαν να παρατηρούνται οι κρύσταλλοι. Δηλαδή, η ακτινοβολία φθορισμού, που οφειλόταν στην απορρόφηση του ηλιακού φωτός από τον κρύσταλλο διαπέρασε το αδιαφανές υλικό και μαύρισε την πλάκα. Κάνοντας το ίδιο σε σκοτεινό χώρο, ενώ περίμενε να δει ασθενή εικόνα των κρυστάλλων, αντί αυτού παρατήρησε έντονη εικόνα των κρυστάλλων<sup>120</sup>. Δήλωσε τότε ότι οι ακτινοβολίες πιθανόν να είναι άορατες, εκπέμπονται κατά το φωσφορισμό και ότι η διάρκεια εκπομπής τους είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή των ακτινοβολιών που εκπέμπονται από αυτές τις ουσίες. Ο H. Becquerel δεν είχε κατανοήσει εντελώς το φαινόμενο, το οποίο ήταν ασφαλώς το φαινόμενο της ραδιενέργειας του ουρανίου.

Το ζεύγος Curie το 1911 συνέχισε τη μελέτη των “ακτίνων Becquerel” και σε άλλα ορυκτά που παρουσίαζαν ακόμη μεγαλύτερη δραστικότητα. Πίστευαν ότι η δραστικότητα αυτή οφειλόταν σε άλλες ουσίες, εκτός των ήδη γνωστών Ουρανίου (U) και Θωρίου (Th). Έκαναν εκχυλίσεις στο ουρανιούχο μέταλλευμα πισσοουρανίτη κι απομόνωσαν ενεργό ουσία στο κλάσμα του Βισμούθιου (Bi), την οποία ονόμασαν Πολώνιο (Po) (από το όνομα της πατρίδας των Curie). Άλλες χημικές έρευνες σε ορυκτά του πισσοουρανίτη οδήγησαν

στην ανακάλυψη μια ουσίας στο κλάσμα του Βαρίου (Ba), την οποία ονόμασαν Ράδιο (Ra) και την παρατηρούμενη δραστικότητα ραδιενέργεια (radioactivity).

### **11.2.3 Ανακάλυψη των ακτίνων α-, β-, γ-**

Το 1903 οι E. Rutherford και F. Soddy χαρακτήρισαν τρεις τύπους ακτινοβολίας για τις ραδιενεργές εκπομπές. Οι ακτίνες α- έδειχναν να σκεδάζονται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία σε αντίθετη κατεύθυνση από τις καθοδικές, αρνητικά φορτισμένες, ακτίνες και συνεπώς ήταν φορτισμένες θετικά. Αργότερα αποδείχτηκε ότι τα σωματίδια α- ήταν πυρήνες ηλίου ( $^4\text{He}$ ). Οι ακτίνες β- συμπεριφέρονται όπως ακριβώς οι καθοδικές ακτίνες άρα πρόκειται για αρνητικά φορτισμένα σωματίδια. Τέλος, οι ακτίνες γ- ήταν εξαιρετικά διεισδυτικές και ανεπηρέαστες από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία<sup>121</sup>.

### **11.2.4 Ανακάλυψη του πυρήνα**

Η ανακάλυψη του πυρήνα επιτεύχθηκε από τους E. Rutherford, H. Geiger και E. Marsden το 1911, όταν χρησιμοποίησαν τις ραδιενεργές διασπάσεις για να ταυτοποιήσουν την υπόθεση ότι το άτομο αποτελείται από πρωτόνια (+) και ηλεκτρόνια (-). Μετρήθηκε η γωνία σκέδασης δέσμης σωματιδίων α- και β- κατά τη διέλευση από φύλλα χρυσού (Au), πάχους 0.0004 cm. Συμπέραναν ότι τα υποατομικά σωματίδια δεν ήταν ομοιόμορφα κατανομημένα στο άτομο κι ότι το άτομο αποτελείται από ένα κεντρικό φορτίο, το οποίο κατανέμεται στο κέντρο (πυρήνας)<sup>122</sup>.

## **2.5 Ανακάλυψη μεταστοιχείωσης και ισοτόπων**

Οι χημικές μελέτες της ραδιενέργειας αποκάλυψαν πληθώρα στοιχείων αγνώστου φύσεως. Πολλά απ' αυτά προέρχονταν απ' τα ήδη γνωστά Th, P, Ra, U. Οι E. Rutherford και F. Soddy πρότειναν τον όρο μετάβολα (metabols) για τα βραχύβια αυτά ατομικά θραύσματα, όμως το 1913 οι F. Soddy και K. Fajans αποκάλυψαν την πραγματική φύση των προϊόντων διασπάσεων του Ουρανίου (U) και Θορίου (Th) και απέδειξαν τη σχέση τους με συγκεκριμένα στοιχεία του Περιοδικού Συστήματος<sup>123</sup>. Ο F. Soddy ασχολήθηκε με τη φύση των τριών σειρών ραδιενεργών διασπάσεων. Αυτοί ήταν διαδοχικές μετατροπές με ραδιενεργό διάσπαση ενός στοιχείου σε ένα άλλο, αρχίζοντας από το  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$ , που καλούνται μητρικοί πυρήνες.



Τα προϊόντα των διασπάσεων (θυγατρικά άτομα) ήταν κι αυτά ραδιενεργά και υφίσταντο διάσπαση για να δώσουν κι άλλα θυγατρικά. Οι Soddy και Fajans χαρακτήρισαν χημικά τα θυγατρικά στοιχεία των τριών σειρών διασπάσεως. Για παράδειγμα βρήκαν ότι τα αέρια προϊόντα καθεμιάς από τις τρεις σειρές διασπάσεως είναι η ομάδα VIII του Περιοδικού Συστήματος (Ευγενή Αέρια).

Ο K. Fajans το 1913 έδειξε ότι η εκπομπή σωματιδίου α- από πυρήνα ατόμου μετατοπίζει το άτομο δύο θέσεις προς τα αριστερά στο Περιοδικό Σύστημα, ενώ εκπομπή σωματιδίου β- μια θέση δεξιά. Κατέληξε, λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι όλα τα ραδιενεργά στοιχεία τοποθετούνται σε υπάρχουσες θέσεις του Περιοδικού Συστήματος<sup>124</sup>. Έτσι, το φαινόμενο της ραδιενέργειας έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή ενός στοιχείου σε άλλο, φαινόμενο που αποκάλεσε μεταστοιχείωση. Επειδή δεν υπήρχαν αρκετές θέσεις στο Περιοδικό Σύστημα ο F. Soddy πρότεινε τον ορισμό των ισοτόπων. Αυτά είναι μορφές ενός στοιχείου που έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων, αλλά διαφορετικές μάζες, λόγω του διαφορετικού αριθμού νετρονίων, που περιέχονται στους πυρήνες τους<sup>125</sup>.

#### **11.2.5 Επιβεβαίωση της ύπαρξης των ισοτόπων**

Η υπόθεση της ύπαρξης των ισοτόπων πιστοποιήθηκε το 1919, όταν ο Francis Aston ανακάλυψε τα ισότοπα του Ne με τη βοήθεια του φασματοφωτομέτρου μάζας που μόλις είχε εφεύρει. Τα 1934 ο Harold Urey τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Χημείας για την ανακάλυψη του δευτερίου, που είναι το βαρύ ισότοπο του υδρογόνου.

#### **11.2.6 Ανακάλυψη νετρονίου**

Μετά την ανακάλυψη του κύκλωτρου το 1929 από τον E. O. Lawrence, ο James Chadwick, βοηθός του Rutherford, απέδειξε το 1932 την ύπαρξη ενός σωματιδίου με μάζα ίση με 1u και φορτίο μηδέν (νετρόνιο)<sup>126</sup>. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε αποτελούνταν από μια πηγή ακτινοβολίας α- με Po πίσω από ένα δίσκο καθαρού Be. Τα σωματίδια που προσέκρουαν στο Be ήταν πολύ διεισδυτικά και μπορούσαν να προκαλέσουν την εκπομπή πρωτονίων υψηλής ενέργειας από μόρια παραφίνης, που τοποθετούνταν στην πορεία τους. Συνεχίζοντας την έρευνα του ο Chadwick είδε να σχηματίζεται μια σχετικά μικρή ροή νετρονίων<sup>127</sup>.

#### **11.2.7 Ανακάλυψη ποζιτρονίου:**

Ο C. D. Anderson το 1932, χρησιμοποιώντας φωτογραφίες ιχνών κοσμικών ακτίνων σε θάλαμο νεφώσεως, προσπάθησε να ταυτοποιήσει μια τροχιά ενός σωματιδίου, που

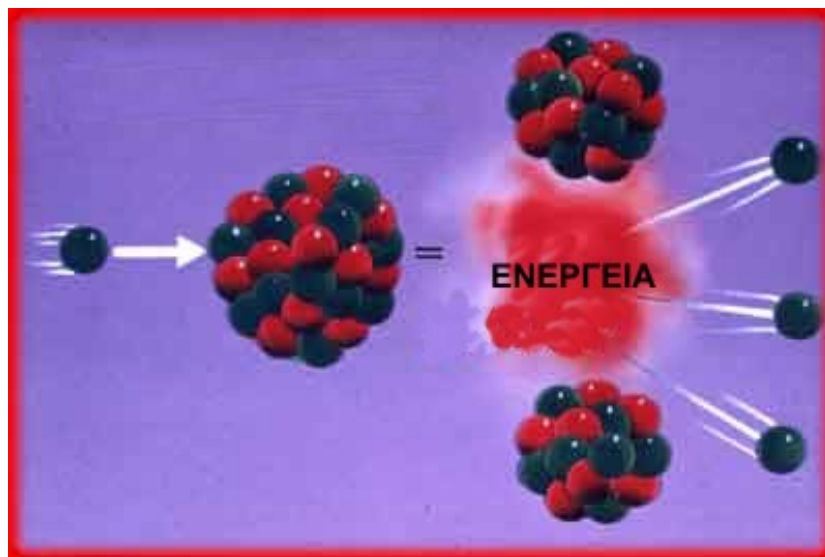
είχε υποστεί καμπύλωση υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου, της οποίας η ακτίνα ήταν ίδια με αυτή του ηλεκτρονίου, αλλά προς αντίθετη κατεύθυνση. Η τροχιά αυτή αποδόθηκε στο ποζιτρόνιο, σωματιδίου ίδιου με το ηλεκτρόνιο, αλλά με θετικό φορτίο.

#### **11.2.8 Παραγωγή του πρώτου τεχνητού ραδιοϊσοτόπου:**

Το 1934 ο F. Joliot και η I. Curie ανακοίνωσαν την πρώτη τεχνητή παρασκευή ενός ραδιενεργού στοιχείου. Ακτινοβόλησαν με σωματίδια α-, προερχόμενα από το Po, ορισμένα στοιχεία και παρατήρησαν το σχηματισμό ραδιενεργών ισοτόπων. Το πρώτο από αυτά ήταν το  $^{13}\text{N}$  ή ραδιοάζωτο, όπως ονομάστηκε.

#### **11.2.9 Τεχνητή πυρηνική σχάση**

Ο Ο. Hahn και ο F. Strassmann το 1939, χρησιμοποιώντας νετρόνια κατάφεραν για πρώτη φορά να προκαλέσουν διάσπαση ενός ατόμου. Αυτό επετεύχθη με βομβαρδισμό του U με νετρόνια, οπότε κατάφεραν να αποδείξουν την ύπαρξη ραδιενεργών σωματιδίων με πολύ μικρότερη μάζα από εκείνη του ουρανίου.

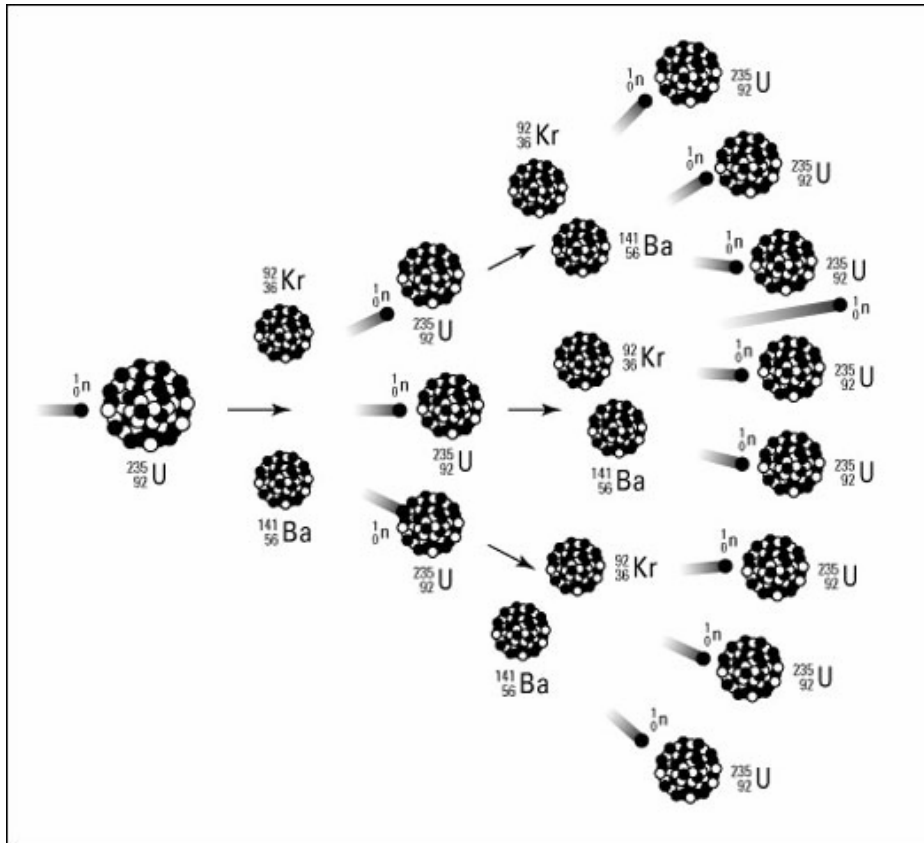


Εικόνα 11.2: Σχάση

#### **11.2.10 Πρόκληση αλυσιδωτής αντίδρασης (chain reaction)**

Κατά την πυρηνική σχάση με νετρόνια, σε κάθε σχάση απελευθερώνονται περισσότερα του ενός νετρονίων που χρειάζεται για να προκληθεί νέα σχάση. Σε αυτή την παραδοχή στηρίχτηκε ο Enrico Fermi, με την καθοδήγηση του οποίου στη δεκαετία του 1940 κατασκευάστηκε ο πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας ισχύος, για την

παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Στις 2 Νοεμβρίου του 1942 ο αντιδραστήρας έγινε κρίσιμος, δηλαδή επετεύχθη για πρώτη φορά αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση. Τρία χρόνια αργότερα έπεσαν οι πρώτες ατομικές βόμβες κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου.



Εικόνα 11.3: Παράδειγμα Αλυσιδωτής Αντίδρασης του U-235

### 11.2.11 Ανακάλυψη μεθόδων ραδιοχρονολόγησης

Το 1949 ο W. Libby στο Πανεπιστήμιο του Σικάγο ανακοίνωσε την ανάπτυξη της μεθόδου χρονολόγησης με ραδιενεργό άνθρακα. Σήμερα, η συγκεκριμένη μέθοδος καθώς κι άλλες, που χρησιμοποιούν άλλα ραδιενεργά στοιχεία, εφαρμόζεται στη χρονολόγηση αρχαιολογικών ευρημάτων.

## 12 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΠΗΓΕΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

### 12.1 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ

Στη φύση έχουν βρεθεί 340 περίπου ισότοπα χημικών στοιχείων, από τα οποία περισσότερα από 70 είναι ραδιενεργά. Όλα τα χημικά στοιχεία, που έχουν ατομικό αριθμό μέχρι 80 περιλαμβάνουν και ραδιενεργά ισότοπα, ενώ όσα έχουν ατομικό αριθμό πάνω από 83 είναι ραδιενεργά. Τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, που υπάρχουν σήμερα στο φλοιό της γης, έχουν την προέλευση τους στη δημιουργία του σύμπαντος. Πιστεύεται ότι κατά τη διάρκεια του σχηματισμού της ύλης, από την οποία αποτελείται σήμερα το σύμπαν, πρέπει να υπήρχε ένας σχετικά μεγάλος αριθμός ραδιενεργών πυρήνων. Με την πάροδο των αιώνων, τα λιγότερο μακρόβια ραδιονουκλίδια διασπάστηκαν κι έτσι σήμερα δεν μπορούν να ανιχνευτούν στην επιφάνεια της γης. Η ηλικία της γης υπολογίζεται σε 4.5 δισεκατομμύρια χρόνια κι έτσι τα ραδιονουκλίδια με χρόνους υποδιπλασιασμού μεγαλύτερους από  $10^8$  χρόνια είναι πρακτικά μη ανιχνεύσιμα, αφού από τη στιγμή της δημιουργίας τους έχουν υποστεί περισσότερους από 30 υποδιπλασιασμούς. Αντίθετα, ραδιονουκλίδια με χρόνους υποδιπλασιασμού της τάξης των  $10^{10}$  ετών έχουν διασπαστεί ελάχιστα μέχρι σήμερα. Βέβαια, στο φλοιό της γης υπάρχουν και ραδιενεργά ισότοπα με χρόνους ημιζωής αρκετά μικρούς, συγκρινόμενους με την ηλικία της γης. Τα βραχύβια αυτά ισότοπα παράγονται συνεχώς από κάποια άλλα, τα οποία έχουν πολύ μεγάλους χρόνους ημιζωής<sup>128</sup>.

Τα ραδιονουκλίδια, τα οποία υπάρχουν στη φύση μπορούν να χωριστούν σε αυτά που δεν ανήκουν σε ραδιενεργές οικογένειες και σε εκείνα, που ανήκουν στις τρεις γνωστές ραδιενεργές σειρές: α) τη σειρά του Ουρανίου, που έχει σαν μητρικό στοιχείο το  $^{238}\text{U}$ , β) τη σειρά του Θορίου, που έχει σαν μητρικό το  $^{232}\text{Th}$  και γ) τη σειρά του Ακτινίου, που έχει ως μητρικό το  $^{235}\text{U}$ . Τα ραδιενεργά ισότοπα, που δεν ανήκουν σε κάποια από τις τρεις ραδιενεργές σειρές παράγονται από τις κοσμικές ακτίνες, μπορεί όμως να έχουν και γήινη προέλευση. Τα ραδιονουκλίδια των σειρών αυτών βρίσκονται κυρίως στο φλοιό της γης και σε αυτά οφείλεται ένα σημαντικό μέρος της ακτινοβολίας, στην οποία εκτίθεται ο άνθρωπος. Αρχικά, υπήρχε και μια ακόμη ραδιενεργός σειρά, η σειρά του Νεπτονίου, η οποία είχε ως μητρικό στοιχείο το  $^{241}\text{Pu}$ . Επειδή, όμως, το  $^{241}\text{Pu}$  έχει χρόνο ημιζωής 14 χρόνια, η σειρά αυτή υπήρξε για λίγο μόνο. Το μόνο στοιχείο από τη σειρά αυτή, που επέζησε είναι το  $^{209}\text{Bi}$ , το οποίο είναι σταθερό<sup>5 16 79</sup>.

### **12.1.1 Κοσμική ακτινοβολία**

Η κοσμική ακτινοβολία είναι γενικά προϊόν των συνεχών μεταβολών, που συμβαίνουν στον αστρικό χώρο. Τέτοιες μεταβολές συμβαίνουν για παράδειγμα στον ήλιο, ο οποίος βρίσκεται σε διαρκή δραστηριότητα. Στην πραγματικότητα στον ήλιο συμβαίνει μια συνεχής θερμοπυρηνική σύντηξη, αποτέλεσμα της οποίας είναι η συνεχής εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας (στην οποία οφείλουμε την ύπαρξη μας) και κοσμικής ακτινοβολίας.

Η κοσμική ακτινοβολία συνίσταται από πρωτόνια, α-σωματίδια (δηλαδή πυρήνες  $^4\text{He}$ ) ή κι ακόμη μεγαλύτερους πυρήνες, καθώς και ηλεκτρόνια. Όλα τα σωματίδια φθάνουν στο εξωτερικό της γήινης ατμόσφαιρας ομοιόμορφα με τεράστιες ταχύτητες. Εισερχόμενα στην ατμόσφαιρα αντιδρούν με τα συστατικά του αέρα N και O με αποτέλεσμα να παράγονται μεσόνια, ηλεκτρόνια και σωματίδια γ-. Κατά μέσο όρο στη γη πέφτει ένα τέτοιο κοσμικό σωματίδιο ανά τετραγωνικό μέτρο το λεπτό. Τα μέρη, που βρίσκονται κοντύτερα στους πόλους δέχονται 4 φορές μεγαλύτερη ακτινοβολία από εκείνα, που βρίσκονται στον Ισημερινό, εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου της γης. Πιο δραματική είναι η μεταβολή της κοσμικής ακτινοβολίας σε σχέση με το υψόμετρο. Ενώ η μέση ετήσια συνεισφορά στη δόση που δέχεται ο άνθρωπος είναι 0.3 mSv, η τιμή αυτή φθάνει το 1 mSv για υψόμετρο 2000 μέτρων. Αυτό σημαίνει πως οι επιβάτες και τα πληρώματα των αεροπλάνων επιβαρύνονται περισσότερο<sup>23 129</sup>.

### **12.1.2 Δόση από εσωτερική έκθεση**

Είναι γνωστό πως ραδιενεργά ισότοπα εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα μέσω της αναπνοής και των τροφών και ανάλογα με το είδος τους κατακρατούνται από ορισμένα όργανα του σώματος για κάποιο διάστημα. Από τη θέση αυτή ακτινοβολούν τη γύρω περιοχή. Στις περιπτώσεις που το περιβάλλον δεν έχει ρυπανθεί με τεχνητά ισότοπα, τα κυριότερα φυσικά ισότοπα, που ανιχνεύονται είναι τα:  $^{14}\text{C}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  και το  $^{40}\text{K}$ . Το πρώτο παράγεται από την αντίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με το N της ατμόσφαιρας και εισέρχεται μέσω της αναπνευστικής οδού, τα  $^{222}\text{Rn}$  και  $^{220}\text{Rn}$  καθώς και το  $^{40}\text{K}$  προέρχονται από το έδαφος και τα οικοδομικά υλικά και εισέρχονται μέσω της αναπνοής και της τροφής αντίστοιχα. Τα ισότοπα αυτά έχουν σταθερό ρυθμό εισόδου και εξόδου από τον οργανισμό, με αποτέλεσμα να βρίσκονται σε δυναμική ισορροπία. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως και σε αυτή την περίπτωση τα επίπεδα ακτινοβολίας ποικίλλουν, ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και τις συνθήκες της κάθε περιοχής.

### **12.1.3 Ακτινοβολία εδάφους - Οικοδομικών υλικών**

Στο υπέδαφος έχουν βρεθεί περισσότερα από 40 ραδιενεργά ισότοπα. Τα πιο πολλά από αυτά προέρχονται από διαδοχικές διασπάσεις άλλων ραδιενεργών ισωτόπων και κατατάσσονται στις τρεις γνωστές σειρές. Τα μητρικά ισότοπα των τριών ραδιενεργών σειρών  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{235}\text{U}$  έχουν χρόνους υποδιπλασιασμού 4.5, 14 και 0.7 δισεκατομμύρια χρόνια αντίστοιχα. Οι χρόνοι αυτοί είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ηλικία της γης. Τα μητρικά ισότοπα πιθανότατα προέρχονται από άλλα, ο χρόνος υποδιπλασιασμού των οποίων ήταν σημαντικά μικρότερος κι έτσι σήμερα δεν υπάρχουν στη γη<sup>130</sup>.

Όπως είναι φυσικό, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από το υπέδαφος μεταβάλλεται από τόπο σε τόπο, ανάλογα με την περιεκτικότητα του σε φυσικά ραδιενεργά κοιτάσματα. Έτσι, σε ορισμένες περιοχές, οι ετήσιες δόσεις μπορεί να είναι έως και 500 φορές υψηλότερες από τη μέση τιμή. Τέτοια μέρη υπάρχουν στη Βραζιλία και στην Ινδία, τα υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας των οποίων οφείλονται σε επιφανειακά κοιτάσματα του ορυκτού μοναζίτη, που είναι πλούσιος σε Θόριο. Σε αυτές τις περιοχές έχουν παρατηρηθεί κρούσματα πνευματικά καθυστερημένων ατόμων, γεγονός που αποδίδεται σε γενετικά αίτια. Αυτή είναι μια ένδειξη ότι ραδιενέργεια χαμηλής δόσης μπορεί ίσως να προκαλέσει γενετικές βλάβες<sup>131</sup>.

### **12.1.4 Το πρόβλημα του Ραδονίου**

Σχετικά αργά, οι επιστήμονες ανακάλυψαν ότι η σπουδαιότερη πηγή φυσικής ραδιενέργειας, που φτάνει στον άνθρωπο είναι το αέριο Ραδόνιο. Αυτό περιλαμβάνει δύο ραδιενεργά ισότοπα, το  $^{222}\text{Rn}$  της σειράς του Ουρανίου και το  $^{220}\text{Rn}$  (Θορώνιο) της σειράς του Θορίου. Από τα δύο, το πρώτο είναι 20 φορές πιο σημαντικό από πλευράς ακτινοβολίας. Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 3.8 ημέρες και διασπάται σε  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$  και  $^{210}\text{Pb}$  εκπέμποντας α-σωματίδια. Το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του ισότοπα συνεισφέρουν κατά περίπου 62% στη συνολική δόση ακτινοβολίας, που δέχεται ο άνθρωπος από φυσικές πηγές. Όταν εισπνέεται σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να προκαλέσει καρκίνο των πνευμόνων. Αφού ο χρόνος ημιζωής του  $^{222}\text{Rn}$  είναι μεγάλος σε σχέση με το χρόνο παραμονής του αέρα στους πνεύμονες, μόνο ένας μικρός αριθμός πυρήνων  $^{222}\text{Rn}$  διασπάται κατά τη διάρκεια της αναπνοής. Εξαιτίας της χημικής του αδράνειας δεν κατακρατείται στους πνεύμονες, κι άρα η συνεισφορά του στην εσωτερική έκθεση του ανθρώπου είναι μικρή.

Το πρόβλημα βρίσκεται στα θυγατρικά του ισότοπα, τα οποία δεν έχουν την ίδια συμπεριφορά. Ένα σημαντικό ποσό των θυγατρικών του είναι φορτισμένα σωματίδια.

Αυτά έλκουν υδρατμούς, ενυδατώνονται κι έτσι σχηματίζουν συσσωματώματα (clusters) με άλλα ιόντα, που μπορεί να είναι εξίσου επικίνδυνα. Επιπλέον, μπορεί να προσληφθούν από ήδη υπάρχοντα σωματίδια αερολυμάτων και να καταλήξουν στο αναπνευστικό σύστημα, σχηματίζοντας εσωτερική πηγή ιοντίζουσας ακτινοβολίας<sup>132</sup>.

Υψηλά επίπεδα Ραδονίου βρίσκονται σε σπίτια χωρών, που λαμβάνουν μέτρα θερμικής μόνωσης. Για παράδειγμα, στο εσωτερικό σπιτιών σκανδιναβικών χωρών έχουν βρεθεί επίπεδα Ραδονίου έως και 5000 υψηλότερα από ότι έξω από αυτά. Οι συγκεντρώσεις σε εσωτερικούς χώρους, εκτός από το έδαφος, εξαρτώνται κι από το μέγεθος της διαπερατότητας, το ρυθμό εξαερισμού και το χώρο, στον οποίο έγινε η μέτρηση. Έτσι, είναι διαπιστωμένο πως στα ισόγεια κατοικιών παρατηρούνται υψηλότερα επίπεδα Ραδονίου, εξαιτίας του ότι βρίσκονται πιο κοντά στο έδαφος. Τέλος, επειδή οι εσωτερικοί χώροι είναι θερμότεροι από το εξωτερικό περιβάλλον παρατηρείται το λεγόμενο φαινόμενο της καμινάδας, το οποίο ακολουθείται από συσσώρευση Ραδονίου και άλλων αερίων σε εσωτερικούς χώρους.

Το Ραδόνιο εκλύεται από το εσωτερικό της γης, σε ποσότητες, που κυμαίνονται ευρύτατα, ανάλογα με την περιεκτικότητα του φλοιού σε ραδιενεργά υλικά. Όταν με διάφορους τρόπους φθάνει σε κλειστούς χώρους (οικοδομικά υλικά) παγιδεύεται κι εμφανίζει μέγιστες συγκεντρώσεις. Εισέρχεται στα κτίρια από ρωγμές στα θεμέλια, γύρω από χαλαρά προστατευμένους σωλήνες, καθώς και από σωλήνες δαπέδου.

#### **12.1.5 Τρόφιμα και πόσιμα νερά**

Το σημαντικότερο φυσικό ραδιενεργό ισότοπο, που υπάρχει στα τρόφιμα είναι το <sup>40</sup>K, το οποίο εμφανίζει σταθερή ισοτοπική αναλογία ως προς το συνολικό Κάλιο (29000 Bq ανά kg Καλίου). Λόγω της αυτορύθμισης της ποσότητας του Καλίου στο ανθρώπινο σώμα η συγκέντρωση του <sup>40</sup>K είναι σταθερή, περίπου 60 Bq/kg. Στο <sup>40</sup>K οφείλεται το 80% της δόσης, που προσλαμβάνει ο άνθρωπος μέσω της τροφικής οδού. Άλλα ισότοπα, που έχουν μικρότερη συνεισφορά στη ραδιενέργεια των τροφίμων είναι ο <sup>14</sup>C, ο <sup>210</sup>Pb και το <sup>226</sup>Ra<sup>133</sup>.

Η δόση, που σχετίζεται με τα επιφανειακά και τα πόσιμα ύδατα είναι αρκετά χαμηλή, αφού η συγκέντρωση των σημαντικότερων, από ραδιολογικής άποψης, ισοτόπων είναι της τάξης των μερικών Bq.m<sup>-3</sup>. Στα υπόγεια, όμως, ύδατα παρατηρούνται συχνά αυξημένες συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων. Τέλος, ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις <sup>222</sup>Rn χαρακτηρίζουν ορισμένα θερμομεταλλικά νερά, που χρησιμοποιούνται για θεραπευτικούς σκοπούς (πχ υδρόλουτρα, ατμόλουτρα). Η χρήση τους επιφέρει υψηλές δόσεις, τόσο για τους ασθενείς, που τα χρησιμοποιούν, όσο και για το προσωπικό, το οποίο εργάζεται εκεί. Η κύρια οδός εισόδου στον οργανισμό είναι η αναπνευστική<sup>134</sup>.

### **12.1.6 Τεχνολογικά αυξανόμενα επίπεδα της έκθεσης σε φυσικά ραδιενεργά ισότοπα**

Ορισμένες δραστηριότητες των ανθρώπων οδηγούν σε αύξηση της έκθεσης σε ακτινοβολίες, που προέρχονται από φυσικά ραδιενεργά ισότοπα. Τέτοιες δραστηριότητες είναι για παράδειγμα η εξόρυξη ουρανίου, η χρήση συστατικών με αυξημένες συγκεντρώσεις φυσικών ραδιενεργών ισωτόπων σε οικοδομικά υλικά, η οικιακή χρήση υπογείων υδάτων με αυξημένες συγκεντρώσεις  $^{222}\text{Rn}$  κλπ. Υπό μια ευρύτερη έννοια και η κατασκευή κατοικιών, ιδιαίτερα όταν λαμβάνονται μέτρα θερμομόνωσης, μπορεί να θεωρηθεί αιτία τεχνολογικής αύξησης σε έκθεση σε Ραδόνιο. Είναι, όμως, σαφές ότι μέρος αυτής της έκθεσης είναι αναπόφευκτη, ενώ από κάποια επίπεδα και πάνω επιβάλλεται ο έλεγχος και ο περιορισμός της έκθεσης αυτής.

### **12.1.7 Άλλες φυσικές πηγές ραδιενέργειας**

Υπάρχουν στη Γη κι άλλες πηγές ραδιενέργειας μικρότερης σημασίας. Η πιο σημαντική προέρχεται από το κάρβουνο, το οποίο όταν καίγεται ελευθερώνει τα ραδιενεργά ισότοπα που περικλείει. Αυτά είτε φεύγουν με τον καπνό, είτε παραμένουν στη στάχτη. Επίσης τα φωσφορικά ορυκτά, που χρησιμοποιούνται για λιπάσματα, περιέχουν σε πολύ μικρές ποσότητες ραδιενεργά ισότοπα και φτάνουν στον άνθρωπο με την τροφή.

Η γεωθερμική ενέργεια, που ελευθερώνεται με τη μορφή ατμού ή ζεστού νερού, είναι ένα μέσο με το οποίο φτάνει η ραδιενέργεια από το εσωτερικό της γης στην επιφάνεια της. Η χρήση της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προξενεί τριπλάσια ραδιενεργό ρύπανση ανά μονάδα παραγωγής έναντι της αντίστοιχης ρύπανσης από ηλεκτρικά εργοστάσια κάρβουνου. Η διάδοση της γεωθερμικής ενέργειας είναι περιορισμένη (0,1% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας και η συμμετοχή της στη φυσική ραδιενέργεια είναι μικρή).

Άλλο μέσο είναι οι πηγές των μεταλλικών μερών, που περιέχουν σε διάλυση απορροές ραδιενεργών στοιχείων και πολύ σπάνια ελάχιστα ποσά των ίδιων ραδιενεργών στοιχείων ή των αλάτων τους. Οι ραδιενεργές πηγές έχουν θεραπευτική επίδραση σε πολλές παθήσεις όπως τα αρθρικά, οι χρόνιοι ρευματισμοί, η πνευμονική φυματίωση κ.ά. Στην Ελλάδα οι ισχυρότερες ραδιενεργές πηγές είναι αυτές που βρίσκονται στα Καμένα Βούρλα.

## 12.2 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ

Ενώ στη φύση υπάρχουν μερικές δεκάδες ασταθή ισότοπα (ραδιοϊσότοπα), ο άνθρωπος, μετά την ανακάλυψη και τη μελέτη της πυρηνικής δομής, κατόρθωσε να ανακαλύψει μεθόδους για την «κατά παραγγελία» παραγωγή ραδιοϊσοτόπων. Έτσι, σήμερα υπάρχουν πάνω από 2000 τεχνητα ραδιοϊσότοπα, που μπορούν να παραχθούν με βομβαρδισμό των 112 στοιχείων της φύσης. Ο βομβαρδισμός γίνεται με νετρόνια μέσα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, ή με άλλα στοιχειώδη σωματίδια ή πυρήνες μέσα σε επιταχυντικές συσκευές. Τα βαριά στοιχεία παράγουν μεγαλύτερο αριθμό ραδιοϊσοτόπων από ότι τα ελαφρά. Για παράδειγμα, το Κάισιο έχει 32 ισότοπα, ενώ το Υδρογόνο μόνο 3.

Μεγάλες ποσότητες ραδιοϊσοτόπων παράγονται, επίσης, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας πυρηνικών αντιδραστήρων μεγάλης ισχύος για την παραγωγή ενέργειας, από εκρήξεις ατομικών βομβών σε πυρηνικές δοκιμές, καθώς κι από διάφορες εφαρμογές στη βιομηχανία και την ιατρική. Τέλος, τα κατά καιρούς πυρηνικά ατυχήματα έχουν εξέχουσα θέση στη ρύπανση του περιβάλλοντος από ραδιενεργά συστατικά.

### 12.2.1 Πυρηνικές δοκιμές

Οι δοκιμές πυρηνικών όπλων ξεκίνησαν το 1945 και συνεχίζονται έως σήμερα. Η συνεχής ανάπτυξη και τελειοποίηση των όπλων αυτών αποτελεί ένα θανάσιμο κίνδυνο για την ανθρωπότητα, ο οποίος δυστυχώς δεν έχει ακόμη αντιμετωπιστεί ριζικά. Το μόνο αξιόλογο βήμα έγινε το 1963 με την υπογραφή της συνθήκης απαγόρευσης των πυρηνικών δοκιμών στην ατμόσφαιρα από τις τρεις μεγαλύτερες πυρηνικές δυνάμεις, ΕΣΣΔ, ΗΠΑ και Αγγλία. Η συνθήκη αυτή τερμάτισε μια περίοδο συνεχούς κι εκτεταμένης ραδιενεργού ρύπανσης του πλανήτη. Η Γαλλία και η Κίνα, που δεν υπέγραψαν τη συνθήκη, συνέχισαν τις πυρηνικές δοκιμές ως το 1981. Σήμερα, πραγματοποιούνται μόνο υπόγειες πυρηνικές δοκιμές, οι οποίες ευτυχώς επιφέρουν εξαιρετικά περιορισμένη σε μέγεθος και έκταση ραδιενεργό ρύπανση<sup>135 136</sup>.

Κατά την πυρηνική έκρηξη δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών ραδιενεργών ισοτόπων, είτε άμεσα, είτε κατά τη διάρκεια της διασπάσεως, που υφίστανται ορισμένα ραδιενεργά ισότοπα μέχρι να καταλήξουν σε σταθερά (μη ραδιενεργά). Οι χρόνοι υποδιπλασιασμού των ραδιοϊσοτόπων διαφέρουν σημαντικά κι αυτό οδηγεί στη συνεχή μεταβολή της ποιοτικής εικόνας των εκλυθέντων ρύπων. Η σχετική συνεισφορά των βραχύβιων ισοτόπων μειώνεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου, ενώ ανάλογα αυξάνεται ο ρόλος των ισοτόπων με μεγαλύτερη περίοδο υποδιπλασιασμού<sup>95 137</sup>.

### **12.2.2 Εφαρμογές στην Ιατρική**

Η επιλογή της μιας ή της άλλης μορφής ακτινοβολίας εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Ακτίνες-Χ υψηλής ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν αρχικά και για θεραπευτικούς σκοπούς. Σταδιακά, αντικαταστάθηκαν από ακτινοβολίες ραδιοϊσοτόπων και επιταχυντικών μηχανών. Οι εφαρμογές των ραδιοϊσοτόπων στην ιατρική έχουν διαδοθεί ευρύτατα τα τελευταία χρόνια, ώστε να αποτελούν έναν ιδιαίτερο κλάδο, την πυρηνική ιατρική<sup>138</sup>.

Πρόσφατα, για διαγνωστικούς σκοπούς έχουν χρησιμοποιηθεί ακτίνες-Χ, που βρίσκονται στη λεγόμενη ακτινοβολία συγχρότρου (synchrotron radiation). Η ακτινοβολία αυτή δημιουργείται κατά τη διάρκεια λειτουργίας επιταχυντικών μηχανών, είναι συνεχείς, μεγάλης έντασης και πολωμένη. Από ενεργειακής άποψης καλύπτει την περιοχή από το υπεριώδες μέχρι τις ακτίνες γ-. Η δυνατότητα, που υπάρχει, να επιλέγονται ορισμένες ακτίνες-Χ από το συνεχές φάσμα την κάνει χρήσιμη για τη λήψη ραδιογραφιών. Έτσι, μπορεί να ληφθούν ακτινογραφίες λεπτών οργάνων του σώματος χωρίς να επιβαρύνεται ο άνθρωπος με μεγάλες δόσεις.

Η διαγνωστική έκανε, επίσης, μεγάλη πρόοδο με τη χρήση των ραδιοϊσοτόπων. Η βασική αρχή εδώ είναι η εισαγωγή ραδιοϊσοτόπων στο πάσχον μέρος του ασθενούς και ο έλεγχος μέσω της ακτινοβολίας, που εκπέμπουν. Πάνω από 20 ραδιοϊσότοπα χρησιμοποιούνται σήμερα για διαγνωστικούς σκοπούς στην πυρηνική ιατρική. Χρησιμοποιούνται κυρίως ισότοπα που εκπέμπουν σωματίδια γ-, επειδή τα σωματίδια αυτά είναι πολύ διαπεραστικά και άρα ευρισκόμενα στο εσωτερικό του σώματος μπορεί να ανιχνευτούν από έξω.

Οι ακτινοβολίες έχουν βρει ευρύτατες εφαρμογές και στη θεραπευτική. Η πιο γνωστή είναι η ακτινοθεραπεία καρκινικών όγκων με ακτινοβολία γ- από <sup>60</sup>Co (βόμβα κοβαλτίου). Σε αυτή συνίσταται η ανάπτυξη της ακτινοθεραπείας μετά τις ακτίνες-Χ. Η ακτινοβολία αυτή είναι πιο δεισδυτική από αυτή των ακτίνων-Χ. Για τους σκοπούς αυτούς χρησιμοποιούνται πολύ μικρότερες συσκευές με αποτέλεσμα την καλύτερη εστίαση στο πάσχον μέλος.

Η χρήση των ραδιοϊσοτόπων στην πυρηνική ιατρική είναι αναντίρρητα ένα πολύ σημαντικό όπλο του ανθρώπου στον αγώνα του για επιβίωση. Αποτελεί μια ιδιάζουσα περίπτωση, όπου η βαθιά γνώση της φυσικής και της ιατρικής, σε συνδυασμό με τη φιλοσοφική αντιμετώπιση της ζωής μπορούν να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα.

### **12.2.3 Πυρηνικοί αντιδραστήρες**

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι διατάξεις, στις οποίες συντελείται ελεγχόμενη πυρηνική σχάση. Οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως επίσης και για την παραγωγή νετρονίων για αναλύσεις με νετρονική ενεργοποίηση, για το σχηματισμό ραδιονουκλιδίων για ιατρικούς σκοπούς, για νετρονική ραδιογραφία, καθώς και για μια πληθώρα πειραμάτων νετρονικής σκέδασης. Το μέγεθος και ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα ποικίλλει ανάλογα με τη χρήση του. Παρόλα αυτά, όμως, όλοι αποτελούνται από παρόμοια συστατικά. Σε αυτά περιλαμβάνονται το πυρηνικό καύσιμο, ένας επιβραδυντής για να επιβραδύνει τα νετρόνια σχάσης, ένα ψυκτικό μέσο για να απομακρύνει τη θερμική ενέργεια, που εκπέμπεται κατά τη σχάση και ένα υλικό ελέγχου για να ελέγχεται ο ρυθμός της σχάσης<sup>1</sup>.

Στους πυρηνικούς αντιδραστήρες είναι αδύνατο να συμβεί πυρηνική έκρηξη γιατί το ίδιο το καύσιμο πρέπει να είναι σε στερεά μορφή και σε ορισμένη θερμοκρασία για να συμβεί αλυσιδωτή αντίδραση. Αν το καύσιμο λιώσει ή εξαερωθεί σταματά κάθε διαδικασία. Το πρόβλημα με τους πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος βρίσκεται στα μεγάλα ποσά ραδιενεργών υλικών, που δημιουργούνται, ως αποτέλεσμα των σχάσεων του πυρηνικού καυσίμου. Τα ραδιενεργά αυτά υλικά πρέπει να διαφυλαχθούν και να αποτραπεί με κάθε μέσο η έκλυσή τους στο περιβάλλον. Το έργο αυτό προσπαθεί να εκπληρώσει ο σχεδιασμός ασφαλείας των Π.Α.Ι. Οι περισσότεροι είναι σχεδιασμένοι σύμφωνα με την αρχή ασφαλείας των τεσσάρων φραγμάτων. Η ραδιενέργεια κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα πρέπει να διασπάσει τέσσερα φράγματα για να διαφύγει στο περιβάλλον:

**α. Πυρηνικό καύσιμο.** Το πρώτο φράγμα είναι το ίδιο το πυρηνικό καύσιμο. Τα ραδιενεργά προϊόντα της σχάσης παράγονται μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του πυρηνικού καυσίμου. Όταν το καύσιμο παραμένει στην αλυσιδωτή του μορφή, μόνο ένα μέρος των αερίων και των πτητικών προϊόντων της σχάσης διαφεύγουν από το πλέγμα, εκτός αν αυτό λιώσει ή εξαερωθεί από υπερβολική θερμοκρασία.

**β. Ράβδοι καυσίμου.** Το πυρηνικό καύσιμο βρίσκεται με τη μορφή μικρών κυλίνδρων κλεισμένο σε σωλήνες ζirkονιούχου χάλυβα. Οι σωλήνες, μαζί με το καύσιμο που περιέχουν, ονομάζονται ράβδοι καυσίμου και συγκρατούν με το περίβλημά τους τα προϊόντα της σχάσης που διαφεύγουν από το κρυσταλλικό πλέγμα του καυσίμου, εκτός αν το περίβλημα λιώσει από υψηλή θερμοκρασία.

**γ. Περίβλημα του πρωτεύοντος συστήματος ψύξης.** Το κύριο μέρος του περιβλήματος αυτού είναι το δοχείο πίεσης. Είναι ένα χαλύβδινο δοχείο πάχους 20-25 εκατοστών και περικλείει την καρδιά του αντιδραστήρα και έχει σκοπό να συγκρατήσει τα ραδιενεργά στοιχεία στην περίπτωση που θα διασπαστούν τα δυο πρώτα φράγματα. Κίνδυνοι είναι η υψηλή θερμοκρασία, η υπερβολικά υψηλή πίεση του νερού μέσα στο

πρωτεύον κύκλωμα ή η μηχανική βλάβη κάποιου εξαρτήματος (κυρίως μια ανοιχτή βαλβίδα).

**δ. Περιβλήμα.** Είναι μια κατασκευή από ένα σφαιρικό ή κυλινδρικό χαλύβδινο κέλυφος που περιβάλλεται με αντίστοιχο κέλυφος από σκυρόδεμα.

Όπως ειπώθηκε, αν υπερθερμανθεί το καύσιμο από αυξημένο ρυθμό σχάσεων ή από ελάττωση της ψυκτικής ικανότητας του ψυκτικού μέσου διακόπτεται η λειτουργία του αντιδραστήρα. Δυστυχώς, όμως, δεν σταματά έτσι η παραγωγή θερμότητας, γιατί οι ραδιενεργοί πυρήνες μεταπίπτουν σε ένα ή περισσότερα στάδια σε άλλους, μέχρι να καταλήξουν σε κάποια σταθερή μορφή. Έτσι εξακολουθεί να παράγεται θερμότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά τη διακοπή λειτουργίας. Φυσικά, αυτή η θερμότητα πρέπει να μεταφερθεί με διάφορα ψυκτικά μέσα στο περιβάλλον, γιατί θα υπερθερμανθεί το καύσιμο και θα απειληθούν τα φράγματα μεταξύ ραδιενέργειας και περιβάλλοντος. Η ύπαρξη της θερμότητας ραδιενεργού μετάπτωσης αποτελεί και το σημαντικότερο μειονέκτημα των πυρηνικών αντιδραστήρων. Γεγονός, πάντως, είναι πως η πιθανότητα να συμβεί ατύχημα, λόγω του φαινομένου της τήξης της καρδιάς, είναι  $10^{-4}\%$  ανά αντιδραστήρα και χρόνο λειτουργίας. Το αποτέλεσμα δεν έχει αλλάξει σημαντικά από τα ατυχήματα του Three Miles Island και του Chernobyl<sup>97 139</sup>.

#### **12.2.4 Επεξεργασία Ουρανίου και κατασκευή του καυσίμου**

Το  $^{235}\text{U}$  είναι μόνο το 0,7% του φυσικού ουρανίου. Το άλλο 99,3% είναι  $^{238}\text{U}$ . Επομένως το ορυκτό ουράνιο πρέπει να εμπλουτιστεί με κατάλληλη επεξεργασία. Πριν πραγματοποιηθεί η επεξεργασία, το ορυκτό πρέπει να τριφτεί και να μετατραπεί σε κόκκους μεγέθους ψιλής άμμου. Στη συνέχεια γίνεται διήθηση με μίγμα νερού και χημικών ουσιών που διαχωρίζει το ουράνιο από άλλα υλικά του ορυκτού (πετρώματος). Αυτή η χημική επεξεργασία οδηγεί σε ένα μίγμα που λέγεται «κίτρινο κέικ». Έχει τη μορφή ενός γυαλιστερού κίτρινου παχύρρευστου μίγματος ή τη μορφή σκόνης. Πριν χρησιμοποιηθεί ως πυρηνικό καύσιμο, το κίτρινο κέικ μετατρέπεται σε κρυστάλλους εξαφθοριούχου ουρανίου.

Αυτοί οι κρύσταλλοι παίρνουν τη μορφή μικρών ράβδων ή σφαιριδίων. Αυτό γίνεται με άλεσμα, συμπίεση και πυράκτωση σε φούρνο, όπως στη αγγειοπλαστική. Το κάθε σφαιρίδιο έχει μέγεθος νυχιού. Τα σφαιρίδια συσκευάζονται σε ειδικούς μεταλλικούς σωλήνες (στοιχεία καυσίμου). Οι γεμάτοι σωλήνες κλείνονται ερμητικά και τοποθετούνται κατά δέσμες σε μεταλλικά πλαίσια. Τα πλαίσια διατηρούν ακριβείς αποστάσεις μεταξύ των ράβδων. Η δέσμη των ράβδων λέγεται πακέτο καυσίμου και θα αποτελέσει την καρδιά κάποιου πυρηνικού αντιδραστήρα.

### **12.2.5 Εργοστάσια επανεπεξεργασίας**

Σκοπός τους είναι η επανάκτηση του  $^{235}\text{U}$  και του  $^{239}\text{Pu}$  που βρίσκονται στα σχάσιμα στοιχεία, που δεν ανταποκρίνονται πια στις αλυσιδωτές αντιδράσεις και έχουν απομακρυνθεί από τον αντιδραστήρα. Αυτά τα στοιχεία, αρχικά αποθηκεύονται για έξι μήνες και στη συνέχεια μεταφέρονται με θωρακισμένα δοχεία στα εργοστάσια, διαδικασία περιβαλλοντικά επικίνδυνη. Αμέσως μετά, εκφορτώνονται σε δεξαμενές νερού, κόβονται οι ράβδοι με ειδικά ψαλίδια σε κομμάτια και τοποθετούνται σε δοχεία που περιέχουν ισχυρά οξέα, όπου και διαλύονται. Το ραδιενεργό υγρό που προκύπτει μεταφέρεται και διαχωρίζεται στα τελικά προϊόντα Ουρανίου, Πλουτωνίου και προϊόντα σχάσης. Μετά από αυτή τη διαδικασία όμως συγκεντρώνονται ραδιενεργές πτητικές ουσίες που αποθηκεύονται δύσκολα.

### **12.2.6 Ραδιενέργεια από προϊόντα σχάσης**

Κατά την πυρηνική σχάση παράγονται 2 ισότοπα και 2 - 3 νετρόνια. Τα ισότοπα αυτά δεν είναι πάντα τα ίδια και πολλά από αυτά είναι ραδιενεργά. Ραδιοϊσότοπα παράγονται και κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα, όταν σταθερά ισότοπα απορροφούν νετρόνια. Ο κύριος όγκος, όμως, της ραδιενέργειας, που συσσωρεύεται μέσα στον αντιδραστήρα προέρχεται από τα προϊόντα σχάσης. Μετά από ορισμένο χρόνο λειτουργίας ενός αντιδραστήρα έχουν παραχθεί περίπου 200 είδη ισωτόπων, που αντιστοιχούν σε 40 διαφορετικά χημικά στοιχεία. Σε μεγαλύτερη αναλογία παράγονται ισότοπα στις περιοχές μαζικού αριθμού 85 - 105 και 130 - 150. Τα ραδιοϊσότοπα μεταστοιχειώνονται με εκπομπή ακτινοβολίας  $\alpha$ - ή  $\beta$ - σε άλλα σταθερά ή ραδιενεργά.

Η έρευνα έχει δείξει ότι ο κύριος όγκος των προϊόντων σχάσης παραμένει μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του οξειδίου του Ουρανίου (σχάσιμο υλικό), που χρησιμοποιείται ως καύσιμο, ενώ άλλα προϊόντα με διάχυση κατορθώνουν και απελευθερώνονται. Αυτά είναι και τα επικίνδυνα, γιατί, επειδή είναι πτητικά, αυξάνουν την πίεση και δημιουργούν διαβρώσεις με τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών και τη διαφυγή τους από το κύκλωμα ψύξης του αντιδραστήρα. Από τα ισότοπα με μεγάλο ρυθμό παραγωγής αυτά που έχουν κίνδυνο διαρροής είναι το Κρυπτό και το Ξένο, που είναι αέρια, το Ιώδιο, το Τελλούριο και το Καίσιο, που είναι πτητικά και το Στρόντιο και το Ρουθήνιο. Από τα δυο τελευταία, το Στρόντιο έχει περιορισμένη πτητικότητα ως μέταλλο και δεν είναι πτητικό υπό μορφή οξειδίου, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με το Ρουθήνιο.

### **12.2.7 Αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων**

Το μεγάλο πρόβλημα των ραδιενεργών αποβλήτων είναι η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή τους και η ραδιενεργός παρουσία τους για εκατοντάδες χρόνια. Υπολογίζεται

ότι η παγκόσμια παραγωγή ραδιενεργών αποβλήτων το 2000 ξεπέρασε τους 172000 τόνους. Οι μέθοδοι αποθήκευσης, που έχουν προταθεί κατά καιρούς είναι: α) αποθήκευση σε τρύπες, που θα ανοιχτούν στον πυθμένα ωκεανών, β) αποστολή στο διάστημα με πυραύλους και γ) αποθήκευση σε κοιλώματα αλατορυχείων ή άλλων ανθεκτικών γεωλογικών σχηματισμών. Από τις τρεις μεθόδους αυτή που κερδίζει έδαφος είναι η τρίτη.

Όλες οι λύσεις, που έχουν προταθεί, έχουν επικριθεί από οικολόγους και ειδικούς επιστήμονες, όσον αφορά στις δυνατότητες διαρροής. Δεδομένου ότι η οριστική λύση της αποθήκευσης των αποβλήτων απαιτεί πολύχρονα και πολυέξοδα πειράματα, έχει προταθεί σαν εναλλακτική λύση η προσωρινή αποθήκευση τους στους χώρους παραγωγής αποβλήτων, μέχρις ότου βρεθεί γενικά αποδεκτή λύση. Οι σουηδικές εταιρίες αντιδραστήρων έχουν προτείνει την αποθήκευση των αποβλήτων για 40 χρόνια σε υπόγειες δεξαμενές νερού και στη συνέχεια συμπίκνωση σε χάλκινα δοχεία και την τοποθέτηση τους σε κοιλάτες βράχων σε βάθος 500 μέτρων. Αντίστοιχα, οι ΗΠΑ έχουν προτείνει τη συμπίκνωση των αποβλήτων και τη σύντηξη τους με γυαλί και την εν συνεχεία αποθήκευση τους σε αλατορυχεία<sup>90 140</sup>.

#### **12.2.8 Επαγγελματική έκθεση**

Οι εργαζόμενοι στους πυρηνικούς σταθμούς, στις ιατρικές εφαρμογές των ακτινοβολιών, στις βιομηχανίες παραγωγής λιπασμάτων εκτίθενται σε αυξημένες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας. Στη Βρετανία, ο αριθμός των εργαζομένων στους πυρηνικούς σταθμούς και στις βιομηχανίες, που χρησιμοποιούν τεχνητά ραδιοϊσότοπα ξεπερνά τους 250000. Οι ρυθμοί ισοδύναμης δόσης για τους εργαζόμενους είναι: 2.0 mSv/χρόνο για τους εργαζόμενους σε πυρηνικά κέντρα, 0.6 mSv/χρόνο για εργαζόμενους σε βιομηχανίες, που χρησιμοποιούν ραδιονουκλίδια και 0.2 mSv/χρόνο για τους εργαζόμενους σε νοσοκομεία. Η μέση τιμή της ετήσιας επαγγελματικής δόσης για τους εργαζόμενους στη Βρετανία είναι 1.1 mSv, ενώ το ετήσιο όριο δόσης είναι 50 mSv. Η μέση ετήσια επαγγελματική δόση για όλο τον πληθυσμό της Βρετανίας είναι 5 mSv<sup>90 141</sup>.

#### **12.2.9 Άλλες πηγές (Πυρηνοκίνητα πλοία - Υποβρύχια - Δορυφόροι)**

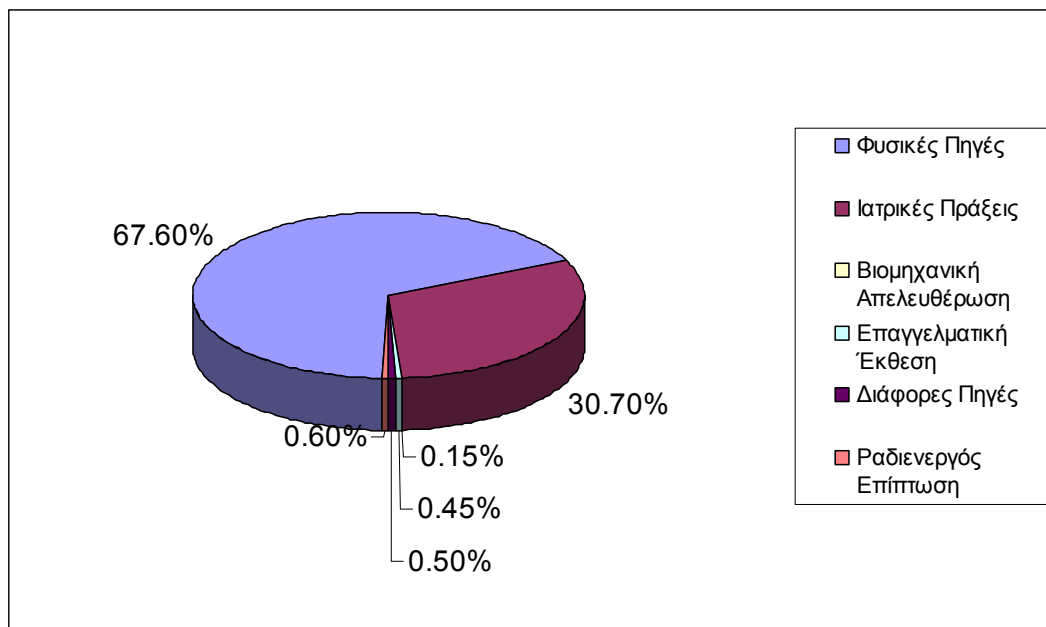
Πυρηνοκίνηση είναι η χρήση πυρηνικού αντιδραστήρα, για να κινηθούν μεταφορικά οχήματα. Χρειάζονται πολύ μικρές ποσότητες πυρηνικού καυσίμου και δεν απαιτείται η αντικατάστασή του συχνά. Ένας μικρός πυρηνικός αντιδραστήρας έχει μερικά πλεονεκτήματα για τη μεταφορά ανθρώπων και υλικών.

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλοία, αεροπλάνα και πυραύλους, όταν το κόστος δεν είναι τόσο σημαντικό, όσο η ανάγκη να διανυθούν μεγάλες αποστάσεις και για μεγάλες

χρονικές περιόδους χωρίς τροφοδοσία σε καύσιμα. Η πυρηνική ενέργεια δεν είναι πρακτική για μικρά οχήματα εδάφους, λόγω της απαιτούμενης προστατευτική θωράκισης, που είναι ογκώδης<sup>142</sup>.

Το ναυτικό των ΗΠΑ έχει πολλά πλοία που είναι πυρηνοκίνητα. Η πυρηνοκίνηση χρησιμοποιήθηκε πρώτα σε υποβρύχια. Έχουν κατασκευαστεί δοκιμαστικά πρότυπα δυο πυρηνικών κινητήρων αεροπλάνων. Στη δεκαετία του '60 οι ΗΠΑ ανέπτυξαν έναν πυρηνικό αντιδραστήρα κατάλληλο για προώθηση πυραύλων. Στη δεκαετία του '90 γίνονταν συζητήσεις μεταξύ επιστημόνων και περιβαλλοντολόγων για το αν θα έπρεπε να επιτρέπονται πυρηνοκίνητα διαστημικά οχήματα<sup>97 98</sup>.

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η εκατοστιαία συνολική ετήσια δόση από διάφορες πηγές έκθεσης σε ακτινοβολία (Εικόνα 12.1).



Εικόνα 12.1: Εκατοστιαία ετήσια δόση από διάφορες πηγές έκθεσης σε ακτινοβολία

### 13 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 13.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα πυρηνικά φαινόμενα, όπως η πυρηνική διάσπαση ή η εκπομπή σωματιδίων από ένα στόχο, που έχει ακτινοβοληθεί, συμβαίνουν τυχαία. Αποδεικνύεται ότι η ραδιενέργεια  $R$  ενός δείγματος σε χρόνο  $t$  δίνεται από τη σχέση:

$$R_t = \frac{dN_t}{dt} = -\lambda N_t$$

Η σχέση αυτή συμφωνεί με τις παρατηρήσεις ότι η ραδιενέργεια είναι πυρηνικό φαινόμενο (εκπομπή ενός σωματιδίου από έναν ατομικό πυρήνα), ότι είναι ανάλογη με το ρυθμό μείωσης του αριθμού  $N_t$  των υποψήφιων να διασπαστούν πυρήνων και ότι ο ρυθμός μείωσης ακολουθεί εκθετική συνάρτηση:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

όπου  $N_0$  : Ο αριθμός των υποψήφιων να διασπαστούν πυρήνων σε χρόνο  $t = 0$ ,

$\lambda$  : Η σταθερά ραδιενεργού διασπάσεως που σχετίζεται με την πιθανότητα ενός πυρήνα να διασπαστεί.

Ο χρόνος  $t_{1/2}$ , στον οποίο μισά από τα άτομα διασπώνται λέγεται χρόνος ημιζωής. Η σχέση του  $t_{1/2}$  με τη σταθερά  $\lambda$  βρίσκεται αν στην τελευταία εξίσωση αντικατασταθεί  $N_t = N_0 / 2$  και  $t = t_{1/2}$ , οπότε:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln \frac{1}{2} = \lambda t_{1/2} \Rightarrow t_{1/2} = 0.693 \lambda$$

Στο σημείο αυτό και σύμφωνα μ' αυτά που θα εκτεθούν παρακάτω θα πρέπει να εξηγηθούν οι έννοιες ρυθμός διασπάσεως (disintegration rate) και ρυθμός κρούσεων (counting rate). Ο ρυθμός κρούσεων που καταγράφουμε (απαριθμούμε) σε μια διάταξη μέτρησης ραδιενέργειας δεν ταυτίζεται πάντοτε με τον πραγματικό αριθμό των πυρηνικών συμβάντων. Ο ρυθμός κρούσεων είναι ένα σύνολο ηλεκτρικών σημάτων που παράγει ο ανιχνευτής και καταγράφει ο απαριθμητής, αποτελεί δε μέτρο του πραγματικού ρυθμού διασπάσεων, που μπορεί όμως να είναι μικρότερος ή μεγαλύτερος αριθμός απ' αυτόν που εκφράζει τις πραγματικές πυρηνικές διασπάσεις. Το αποτέλεσμα αυτό εκφράζεται σε κρούσεις ανά λεπτό cpm (counts per minute) ή κρούσεις ανά δευτερόλεπτο cps (counts per second).

### 13.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΜΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η τυχαία φύση του φαινομένου της πυρηνικής διάσπασης έχει σαν συνέπεια την αναγκαιότητα συλλογής μεγάλου αριθμού συμβάντων προκειμένου να υπολογιστεί με ακρίβεια η ραδιενέργεια ενός δείγματος. Κατά τη μέτρηση της ραδιενέργειας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράγοντες που υπεισέρχονται στη μέτρηση:

- I. Το σωματίδιο ή κβάντο που εκπέμπεται από το δείγμα δεν φθάνει πάντοτε στο δραστικό χώρο του ανιχνευτή, λόγω πιθανής απορρόφησης του από το παράθυρο του ανιχνευτή ή ακόμη και από το στρώμα του αέρα που μεσολαβεί στη διαδρομή του προς αυτόν.
- II. Ο ανιχνευτής δεν έχει συντελεστή απόδοσης 1. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε σωματίδιο που εκπέμπεται από το δείγμα δεν δίνει οπωσδήποτε μια και μόνο ηλεκτρική ώθηση. Μερικά σωματίδια είναι δυνατό να μην καταγραφούν από τον ανιχνευτή και άλλα να δώσουν περισσότερες από μια κρούσεις, λόγω παράλληλων δευτεροταγών φαινομένων.
- III. Το ίδιο δείγμα αυτοαπορροφά ένα ποσοστό των εκπεμπόμενων σωματιδίων ή κβάντων πριν αυτά φθάσουν στον δραστικό χώρο του ανιχνευτή. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε δείγμα έχει πεπερασμένο πάχος.
- IV. Λόγω της γεωμετρικής διατάξεως δείγματος – ανιχνευτή, φθάνουν σ' αυτόν μόνο εκείνα τα σωματίδια που περιέχονται μέσα σε μια ορισμένη στερεά γωνία, που μπορεί να είναι μικρότερη από 4π.
- V. Σε περίπτωση ισχυρών ραδιενεργών δειγμάτων ο ανιχνευτής δεν μπορεί να διακρίνει ξεχωριστά όλα τα πυρηνικά συμβάντα, γιατί αυτά φθάνουν με ρυθμό πολύ μεγαλύτερο απ' ό,τι επιτρέπει η διακριτική ικανότητα του.
- VI. Στατιστικοί νόμοι επιτρέπουν την πρόβλεψη του μεγέθους της απόκλισης γύρω από την αληθή τιμή της ραδιενέργειας καθώς και την πιθανότητα να παρατηρηθεί μια δεδομένη απόκλιση από την αληθή τιμή.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο ρυθμός κρούσεων που καταγράφονται από μια μετρητική διάταξη ραδιενέργειας δεν είναι πάντοτε ίσος με τον πραγματικό αριθμό διασπάσεων των ραδιενεργών πυρήνων ενός δείγματος. Αν παραστήσουμε με  $I$  τον αριθμό κρούσεων στη μονάδα του χρόνου και με  $R$  τη ραδιενέργεια του δείγματος, δηλαδή τον πραγματικό αριθμό των διασπάσεων στη μονάδα του χρόνου, τότε μεταξύ αυτών των δυο μεγεθών υπάρχει η εξής σχέση:

$$I = nR + U$$

Όπου  $n$  είναι ένας συντελεστής που περιλαμβάνει όλους τους παράγοντες, που προαναφέρθηκαν και που υπεισέρχονται στη μέτρηση.  $U$  είναι το υπόστρωμα (background), δηλαδή παράσιτες κρούσεις που καταγράφονται από το μετρητή και που δεν έχουν καμιά σχέση με το μετρούμενο δείγμα. Συνήθως είναι ηλεκτρονικοί θόρυβοι ή κρούσεις που οφείλονται στην κοσμική ακτινοβολία που φθάνει στον ευαίσθητο χώρο του ανιχνευτή.

Ο συντελεστής  $n$  είναι συνήθως μικρότερος από τη μονάδα και μπορεί να υπολογιστεί απ' τη σχέση:

$$n = n_0(1-a)(1-s)(1-r)g$$

όπου οι παράγοντες  $n_0$ ,  $(1-a)$ ,  $(1-s)$ ,  $(1-r)$ ,  $g$  έχουν σχέση με τις «ατέλειες» που εισάγονται κατά τη μέτρηση.

$N_D$  : Συντελεστής των κρούσεων που δίνει ο ανιχνευτής για κάθε σωματίδιο ή κβάντο.

$a$  : Το ποσοστό απορρόφησης της ακτινοβολίας από το παράθυρο του ανιχνευτή.

$s$  : Το ποσοστό της αυτοαπορρόφησης της μετρούμενης ακτινοβολίας από το δείγμα (λόγω του πεπερασμένου πάχους του).

$r$  : Ο νεκρός χρόνος του ανιχνευτή, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται να επανέλθει στην κανονική του κατάσταση μετά τη μέτρηση ενός σωματιδίου ή ενός κβάντου. Όσο πιο μικρός είναι ο χρόνος αυτός, τόσο οι απώλειες λόγω συμπτώσεων είναι μικρότερες.

$g$  : Ο γεωμετρικός παράγοντας, που εξαρτάται από τη γεωμετρική διάταξη του ανιχνευτή σε σχέση με το δείγμα (σχήμα).

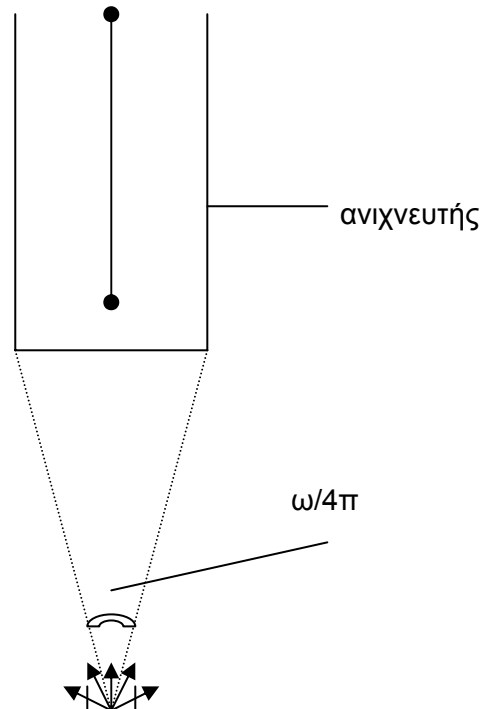
Για ανιχνευτές Geiger – Muller και ανιχνευτές σπινθηρισμού με κρύσταλλο η τιμή του  $g$  είναι περίπου 0.1. Για έναν ανιχνευτή ιονισμού  $2\pi$  το  $g$  είναι περίπου 0.5, ενώ για ανιχνευτές  $4\pi$ , για ανιχνευτές υγρών φθοριστών και για κρυστάλλους NaI τύπου πηγαδιού το  $g$  είναι περίπου 1. Ο γεωμετρικός παράγοντας  $g$  μπορεί να προσδιοριστεί με μέτρηση προτύπων δειγμάτων.

Η τιμή του συντελεστή αυτοαπορρόφησης  $s$  εξαρτάται απ' το είδος της μετρούμενης ακτινοβολίας. Για  $\gamma$ -ακτινοβολία ισχύει  $s \approx 0$ . Για  $\beta$ -ακτινοβολία έχει σημασία το πάχος του παρασκευάσματος και για πολύ λεπτά παρασκευάσματα η τιμή του  $s$  τείνει πάλι προς το μηδέν. Για  $\beta$ -ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας και για  $\alpha$ -ακτινοβολία, ακόμη και για λεπτά παρασκευάσματα, το σφάλμα από αυτοαπορρόφηση της ακτινοβολίας γίνεται σημαντικά μεγάλο.

Ο διορθωτικός συντελεστής  $r$  (νεκρός χρόνος του ανιχνευτή) παίζει σημαντικό ρόλο στους ανιχνευτές Geiger – Muller, οι οποίοι είναι σχετικά αργοί ανιχνευτές. Στους άλλους ανιχνευτές το σφάλμα αυτό είναι σημαντικό μόνο για δείγματα πολύ υψηλής ραδιενέργειας. Η διόρθωση για την απώλεια κρούσεων λόγω του  $r$  μπορεί να γίνει γραφικά ή υπολογιστικά απ' τη σχέση:

$$I = \frac{I'}{1 - I'r} I$$

( $r$  ο νεκρός χρόνος σε μονάδες χρόνου,  $I'$  ο μετρούμενος αριθμός κρούσεων και  $I$  ο ρυθμός κρούσεων αν δεν υπήρχαν απώλειες, λόγω νεκρού χρόνου).



Για να διορθώσουμε τις απώλειες λόγω συμπτώσεων, όταν η ραδιενέργεια του δείγματος είναι υψηλή υπάρχουν δυο μέθοδοι προσδιορισμού του  $r$ :

- Η κατασκευή μιας καμπύλης αναφοράς με σειρά δειγμάτων που παίρνουμε με αραίωση του ισχυρού δείγματος ή με μια σειρά προτύπων δειγμάτων γνωστής ραδιενέργειας.
- Η μέτρηση δυο δειγμάτων πρώτα χωριστά και κατόπιν και των δυο μαζί. Στη δεύτερη περίπτωση ο νεκρός χρόνος του ανιχνευτή ή ο χρόνος διάκρισης δυο κρούσεων  $r$  δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{I_1 + I_2 - I_{1,2} - U}{2I_1I_2}$$

όπου  $I_1$ ,  $I_2$  είναι οι ρυθμοί κρούσεων με το υπόστρωμα για τα δείγματα 1 και 2 αντίστοιχα και  $I_{1,2}$  είναι ο ρυθμός κρούσεων των δυο δειγμάτων μαζί και με το υπόστρωμα  $U$ . Ο ρυθμός κρούσεων για το υπόστρωμα  $U$  προσδιορίζεται με ξεχωριστό πείραμα.

Στην περίπτωση σχετικών μετρήσεων, οπότε το άγνωστο και το πρότυπο δείγμα μετρούνται με την ίδια μετρητική διάταξη και στις ίδιες συνθήκες, οι τιμές των παραγόντων  $n_D$ ,  $g$  και  $a$  παραμένουν ίδιες. Όταν συγκρίνονται δείγματα με ραδιενέργεια  $\alpha$ - και  $\beta$ - πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η διαφορετική τιμή του  $s$  για τις δυο ακτινοβολίες. Στην

περίπτωση απόλυτων μετρήσεων, οι τιμές όλων των παραγόντων που εισέρχονται στη σχέση  $n = n_0 (1-a) (1-s) (1-r) g$  πρέπει να είναι γνωστές με ακρίβεια. Για την ακρίβεια του αποτελέσματος μεγάλη σημασία έχει και το στατιστικό σφάλμα, το οποίο μελετάται παρακάτω.

### 13.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Επειδή η ραδιενεργός διάσπαση είναι ένα τυχαίο φαινόμενο (δηλαδή δε γνωρίζουμε ακριβώς πότε ένας συγκεκριμένος πυρήνας θα διασπαστεί, αλλά μόνο την πιθανότητα να συμβεί αυτό), οι ρυθμοί διασπάσεων θα δείχνουν τις διακυμάνσεις που προβλέπονται από τη στατιστική του φαινομένου. Ο τυχαίος χαρακτήρας της ραδιενεργού εκπομπής αποδείχτηκε από παρατηρήσεις των διακυμάνσεων του αριθμού των σωματιδίων που εκπέμπονται από μια ραδιενεργό πηγή σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Αν  $\mu$  είναι ο αναμενόμενος αριθμός των διασπάσεων, η πιθανότητα να παρατηρηθούν  $X$  διασπάσεις υπολογίζεται από τη σχέση που περιγράφει την κατανομή Poisson για τα τυχαία φαινόμενα:

$$P_{(\mu,n)} = \frac{\mu^x e^{-\mu}}{x!}$$

Στην πραγματικότητα οι πυρηνικές διασπάσεις ακολουθούν μια διωνυμική κατανομή, όπου ο αριθμός των πυρήνων που πρόκειται να διασπαστούν είναι πάρα πολύ μεγάλος και η πιθανότητα να συμβεί αυτό είναι πολύ μικρή. Η τυπική απόκλιση για μια διωνυμική κατανομή δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sqrt{npq}$$

Στην περίπτωση των πυρηνικών διασπάσεων το  $n$  είναι ο αριθμός  $N_0$  των υποψηφίων να διασπαστούν πυρήνων,  $p$  είναι η πιθανότητα να διασπαστεί και  $q$  η πιθανότητα να μη διασπαστεί ένας συγκεκριμένος πυρήνας. Άρα ισχύει:

$$p = \frac{M}{N_0} = \frac{N_0 - N_t}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$q = 1 - p = 1 - (1 - e^{-\lambda t}) = e^{-\lambda t}$$

Το  $M$  είναι ο αριθμός των πυρήνων που έχουν διασπαστεί στον χρόνο  $t$ . Μετά από αντικαταστάσεις η σχέση για την τυπική απόκλιση γίνεται:

$$\sigma_M = \sqrt{N_0(1 - e^{-\lambda t})e^{-\lambda t}} = \sqrt{Me^{-\lambda t}}$$

Στην πράξη το  $λt$  είναι συνήθως μικρό (ο χρόνος μέτρησης είναι μικρός σε σχέση με την περίοδο ημιζωής) και σαν συνέπεια ο παράγων  $e^{-λt} \rightarrow 1$ , όταν  $λt \rightarrow 0$ . Η τελευταία σχέση γράφεται ως εξής:

$$\sigma_M = \sqrt{M}$$

και δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της τυπικής απόκλισης από τον ίδιο τον αριθμό των συμβάντων, που έχουν απαριθμηθεί. Βλέπουμε εδώ ένα παράδειγμα μιας πολύ ενδιαφέρουσας ιδιότητας της διωνυμικής κατανομής που επαληθεύεται και στην κατανομή Poisson. Η ιδιότητα αυτή αφορά στην απλή σχέση μεταξύ της αληθούς τιμής και της αληθούς παραλλακτικότητας  $\sigma^2$  για τις κατανομές αυτές. Συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι ότι μια και μόνο μέτρηση ραδιενέργειας μας δίνει μια εκτίμηση για την αληθή τιμή  $\mu$  ( $\mu = M/t$ ) και την τυπική απόκλιση  $\sigma_\mu$  ( $\sigma_\mu \approx \sqrt{M/t}$ ). Αυτό δε συμβαίνει σε φαινόμενα που υπακούουν τη συνήθη κατανομή Gauss. Για παράδειγμα η τυπική απόκλιση μιας ανάγνωσης αναλογικών οργάνων, όπως ενός θερμομέτρου, μιας προχοϊδας, ενός κανόνα για μέτρηση τιμών, ενός βολτομέτρου κλπ, δεν μπορεί να εκτιμηθεί μόνο με μια μέτρηση και οπωσδήποτε δεν είναι ίση με την τετραγωνική ρίζα της τιμής του μεγέθους που μετράμε.

Το ερώτημα που τίθεται στη συνέχεια είναι ποιο θα είναι το αποτέλεσμα για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης  $\sigma'$  ένα πείραμα, στο οποίο ο χρόνος μέτρησης  $t$  είναι σχετικά μεγάλος, συγκρινόμενος με το χρόνο ημιζωής  $t_{1/2}$ . Είναι εύκολο να συμπεράνουμε ότι, όταν  $λt \rightarrow \infty$  τότε το  $e^{-λt} \rightarrow 0$  και ότι το όριο του  $\sigma = \sqrt{[\mu e^{-λt}]}$  θα είναι μηδέν. Η φυσική σημασία του αποτελέσματος αυτού είναι προφανής. Ας ξεκινήσουμε με  $N_0$  άτομα και περιμένουμε τόσο χρόνο ώστε να διασπαστούν όλοι οι πυρήνες, τότε ο αριθμός των διασπάσεων που θα απαριθμήσουμε θα είναι  $N_0$  και δεν θα υπάρχει διακύμανση στην τιμή αυτή.

Η σχέση του  $\sigma_M$  μας φανερώνει ότι οι ρυθμοί διασπάσεως που προσδιορίζουμε όταν μετρούμε ραδιενεργά δείγματα είναι τόσο πιο ακριβείς, όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των συμβάντων που απαριθμούμε για να τους υπολογίσουμε. Έτσι, για αριθμό κρούσεων  $M = 100$  που απαριθμούνται σε ένα λεπτό, η τυπική απόκλιση θα είναι  $\sigma = \sqrt{100} = 10$  και άρα το αποτέλεσμα θα πρέπει να δοθεί ως  $I = 100 \pm 10$  cpm (υποτίθεται ότι  $U = 0$ ).

Για αριθμό κρούσεων  $M = 10000$  σε χρόνο  $t = 100$  min, η τυπική απόκλιση για το αποτέλεσμα θα είναι  $\sigma_M = \sqrt{10000} = 100$  και ο αριθμός διασπάσεως θα γραφεί ως  $I = (10000 \pm 1000) / 100 = 100 \pm 1$  cpm ( $I = M / t$ ). Για την τυπική απόκλιση του ρυθμού κρούσεων  $I$  ισχύει:

$$\sigma_I = \frac{\sqrt{M}}{t} = \frac{\sqrt{It}}{t} = \sqrt{\frac{I}{t}}$$

Η σχέση αυτή φανερώνει ότι το σφάλμα για τον προσδιορισμό του  $I$  γίνεται τόσο μικρότερο, όσο πιο μεγάλος είναι ο χρόνος μέτρησης  $t$  και ότι μπορεί να ελαττωθεί απεριόριστα. Επειδή

ο ρυθμός των κρούσεων του υποστρώματος  $U$  υπόκειται επίσης σε στατιστικές διακυμάνσεις θα πρέπει πάντοτε και το σφάλμα από τη μέτρηση του υποστρώματος να λαμβάνεται υπόψη.

Επειδή η πραγματική τιμή της ραδιενέργειας υπολογίζεται από τη σχέση  $R = I - U$  (όταν το  $n = 1$ ), η τυπική απόκλιση για τη μέτρηση του  $R$  θα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_U^2}$$

Η τυπική απόκλιση του υποστρώματος υπολογίζεται από τη σχέση  $\sigma_U = \sqrt{U / t}$ , όπου  $t$  είναι ο χρόνος μέτρησης του υποστρώματος και  $U$  είναι ο αριθμός των κρούσεων, που οφείλονται στο υπόστρωμα, στη μονάδα του χρόνου.

Το υπόστρωμα αποκτά σημαντικότητα κατά τις μετρήσεις ραδιενέργειας, όταν ο λόγος  $I / U$  είναι μικρότερος του 20, διότι τότε είναι δύσκολο να μετρήσουμε το δείγμα με ακρίβεια, όταν ο ρυθμός διασπάσεως είναι μόλις λίγο μεγαλύτερος από το ρυθμό του υποστρώματος. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να προκαθορίσουμε το λόγο των χρόνων μετρήσεως του υποστρώματος  $t_U$  και του δείγματος  $t_I$  από τη σχέση:

$$\frac{t_U}{t_I} = \sqrt{\frac{U}{I}}$$

Τα μεγέθη  $U$  και  $I$  προσδιορίζονται με προκαταρκτικά πειράματα.

### 13.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

(1) Μέτρηση δείγματος για 10 min έδωσε 1600 διασπάσεις συνολικά. Το υπόστρωμα μετρήθηκε για 15 min και καταγράφηκαν συνολικά 450 κρούσεις. Να βρεθεί η ραδιενέργεια  $R$  του δείγματος σε dpm (διασπάσεις ανά λεπτό).

$$I = 1600 / 10 \text{ cpm} \quad \sigma_I = \sqrt{1600 / 10} = 4 \text{ cpm}$$

$$U = 450 / 15 = 30 \text{ cpm} \quad \sigma_U = \sqrt{450 / 15} = 1.41 \text{ cpm}$$

$$R = I - U = (160 - 30) \text{ dpm} = 130 \text{ dpm}$$

$$\sigma_R = \sqrt{[\sigma_I^2 + \sigma_U^2]} = \sqrt{[4^2 + (1.2)^2]} = 4.2$$

$$\text{Το αποτέλεσμα θα δοθεί ως } R = (130 \pm 4.2) \text{ dpm}$$

(2) Ραδιενεργό δείγμα μετράται με ανιχνευτή που έχει νεκρό χρόνο  $\tau = 200 \text{ } \mu\text{sec}$ . Όταν μετρήσουμε το ρυθμό διασπάσεων του δείγματος βρίσκουμε  $I' = 30000 \text{ cpm}$ . Ποιο το ποσοστό των απωλειών λόγω συμπτώσεων;

$$I = \frac{I'}{1 - I'r} = \frac{30000}{1 - 30000 \left[ 200 \times \frac{10^{-6}}{60} \right]} = 33333 \text{rpm}$$

$$\text{ποσοστο απωλειών} = \frac{I - I'}{I} \times 100\% = 10\%$$

## 14 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΔΙΑΧΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

### 14.1 ΔΙΑΧΥΣΗ

Η θεωρία της μεταφοράς μάζας είναι ανάλογη αυτής της μεταφοράς θερμότητας κι ορμής. Όπως η μεταφορά θερμότητας, έτσι κι η μεταφορά μάζας αποτελεί μια πολύπλοκη διεργασία. Πρόκειται για μεταφορά ουσίας από τη μια φάση στην άλλη, διαμέσου μιας επιφάνειας, η οποία χωρίζει τις δυο στοιβάδες και καλείται διαχωριστική επιφάνεια ή διεπιφάνεια.

Η διεύθυνση μεταφοράς μάζας εξαρτάται από την επικρατούσα στο σύστημα κατάσταση, σε σχέση με αυτή της ισορροπίας. Το συστατικό, το οποίο κατανέμεται, μεταφέρεται από τη φάση στην οποία η συγκέντρωση του είναι μεγαλύτερη αυτής, που αντιστοιχεί στην ισορροπία, προς τη φάση όπου η συγκέντρωση του είναι μικρότερη αυτής που αντιστοιχεί στην ισορροπία. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας θα είναι τόσο μεγαλύτερος, όσο μεγαλύτερη είναι η απομάκρυνση του συστήματος από την ισορροπία.

Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας εξαρτάται κι από το μηχανισμό μεταφοράς. Δυο είναι οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς μάζας μέσα σε μια απλή φάση:

- Η μοριακή διάχυση
- Η τυρβώδης διάχυση

Ο μηχανισμός της μοριακής διάχυσης επικρατεί, είτε σε μια ακίνητη φάση, είτε όταν υπάρχει ροή φάσης, όπου επικρατεί και μεταφορά μάζας, λόγω υδραυλικής ροής (ή επαφής ή φυσικής ανάμιξης) στη λεπτή ιξώδη υποστοιβάδα διαχύσεως, η οποία εφάπτεται στη διεπιφάνεια. Ο μηχανισμός της τυρβώδους διαχύσεως επικρατεί περισσότερο στο στροβιλώδη πυρήνα ροής της κινούμενης φάσης.

Γενικά, τρεις μπορεί να είναι οι αιτίες διαχύσεως:

- Η διαφορική κλίση συγκέντρωσης
- Η διαφορική κλίση ολικής πίεσης, οπότε πρόκειται για διάχυση πίεσης
- Η διαφορική κλίση θερμοκρασίας. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται για θερμική διάχυση, κατά την οποία το βαρύτερο συστατικό ενός μίγματος συγκεντρώνεται στη ψυχρή επιφάνεια κι αντίθετα το ελαφρύτερο συστατικό στη θερμή.

## 14.2 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

Προσρόφηση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ορισμένα μόρια ή άτομα αερίου ή υγρού δεσμεύονται πάνω σε μια στερεή επιφάνεια, ή γενικότερα σε οποιαδήποτε διεπιφάνεια, η οποία χωρίζει δυο φάσεις. Η δέσμευση αυτή μπορεί να οφείλεται σε φυσικές ή χημικές δυνάμεις, οπότε πρόκειται για φυσική ή χημική διάχυση, αντίστοιχα. Στη φυσική προσρόφηση οι δεσμοί, που δημιουργούνται μεταξύ του στερεού και των προσροφούμενων σωματιδίων οφείλονται σε δυνάμεις Van der Waals κι είναι ασθενείς δεσμοί της τάξης των 20 - 50 kJ/mole. Αντίθετα, στη χημική προσρόφηση (ή χημειορόφηση) οι δεσμοί, που δημιουργούνται μεταξύ των προσροφούμενων μορίων και των ατόμων της προσροφούσας επιφάνειας είναι ισχυροί δεσμοί της τάξης των 200 - 400 kJ/mole. Στο πίνακα που ακολουθεί επιχειρείται η σύγκριση φυσικής προσρόφησης και χημειορόφησης με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου.

	Φυσική προσρόφηση	Χημική προσρόφηση
Προσροφητικό	Όλα τα στερεά	Μερικά στερεά
Προσροφούμενο	Όλα τα αέρια κάτω από το κρίσιμο σημείο	Μερικά χημικώς δραστικά αέρια
Περιοχή θερμοκρασιών	Μικρή θερμοκρασία	Μεγάλη θερμοκρασία
Θερμότητα προσροφήσεως	Μικρή, περίπου ίση με $\Delta H_{\text{υγρού}}$ , πάντα εξώθερμη	Μεγάλη, ίση περίπου με την ενθελπία αντίδρασης, εξώθερμη
Ταχύτητα προσροφήσεως και ενέργεια ενεργοποιήσεως	Μεγάλη ταχύτητα, μικρή ενέργεια	Μη ενεργοποιημένη - μικρή $E_a$ ή ενεργοποιημένη - μεγάλη $E_a$
Κάλυψη επιφάνειας	Πολλά στρώματα	Μονοστρώμα

## 15 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- <sup>1</sup>. Pentreath, R.J., "Nuclear Power, Man and the Environment", Taylor & Francis LTD, London, **1980**.
- <sup>2</sup>. Βεργανελάκης, Α. 'Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες και Ζωντανοί Οργανισμοί'. Στο: "Εμείς και η Ραδιενέργεια", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, **1989**.
- <sup>3</sup>. Heitler, Walter, 'The Quantum Theory of Radiation', 3<sup>rd</sup> Edition, Oxford: Clarendon Press, **1954**.
- <sup>4</sup>. Hall, Eric J., 'Radiation and Life'. College of Physicians and Surgeons, Columbia University, New York, **1995**.
- <sup>5</sup>. Etter, Lewis Elmer, 'The Science of Ionizing Radiation, Springfield Ill': C. C. Thomas, 1965.
- <sup>6</sup>. Berthelot, Andre, 'Radiations & Matter', London: L. Hill, **1958**.
- <sup>7</sup>. Οικονόμου, Λ., 'Θνητοί Πυρήνες και Ραδιενέργεια'. Στο: "Εμείς και η Ραδιενέργεια", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, **1989**.
- <sup>8</sup>. Valkovibc, Vlado, 'Radioactivity in the Environment', New York: Elsevier Science B. V., **2000**.
- <sup>9</sup>. L' Annuziata, Michael F., 'Handbook of Radioactivity Analysis', San Diego: Academic Press, **1998**.
- <sup>10</sup>. Draganic, Ivan G. *et al.*, 'Radiation and Radioactivity on Earth and Beyond', Boca Raton, Fla: CRC Press, **1990**.
- <sup>11</sup>. Lapp, Ralph Eugene & Andrews, Howard L., 'Nuclear Radiation Physics', 4<sup>th</sup> Edition, London: Pitman, **1972**.
- <sup>12</sup>. Kerr, G.D., *Health Phys.*, **1988**, 55 (2), 241.
- <sup>13</sup>. Davis, J.J., Cesium and its relationships to potassium in ecology, in Radioecology, ed. V. Scultz & A.W. Klement Reinhold, New York, **1963**.
- <sup>14</sup>. Greenwood, N.N. & Earnshaw, A., Chemistry of the elements, Pergamon Press, Oxford, **1984**.
- <sup>15</sup>. Alberts, J.J., Tilly, L.J. & Vigerstad, T.J., *Science*, **1979**, 203, 649-651.
- <sup>16</sup>. Komarov, E. & Bennett B.G., Selected Radionuclides, World Health Organization, Geneva, **1983**.
- <sup>17</sup>. U.S.E.P.A., Identification and description of mineral processing sectors and waste streams, Office of solid wastes, **1998**.
- <sup>18</sup>. U.S. Department of Health and Human Services, Toxicological profile for cesium, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, **2001**.
- <sup>19</sup>. Buesseler, K.O., *Oceanus*, **1987**, 30 (3), 24 – 30.

- 
- <sup>20</sup>. Crouch, E.A.C., Fission product yields from neutron induced fission. Atomic data and nuclear data tables, Academic Press, New York, **1977**, 19, No 5.
- <sup>21</sup>. Dahlgaard, H., *J. Environ. Radioact.*, **1994**, 25, 37-55.
- <sup>22</sup>. Kritidis, P. and Florou, H., *J. Environ. Radioact.*, **1995**, 38 (3), 285-293.
- <sup>23</sup>. McDonald, P., Cook, G.T., Baxter, M.S. & Thomson, J.C., *J. Environ. Radioact.*, **1990**, 12, 285-298.
- <sup>24</sup>. Allott, R.W., Kelly, M. & Hewitt, N., *Environ. Sci. Technol.*, **1992**, 26, 2142-2147.
- <sup>25</sup>. McKenzie, A.B. & Scott, R.D., *Environ. Geochem. Health*, **1993**, 15, 173-184.
- <sup>26</sup>. Harjula, R. & Lehto, J., *Nucl. Chem. Waste Manage.*, **1986**, 6, 133-139.
- <sup>27</sup>. Macaskie, L.E., *Rev. Biotechnol.*, **1991**, 11, 41-112.
- <sup>28</sup>. Cambray, R.S., Cawse, P.A., Garland, J.A., Gibson, J.A.B., Johnson, P., Lewis, G.N.J., Newton, D., Salmon, L. & Wade, B.O., *Nucl. Energy*, **1987**, 26, 77-101.
- <sup>29</sup>. McGee, E.J., Colgan, P.A., Keatinge, M., Horrill, A.D., Kennedy, V.H., Johanson, K.J., Aarkrog, A. & Nielsen, S.P., *Analyst*, **1992**, 117, 941-945.
- <sup>30</sup>. Devell, L., Tovedal, H., Bergstrom, U., Chyssler, J. & Andersson, L., *Nature*, **1986**, 321, 192-193.
- <sup>31</sup>. Fowler, S.W., Buat-Menard, P., Yokoyama, Y., Ballestra, S., Holm, E. & Nguyen, H.V., *Nature*, **1987**, 329, 56-58.
- <sup>32</sup>. Schimmack, W., Bunzi, K., Dietl, F. & Klotz, D., *J. Environ. Radioact.*, **1994**, 24, 53-63.
- <sup>33</sup>. Sloof, J.E. & Wolterbeek, H.T., *J. Environ. Radioact.*, **1992**, 16, 229-242.
- <sup>34</sup>. Bakken, L.R. & Olsen, R.A., *Can. J Microbiol.*, **1990**, 36, 704-710.
- <sup>35</sup>. Haselwandter, K., Berreck, M. & Brunner, P., *Trans. Br. Mycol. Soc.*, **1988**, 90, 171-174.
- <sup>36</sup>. Elster, E.F., Fink, R., Holl, W. Lengfelder, E. & Ziegler, H., *Oecologia*, **1987**, 73, 553-558.
- <sup>37</sup>. Pietzrak-Flis, Z. & Krajewski, P., *Health Phys.*, **1994**, 67, 115-121.
- <sup>38</sup>. Aarkrog, A., Dahlgaard, H., Frissel, M., Foulquier, L., Kulikov, N.V., Molchanova, I.V., Myttenaere, C., Nielsen, S.P., Polikarpov, G.G. and Yushkov, P.I., *J. Environ. Radioact.*, **1992**, 15, 69-80.
- <sup>39</sup>. Egorov, V.N., Povinec, P.P., Polikarpov, G.G., Stokozov, N.A., Gulin, S.B., Kulebakina, L.G. & Osvath I., *J. Environ. Radioact.*, **1999**, 43, 137-155.
- <sup>40</sup>. Egorov, V.N., Polikarpov, G.G., Kulebakina, L.G., Stokozov, N.A. & Yevtusenko, D.B., *Water Resources*, **1993**, 20 (3), 326-330.
- <sup>41</sup>. Kritidis, P. & Florou, H., *Rapp. Comm. Int. Mer Medit.*, **1990**, 32 (1), 318.
- <sup>42</sup>. Florou, H., <sup>137</sup>Cs in the Aegean and Ionian Seas. Proc.Q Seminar on the Radiological Exposure of the population of the European Community from Radioactivity in the Mediterranean Sea, CEC, ENEA, Rome, 17-19 May **1994**, EUR 15564, 115-121.
- <sup>43</sup>. Zodiadis, G., *The Global Atmosphere and Ocean System*, **1994**, 2, 41-60.

- 
- <sup>44</sup>. Polikarpov, G.G., *J. Environ. Radioact.*, **1991**, 13, 25-28.
- <sup>45</sup>. Polikarpov, G.G., *Estuarine Coastal Science*, **1992**, 34, 315-320.
- <sup>46</sup>. Valukovski, S.M., Nikitin, A.I., Chumichev, V.B., Katrich, I.Y., Voitsekhovich, O.A., Medinets, V.I., Pisare, V.V., Bokvum, L.A., Klersonsky, E.S., *J. Environ. Radioact.*, **1994**, 23, 103-122.
- <sup>47</sup>. Bologna, A.S., *Stockholm Water Front*, **1998**, 1-2, 6-7.
- <sup>48</sup>. Othman, I., Vassine, T., Bhat, I.S., *Sci. Total Envir.*, **1994**, 153, 57-60.
- <sup>49</sup>. Florou, H., Kritidis, P., Vosniakos, F., Triandafyllis, J., Delfanti, R., Papucci, C., Cigna, A., Polikarpov, G., Egorov, V., Bologna, A., Patrasku, V., Caesium-137 Distribution in the Eastern Mediterranean and Black Sea-Sources and Marine Pathways. Proc.: 10<sup>th</sup> International Symposium of MESAEP, 2-6 October **1999**, Alicante, Spain.
- <sup>50</sup>. Florou, H., Polikarpov, G., Kritidis, P., Triulzi, C., Nonnis-Marzano, F., Radiological Assessment of Long-lived Radionuclides Transferred Through Aquatic Pathways, IAEA-CN-63/103, in. Proc.: EC/WHO/IAEA, International Conference 'One Decade After Chernobyl', Vienna, Austria, **1996**.
- <sup>51</sup>. Florou, H. & Kritidis, P., *Radiochimia Acta*, **1994**, 66-67, 415-417.
- <sup>52</sup>. Kritidis, P. & Florou, H. *Health Phys.*, **2001**, 80, 440-446.
- <sup>53</sup>. Florou, H., *Chemistry and Ecology*, **1996**, 12, 255.
- <sup>54</sup>. Papucci, C. & Defanti, R., *Sci. Total Envir.*, **1999**, 237, 67-75.
- <sup>55</sup>. Delfanti, R., Tsabaris, C., Papucci, C., Kaberi, H., Lorenzelli, R., Zervakis, V., Tangherlini, M., Georgopoulos, D., Re-distribution of <sup>137</sup>Cs Chernobyl Signal in the Aegean Sea, in. Book of Extended Synopses, International Conference on Isotopes in Environmental Studies-Aquatic Forum 2004, IAEA-CN-118, Monte Carlo, Monaco, 25-29 October **2004**.
- <sup>56</sup>. Battiston, G.A., Degetto, S., Gerbasi, R., Sbrignadello, G. & Tositti, I., *J Environ. Radioact.*, **1988**, 8, 183-191.
- <sup>57</sup>. Avery, Simon V., *J. Environ. Radioact.*, **1996**, 30 (2), 139-171.
- <sup>58</sup>. Brongersma – Sauders, M., Mass Mortality in the Sea. Treatise on marine ecology and radiology, Hedgpeth J.W., ed., 1, Geol. Soc. Am., **1957**.
- <sup>59</sup>. Polikarpov, G.G., Radioecology of Aquatic Organisms, edited by Schultz V., Klement A.W. Jr., p. 314, Reinhold New York, **1966**.
- <sup>60</sup>. Φλώρου, Ε.Γ., Συμπεριφορά και Κατανομή Μακρόβιων Ραδιονουκλιδίων στο Θαλάσσιο Οικοσύστημα του Ελλαδικού Χώρου, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Βιολογίας Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, **1992**.
- <sup>61</sup>. U.S.A.E.C., Ecological Aspects of the Nuclear Age. Selected readings in radiation ecology, U.S. Atomic Energy Commission technical information centre, **1959**.

- 
- <sup>62</sup>. Woodhead, D.S., Levels of Radioactivity in the Marine Environment and the Dose Commitment to Marine Organisms, I.A.E.A. – S.M. – 158/31, Vienna, **1973**.
- <sup>63</sup>. Bowen, V.T., Wong, K.M., & Noshkin, V.E., *J. Mar.*, **1971**, 29, 1.
- <sup>64</sup>. Denser, W.G., Brewer, P.G., Jickells, R. & Commeau, F., *Science*, **1983**, 219, 338.
- <sup>65</sup>. Fowler, S.W., Buat – Menard, P., Yokoyama, Y., Ballestra, S., Holm, E., Nguyen, V.H., *Nature*, **1987**, 329.
- <sup>66</sup>. Kautsky, H., *Deutch. Hydrogr.*, **1973**, 241, 2.
- <sup>67</sup>. Παπανικολάου, Ε., ‘Ραδιενεργός Ρύπανση Χερσαίου Οικοσυστήματος. Συνέπειες και Μέτρα’. Στο: “Εμείς και η Ραδιενέργεια”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, **1989**.
- <sup>68</sup>. Σδούκος Α.Θ., ‘Φυσικές Διεργασίες της Χημικής Τεχνολογίας’, τόμος Ι, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα, **1997**.
- <sup>69</sup>. Σδούκος Α.Θ., ‘Φυσικές Διεργασίες της Χημικής Τεχνολογίας’, τόμος ΙΙ, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα, **1997**.
- <sup>70</sup>. Mitchell, P.I., Vives i Batlle, J., Downes, A.B., Condren, O.M., Leon Vintro, L., Sanchez-Cabeza, J.A., *Appl. Radiat. Isot.*, **1995**, 46 (11), 1175-1190.
- <sup>71</sup>. Τραμπίδου, Γ.Δ., Ραδιολογική Έρευνα Περιοχών Ραδιενεργών Ιαματικών Πηγών, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Φυσικής Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, **2004**.
- <sup>72</sup>. Σκούλλος, Μ., Χημική Ωκεανογραφία, Γ’ έκδοση, Τμήμα Χημείας Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, **1997**.
- <sup>73</sup>. Σκούλλος, Μ., Χημική Ωκεανογραφία, Μέρος Β’, Τμήμα Χημείας Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, **1998**.
- <sup>74</sup>. Προυκάκης, Χ., ‘Πυρηνικά Ατυχήματα. Κίνδυνοι και Προστασία της Υγείας’, Εκδόσεις Παρισιανός, **1987**.
- <sup>75</sup>. Upton, Arthur C., *Health Phys.*, **2003**, 85 (1), 15-22.
- <sup>76</sup>. Anno, G.H., Young, R.W., Bloom, R.M., Mercier, J.R., *Health Phys.*, **2003**, 84 (5), 565-575.
- <sup>77</sup>. Cohen, Bernard L., *Health Phys.*, **2000**, 78 (5), 522-527.
- <sup>78</sup>. Duton, J.W.R., ‘The Determination of Radiocesium in Sea and Fresh Waters’, Technical Report Fish and Radiobiology Laboratory No 6. Lowestoft, UK: Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Directorate of Fisheries Research, **1970**.
- <sup>79</sup>. Ε.Ρ.Π., Μεθοδολογία Μετρήσεων γ – φασματομετρίας, Ε.Ρ.Π./Ι.Π.Τ.Α., Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δ», Αθήνα, **1989**.
- <sup>80</sup>. Canberra Industries, “Genie 2000 Operations Manual”, USA, **2002**.
- <sup>81</sup>. Simpson, W.R., Deep-Sea *In Situ* Particle Samplers, Operating Manual for the Challenger Oceanic (Using the Mark III Centrifugal Pump), England, **1997**.

- 
- <sup>82</sup>. Δίκτυο Εργαστηρίων Παρακολούθησης Ποιότητας Περιβάλλοντος Ελληνικών Θαλασσών, Έκθεση αποτελεσμάτων προγράμματος παρακολούθησης ποιότητας περιβάλλοντος ελληνικών θαλασσών', Αθήνα, **2005**.
- <sup>83</sup>. Albanis, T.A., Lambropoulou, D.A., Sakkas, V.A., Konstantinou, I.K., *Chemosphere*, **2002**, 48, 475-485.
- <sup>84</sup>. Stefatos A., Charalampakis, M., Papatheodorou, G., Ferentinos, G., *Mar. Poll. Bull.*, **1999**, 36 (5), 389-393.
- <sup>85</sup>. Poulos, S.E., Collins, M.B., Pattiaratchi, C., Cramp, A., Gull, W., Tsimplis, M., Papatheodorou, G., *Mar. Geol.*, **1996**, 134, 213-235.
- <sup>86</sup>. Παπαηλιού, Δ., "Ωκεανογραφική Μελέτη Πατραϊκού Κόλπου", Τεχνική Έκθεση ΕΤΒΑ, 1982.
- <sup>87</sup>. Παπαγεωργίου Ε., Παπαδόπουλος Β. και Χαραλαμπάκης Α (1987): "Παρατηρήσεις θαλασσίων ρευμάτων στο Ανατολικό Ιόνιο πέλαγος: Πατραϊκός κόλπος". *Β΄ Πανελλήνιο Συνέδριο Ωκεανογραφίας & Αλιείας*. Αθήνα 11-15 Μαΐου 1987, σελ. 242-253.
- <sup>88</sup>. Pavlotskaya, F.I., *J. Anal. Chem.*, **1997**, 52 (2), 110-112.
- <sup>89</sup>. Terada, K., Hayakawa, H., Sawada, K., & Kiba, T., *Talanta*, **1970**, 17, 955.
- <sup>90</sup>. Noyce, J.R., *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, **1973**, 24, issue. 12, 709.
- <sup>91</sup>. Holm, E., Ballestra, S. & Fukai, R., *Talanta*, **1979**, 26, issue 9, 791-794.
- <sup>92</sup>. Fukai, R. & Holm, *Talanta*, **1976**, 26, issue 11-12, 853-855.
- <sup>93</sup>. Evaggeliou, N., Lycomitrou, C. & Zafiropoulou, A., Determination of <sup>137</sup>Cs in Sea Water Samples Using Gamma Spectrometry, in: Book of abstracts, 14<sup>th</sup> Hellenic Symposium on Nuclear Physics, p. 28, Athens 21-22/05/2004.
- <sup>94</sup>. Gasco, C., Anton, M.P., Delfanti, R., Gonzalez, A.M., Meral, J. & Papucci, C., *J. Environ. Radioact.*, **2002**, 62, 248.
- <sup>95</sup>. Molero, J., Sanchez-Cabeza, J.A., Merino, J., Mitchell, P.I. & Vidal-Quadras, A., *J. Environ. Radioact.*, **1999**, 43, 360.
- <sup>96</sup>. De, A.K., Sen, A.S., *Sep. Sci. Technol.*, **1978**, 13, 517-540.
- <sup>97</sup>. Huang, C.T., Wu, G., *Waste Management*, **1999**, 19, 263-268.
- <sup>98</sup>. Folsom, T.R., Mohanrao, G.J., & Winchell, P., *Nature*, **1960**, 187, 480.
- <sup>99</sup>. Lehto, J., Harjula, R., *Solvent Extr. Ion Exch.*, **1987**, 5, 343.
- <sup>100</sup>. Lehto, J., Harjula, R., Tusa, E., Paavola, A., *Tuson*, **1993**, 2, 1693.
- <sup>101</sup>. Loewenschuss, H., *Radioactive Waste Management*, **1982**, 2, 327.
- <sup>102</sup>. Roos, P., Holm, E., Persson, R.B.R., *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, **1994**, 339, 282-286.
- <sup>103</sup>. Mann, D.R., & Casso, S.A., *Mar. Chem.*, **1984**, 14, 307.

- 
- <sup>104</sup>. Buesseler, K.O., Casso, S.A., Hartman, M.C., & Livingston, H.D., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **1990**, 138, 33.
- <sup>105</sup>. Smith, A.R. & Wollenberg, H.A., High Resolution Gamma Ray Spectrometry for Laboratory Analysis of the Uranium and Thorium Series, Laverne Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California, **1972**.
- <sup>106</sup>. N.C.R.P., A Handbook of Radioactive Measurements Procedures, National Council on Radiation Protection and Measurements, report No. 58, Washington, **1978**.
- <sup>107</sup>. Καραγιάννη, Μ.Ι., “Επεξεργασία Αξιολόγηση και Παρουσίαση Αναλυτικών Δεδομένων”, Αθήνα **1987**.
- <sup>108</sup>. Χατζηιωάννου, Θ.Π., Κουππάρη, Μ.Α., “Ενόργανη Ανάλυση”, Αθήνα **2003**.
- <sup>109</sup> Tsabaris, C., Ballas, D., *Applied Radiation and Isotopes*, **2005**, 62, 83-89.
- <sup>110</sup> Gulin, S.B., Stokozov, N.A., *J. Environ. Radioact.*, **2005**, in press.
- <sup>111</sup> Egorov, V.N., Povinec, P.P., Polikarpov, G.G., Stokozov, N.A., Gulin, S.B., Kulebakina, L.G. & Osvath I., *J. Environ. Radioact.*, **1999**, 43, 137-155.
- <sup>112</sup> ERL unpublished data
- <sup>113</sup> Radiation Protection 70, Marina-Med Project, EUR 15564 EN, **1994**.
- <sup>114</sup> Gasco, C., Anton, M.P., Delphanti, R., Gonzalez, A.M., Meral, J., Papucci, C., *J. Environ. Radioact.*, **2002**, 62, 241-262.
- <sup>115</sup> Helsinki Commission Project Group for Monitoring of Radioactive Substances in the Baltic Sea (MORS), Ninth Meeting, Tallinn, Estonia, 1-3 June **2004**
- <sup>116</sup> Duran, E.B., Povinec, P.P., Fowler, S.W., Airey, P.L., Hong, G.H., *J. Environ. Radioact.*, **2004**, 76, 139-160.
- <sup>117</sup>. Ehmann, William D., Vance, Diane E., ‘Radiochemistry & nuclear methods of analysis’, John Wiley & Sons Inc., 1991.
- <sup>118</sup>. Bodanis, D., ‘E=mc<sup>2</sup>: Η Βιογραφία της πιο Διάσημης Εξίσωσης στον Κόσμο’, Εκδοτικός Οργανισμός Α. Α. Λιβάνη, Αθήνα 2003.
- <sup>119</sup>. Bowen Robert, ‘Isotopes in the Earth Science’, Elsevier Applied Sciences, London, England, 1998.
- <sup>120</sup>. Harvey, Bernard G., ‘Nuclear Chemistry’, Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Foundation of Modern Chemistry Series, 1965.
- <sup>121</sup>. Harvey, Bernard G., ‘Introduction to Nuclear Physics and Chemistry’, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A., 1962.
- <sup>122</sup>. Overman, Ralph T., ‘Basic Concepts of Nuclear Chemistry’, Reinhold Publishing Corporation, New York, U.S.A., 1963.

- 
- <sup>123</sup>. Charles, Michael, 'Table of Isotopes', 7<sup>th</sup> Edition by Virginia S. Shirley, Wiley-Interscience, New York, U.S.A., 1978.
- <sup>124</sup>. Putman, John Labon, 'Isotopes', Penguin Books, Harmondsworth, England, 1965.
- <sup>125</sup>. Duncan, J.F. and Cook, G. B., 'Isotopes in Chemistry', Clarendon Press, Oxford, England, 1968.
- <sup>126</sup>. Mann, M., 'Peacetime Uses of Atomic Energy', The Vilung Press, New York, U.S.A. 1962.
- <sup>127</sup>. Whicker, Ward F., Schultz, Vincent, 'Radioecology: Nuclear Energy and the Environment, Volume 1', CRC Press, Inc. 1982.
- <sup>128</sup>. Πρόμποντας, Μ., 'Η Έκθεση του Ελληνικού Πληθυσμού σε Γάμμα – Ακτινοβολία Προερχόμενη από την Επιφάνεια της Γης', Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1992.
- <sup>129</sup>. Aarkrog, A., *Environmental International*. 1994, **20**(5). 633-643.
- <sup>130</sup>. Σιμόπουλος, Α., 'Φυσικές και Τεχνητές Πηγές Ραδιενέργειας'. Στο: "Εμείς και η Ραδιενέργεια", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1989.
- <sup>131</sup>. Kochupilai, N., *Nature*, 1976, **60**, 262.
- <sup>132</sup>. Finlaynson-Pitts, B. & Pitts, J.N., 'Atmospheric Chemistry Fundamentals and Experimental Analysis', John Wiley and Sons, 1986.
- <sup>133</sup>. Kritidis, P., 'A Radiological Study of the Greek Radon Spas', In Proc. International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology, Philadelphia, USA, 2 - 5 April, 1991.
- <sup>134</sup>. Kritidis, P., 'Investigation of Radiation Exposure in Greek Radon Therapy Centers and in Athens Residences', In Proc. XIII Regional Congress of IRPA, 15 - 19 September, Salzburg, Austria, 1986.
- <sup>135</sup>. Κρητίδης, Π., 'Ραδιενεργός Ρύπανση του Περιβάλλοντος'. Στο: "Εμείς και η Ραδιενέργεια", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1989.
- <sup>136</sup>. International Atomic Energy Agency, 'Environmental behavior of radionuclides released in the nuclear industry', IAEA, Vienna, 1973.
- <sup>137</sup>. Rosenberg, Howard L., 'Atomic soldiers: American victims of nuclear experiments', Beacon Press, Boston, MA, 1980.
- <sup>138</sup>. Eisenbed Merrill, 'Environmental Radioactivity: From Natural, Industrial and Military Sources', San Diego: Academic Press, 1997.
- <sup>139</sup>. May, J., 'The Greenpeace book of the nuclear age: the hidden history, the human cost', Pantheon Books, New York, 1989.
- <sup>140</sup>. Murray, R., 'Understanding Radioactive Waste', Battelle Press, Columbus, Ohio, 1982.
- <sup>141</sup>. U. S. Environmental Protection Agency, 'Environmental radiation data: Report 57 January-March 1989', Report No. EPA 520/5-89-021. U.S. EPA, Montgomery, AL, 1986.

---

<sup>142</sup>. Handler, J., 'Radioactive Waste Situation in the Russian Pacific Fleet, Nuclear Waste Disposal Problems, Submarine Decommissioning, Submarine Safety and Security of Naval Fuel, October 27<sup>th</sup>, 1994.