



Ανάπτυξη μεθοδολογίας ανίχνευσης  
ραδιενεργών ισοτόπων στον αέρα και  
τα τρόφιμα σε περίπτωση έκτακτου  
ραδιολογικού συμβάντος

Τομέας: Πυρηνικής Τεχνολογίας

Επιβλέπων: Μ. Αναγνωστάκης, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεργασία: Κ. Κανούτος, ΥΔ ΕΜΠ

Αθήνα 2024



Development of a methodology  
for the determination of  
radionuclides in the air and  
foodstuff in cases of nuclear  
emergency

**Section: Nuclear Engineering**

**Supervisor: M. Anagnostakis, Professor NTUA**

**Cooperation: K. Kanoutos, PhD Candidate NTUA**

Athens 2024



Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

**Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.**

**Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.**

**Παντελής Θλιβίτης**



## Contents

Περίληψη .....	9
Abstract .....	10
1. Εισαγωγή.....	11
2. Σχέδιο Άμεσης Δράσης σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος .....	13
2.1 Απόκριση σε άμεση ανάγκη .....	13
2.1.1 Στόχοι αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης .....	13
2.1.2 Φιλοσοφία του σχεδίου έκτακτης ανάγκης .....	14
2.1.3 Κατηγορίες σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης .....	15
2.1.4 Περιοχές και ζώνες σχεδιασμού .....	16
2.1.5 Επίπεδα και αρμοδιότητες σχεδιασμού .....	17
2.1.6 Κατηγορίες έκτακτης ανάγκης, συνθήκες και άμεσες ενέργειες .....	18
2.1.7 Επικοινωνία με τα ΜΜΕ .....	18
2.1.8 Καθήκοντα .....	19
2.1.9 Τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού .....	19
2.2 Εθνικό Ειδικό Σχέδιο Απόκρισης σε Ραδιολογική ή Πυρηνική Έκτακτη Ανάγκη (ΕΣΑΡΠΕΑ) εξαιτίας σοβαρού ατυχήματος εκτός συνόρων .....	20
2.2.1 Σκοπός του ειδικού σχεδίου και οδηγίες για την εφαρμογή του .....	20
2.2.2 Αντικειμενικοί στόχοι Ειδικού Σχεδίου .....	21
2.2.3 Ανάλυση κινδύνου .....	21
2.2.4 Κεντρική ιδέα της απόκρισης .....	22
2.2.5 Δράσεις Αντιμετώπισης Έκτακτων Αναγκών και Άμεσης/Βραχείας Διαχείρισης Συνεπειών .....	23
2.2.6 Δειγματοληψίες και μετρήσεις ραδιενέργειας περιβάλλοντος και τροφίμων.....	24
2.2.7 Εκτέλεση δειγματοληψιών και διακίνηση των δειγμάτων .....	25
2.3 Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. ....	28
3. Προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων τροφίμων .....	30
3.1 Φιλοσοφία της δειγματοληψίας .....	30
3.2 Αποθήκευση των δειγμάτων .....	30
3.3 Καθαρισμός των τροφίμων .....	31
3.4 Ζύγιση του δείγματος .....	32
3.5 Ξήρανση.....	32
3.6 Ομογενοποίηση .....	32
3.7 γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων .....	33
3.8 Υπολογισμός της Κατώτερης Ανιχνεύσιμης Ραδιενέργειας – MDA.....	36
3.8.1 Απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή.....	37
3.8.2 Το όριο ανίχνευσης σε όρους επιφάνειας φωτοκορυφής (detection limit).....	39

3.9	Το όριο προσδιορισμού (determination limit).....	40
3.10	Ο χρόνος προσδιορισμού (determination time) .....	41
4.	Προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων τροφίμων .....	43
4.1	Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος μαρουλιού .....	43
4.1.1	Δείγμα μαρουλιού με πλύση και ξήρανση.....	43
4.1.2	Δείγμα μαρουλιού χωρίς πλύση με ξήρανση.....	45
4.1.3	Δείγμα μαρουλιού χωρίς ξήρανση .....	46
4.1.4	Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση μαρουλιού .....	47
4.1.5	Εκτίμηση determination limit – determination time.....	49
4.1.6	Παρατηρήσεις.....	54
4.2	Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος Μήλου .....	55
4.2.1	Μήλο με πλύση και ξήρανση.....	55
4.2.2	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση.....	56
4.2.3	Μήλο χωρίς ξήρανση .....	57
4.2.4	Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση μήλου.....	57
4.2.5	Εκτίμηση Determination Limit – Determination Time.....	60
4.3	Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος γάλατος.....	65
4.3.1	Εκτίμηση MDA κατά την ανάλυση γάλατος .....	65
4.3.2	Εκτίμηση Determination limit – Determination time .....	66
4.4	Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος πατάτας .....	69
4.4.1	Δείγμα πατάτας με πλύση και ξήρανση.....	69
4.4.2	Δείγμα πατάτας χωρίς ξήρανση .....	70
4.4.3	Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση πατάτας .....	71
4.4.4	Εκτίμηση Determination limit - Determination time.....	73
4.4.5	Παρατηρήσεις.....	76
4.5	Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος σιταριού .....	77
4.5.1	Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση σιταριού.....	77
4.5.2	Εκτίμηση Determination limit – Determination time .....	78
4.6	Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος κουνουπιδιού.....	81
4.6.1	Δείγμα κουνουπιδιού με ξήρανση.....	81
4.6.2	Δείγμα ωμού κουνουπιδιού .....	83
4.6.3	Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση κουνουπιδιού.....	83
4.6.4	Εκτίμηση Determination Limit – Determination Time.....	86
4.6.5	Παρατηρήσεις.....	90
4.7	Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος μανιταριού .....	90
4.7.1	Ξηρό Μανιτάρι .....	90
4.7.2	Ωμό Μανιτάρι .....	91
4.7.3	Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση μανιταριού.....	91
4.7.4	Εκτίμηση Determination limit – Determination time .....	94
4.8	Χρήση γεωμετρία Marinelli για την ανάλυση ωμών δειγμάτων .....	99
4.8.1	Ανάλυση δείγματος ωμού μαρουλιού σε γεωμετρία Marinelli.....	100

4.8.2	Ανάλυση δείγματος ωμού μήλου σε γεωμετρία Marinelli .....	101
4.8.3	Ανάλυση δείγματος ωμής πατάτας σε γεωμετρία Marinelli .....	102
4.8.4	Ανάλυση δείγματος ωμού κουνουπιδιού σε γεωμετρία Marinelli .....	103
4.8.5	Ανάλυση δείγματος ωμού μανιταριού σε γεωμετρία Marinelli .....	104
4.8.6	Παρατηρήσεις.....	105
4.9	Γενικές παρατηρήσεις για την προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων τροφίμων.....	106
4.9.1	Επιλογή διαδικασίας προετοιμασίας τροφίμων .....	107
5.	Δειγματοληψία και ανάλυση φίλτρων αέρα .....	110
5.1.1	Πειράματα δειγματοληψίας και ανάλυσης φίλτρων αέρα .....	112
5.1.2	Διαγράμματα ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας MDA.....	117
5.1.3	Determination limit – determination time .....	119
5.1.4	Παρατηρήσεις.....	123
6.	Συμπεράσματα και προτάσεις για το μέλλον .....	124
	Στην παράγραφο αυτή γίνεται μία σύνοψη της Διπλωματικής Εργασίας, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα ευρήματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν, ενώ γίνονται προτάσεις για μελλοντική επέκταση της σχετικής έρευνας. ....	124
6.1.1	Προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων τροφίμων.....	124
6.1.2	Δειγματοληψίες και αναλύσεις φίλτρων αέρα .....	126
7.	Παραρτήματα.....	128
7.1.1	Παράρτημα I – Διαγράμματα MDA, Τρόφιμα .....	128
7.1.2	Παράρτημα II – Διαγράμματα Determination Limit, Τρόφιμα .....	136
7.1.3	Παράρτημα III – Διαγράμματα Determination Time, Τρόφιμα.....	145
7.1.1	Παράρτημα IV – Διαγράμματα MDA, Φίλτρα αέρα .....	153
7.1.2	Παράρτημα V – Διαγράμματα Determination Limit, Φίλτρα αέρα.....	155
7.1.3	Παράρτημα VI – Διαγράμματα Determination Time, Φίλτρα αέρα.....	157
8.	Κατάλογος Πινάκων.....	160
9.	Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	163
10.	Κατάλογος Εικόνων .....	166
11.	Κατάλογος Αναφορών .....	168



## Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) αποτελεί μια μελέτη προς την κατεύθυνση της βελτίωσης της απόκρισης του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης λόγω πυρηνικού ή ραδιολογικού ατυχήματος. Σκοπός της εργασίας είναι να καταγραφεί η μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθηθεί σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, καθώς και να γίνουν προτάσεις για τη βελτίωσή της, με στόχο τον ταχύ και αξιόπιστο προσδιορισμό ραδιοϊσοτόπων σε δείγματα τροφίμων και στον αέρα με γ-φασματοσκοπική ανάλυση, αξιοποιώντας τον εξοπλισμό του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Κριτήριο σύγκρισης μεταξύ των μεθόδων που μελετήθηκαν, αποτελούσε ο συνδυασμός χαμηλών επιπέδων ανίχνευσης (Minimum Detectable Activity, MDA) και ελάχιστου χρόνου για την επίτευξη των επιπέδων αυτών. Σημαντικό ρόλο στη σύγκριση μεταξύ των μεθόδων είχε και ο δείκτης determination limit. Στη περίπτωση των τροφίμων ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται στη βιβλιογραφία για την προετοιμασία των δειγμάτων πριν την ανάλυση, η οποία απαιτεί την ξήρανση των δειγμάτων πριν την ανάλυσή τους, και συγκρίθηκε με εναλλακτική διαδικασία προετοιμασίας δειγμάτων η οποία δε περιλάμβανε το βήμα της αποξήρανσης. Για τις δειγματοληψίες αέρα το ενδιαφέρον εστιάσθηκε στη χρήση των φορητών αντλιών υψηλής παροχής που διατίθενται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, επιλέχθηκαν κι ακολουθήθηκαν διαφορετικά πειραματικά πρωτόκολλα δειγματοληψίας και ανάλυσης, με σκοπό την επιλογή του βέλτιστου εξ αυτών, μέσω της σύγκρισης των επιμέρους αποτελεσμάτων. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων αποδείχθηκε ότι γενικώς η ξήρανση των δειγμάτων δεν είναι απαραίτητη κατά την πρώτη φάση της απόκρισης σε έκτακτη ανάγκη, καθώς μπορεί να επιτευχθούν τα απαιτούμενα επίπεδα ανίχνευσης σχετικά εύκολα, χωρίς πολύπλοκη προετοιμασία. Όσον αφορά τις μετρήσεις επί των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δειγματοληψία αέρα, αποδείχθηκε ότι η πιο αξιόπιστη μέθοδος είναι που εισάγει χρονικό διάστημα αναμονής μεταξύ της δειγματοληψίας και της ανάλυσης. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας υποστηρίζουν κι εμπλουτίζουν το σχέδιο απόκρισης του ΕΠΤ-ΕΜΠ σε περίπτωση ραδιολογικού ατυχήματος, επιβεβαιώνοντας τη καταλληλότητα των προβλεπόμενων μεθόδων για την ανίχνευση ραδιοϊσοτόπων στα τρόφιμα και στην ατμόσφαιρα και διακρίνοντας παράλληλα ορισμένες περιπτώσεις όπου η διαδικασία ανάλυσης δύνανται να τροποποιηθεί.

## Abstract

The present thesis is an attempt to describe the response plan of the Nuclear Technology Laboratory of the NTUA (NTL-NTUA) in case of a nuclear accident emergency, as well as to ensure the preparedness of the NTUA-NTL. The aim of this work is to fully document the methodology to be followed in case of an accident and to investigate the existence of any more effective method than the one already proposed for the rapid and reliable determination of radioisotopes in food and air samples by gamma spectroscopic analysis. The criterion for comparison between the methods was the combination of low MDA levels and minimum time to reach these levels. The determination limit also played an important role in the comparison between the methods. In the case of food products, the methodology proposed by the existing bibliography, which requires drying of samples before analysis, was followed and compared with an alternative sample preparation procedure that did not include the drying step. For the air sampling, different experimental protocols were selected and followed, in order reach the best one by comparing their results in terms of detection limits. The analysis of the results showed that in general drying of the samples is not necessary to obtain reliable measurements and reach conclusions in the first phase of the emergency. Regarding the measurements of the filters used for air sampling, it was found that the most reliable method is the one also proposed in the bibliography, which introduces a delay period between sampling and analysis. The results of the present work support and enrich the response plan of the NTUA-NTL in the event of a radiological accident, confirming the suitability of the prescribed methods for the detection of radioisotopes in food and in the atmosphere, while distinguishing some cases where the analytical procedure can be modified.

## 1. Εισαγωγή

Ένα πυρηνικό ατύχημα έχει ως πιθανό επακόλουθο τη δημιουργία ενός ραδιενεργού νέφους, το οποίο μεταφέρει μέρος της εκλυόμενης ραδιενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, επηρεάζοντας εκτεταμένες γεωγραφικές περιοχές, και ενδεχομένως προκαλώντας σοβαρές συνέπειες στην υγεία των ανθρώπων, ρύπανση του εδάφους και των υδάτων. Η Ελλάδα, αν και είναι μια χώρα χωρίς πυρηνικά εργοστάσια, βρίσκεται στην ζώνη κινδύνου ενός πυρηνικού ατυχήματος λόγω της γεωγραφικής της θέσης δίπλα σε χώρες με πυρηνικούς σταθμούς σε λειτουργία. Για το λόγο αυτό σε περίπτωση ατυχήματος είναι ύψιστης σημασίας ο έλεγχος της ραδιολογικής ρύπανσης του αέρα και των τροφών που παράγονται και θα μπορούσαν να έχουν ρυπανθεί από την εκλυόμενη ραδιενέργεια (π.χ. ραδιενεργό νέφος). Ειδικότερα, κατά τη φάση της ανταπόκρισης σε έκτακτη ανάγκη (emergency response) πρέπει να αναλύονται διαφόρων ειδών δείγματα, με σκοπό τη μέτρηση της ραδιενέργειας που περιέχουν, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσον υπάρχει ανάγκη για ανάληψη δράσης, βάσει των οδηγιών που υπάρχουν (Guideline Levels). Τα ραδιοϊσότοπα που πρωτίστως απασχολούν σε τέτοιες περιπτώσεις είναι: το Ιώδιο-131 (I-131), το Καίσιο-134 (Cs-134) και το Καίσιο-137 (Cs-137) διότι αποτελούν τους πρώτους και πλέον σημαντικούς δείκτες ραδιενεργού ρύπανσης λόγω πυρηνικού ατυχήματος.

Στο πλαίσιο αυτό, ο όρος «ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια» (Minimum Detectable Activity, MDA) έρχεται στο προσκήνιο ως κρίσιμο κριτήριο σύγκρισης. Με τον όρο MDA απαντάται το εξής ερώτημα: «Ποιο είναι το ελάχιστο επίπεδο ραδιενέργειας που μπορεί να μετρηθεί σε ένα δείγμα;». Η τιμή αυτή είναι ουσιώδους σημασίας στον τομέα της πυρηνικής ασφάλειας, καθώς παρέχει μια κατευθυντήρια γραμμή για την αξιολόγηση της παρουσίας ραδιενεργών ισοτόπων σε περιβαλλοντικά – κι όχι μόνο – δείγματα, όπως σε τρόφιμα και στην ατμόσφαιρα.

Σε μία περίπτωση έκτακτης ανάγκης (emergency response) αποτελεί ζωτικής σημασίας και η ταχύτητα με την οποία είναι εφικτό να επιτευχθεί μια επαρκώς χαμηλή τιμή MDA, η οποία θα καλύπτει με βεβαιότητα τα επιτρεπτά όρια που έχουν δοθεί. Επιπλέον, για την πλήρη σύγκριση των δειγμάτων που αναλύονται και των μεθοδολογιών που εφαρμόζονται είναι απαραίτητα και άλλα κριτήρια, όπως: determination limit και determination time. Το πρώτο δείχνει το πλήθος των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας που θα πρέπει να ανιχνευθούν για να εξαχθούν αποτελέσματα με συγκεκριμένη στατιστική αβεβαιότητα, ενώ το δεύτερο παρέχει πληροφορία για τον απαραίτητο χρόνο ανάλυσης προκειμένου να επιτευχθεί αυτό.

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) αποτελεί η διερεύνηση του βέλτιστου τρόπου προετοιμασίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης δειγμάτων – συγκεκριμένα τροφίμων και φίλτρων αέρα – για την επίτευξη χαμηλών επιπέδων ανίχνευσης σημαντικών ραδιενεργών ισοτόπων σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης (emergency response). Προς την κατεύθυνση αυτή, μελετώνται και συγκρίνονται

διαφορετικοί τρόποι προετοιμασίας των δειγμάτων, με κύριο στόχο την εύρεση της ταχύτερης, αλλά και ταυτόχρονα αποτελεσματικότερης μεθόδου.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η διάρθρωση της παρούσας εργασίας.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της εργασίας παρατίθενται βιβλιογραφικά στοιχεία για την πλήρη κατανόηση της περίπτωσης έκτακτης ανάγκης μετά από πυρηνικό ατύχημα. Αναφέρονται συνοπτικά τα βήματα και η μορφή που έχει ένα εθνικό σχέδιο δράσης και παρουσιάζεται το εθνικό σχέδιο δράσης της χώρας μας.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο καταγράφεται η μεθοδολογία που προκύπτει από τη σχετική βιβλιογραφία και ορίζει τη μεθοδολογία προετοιμασίας τυπικών δειγμάτων τροφίμων. Επίσης παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η διαδικασία υπολογισμού όρων όπως: MDA, determination limit και determination time.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο ακολουθεί η περιγραφή των πειραμάτων προετοιμασίας και ανάλυσης δειγμάτων που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της ΔΕ, για τα διάφορα είδη τροφίμων στα οποία εστιάστηκε το ενδιαφέρον, και παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα και γραφήματα που προέκυψαν. Τα πειράματα προετοιμασίας δειγμάτων που έγιναν αφορούν τρόφιμα διαφορετικών κατηγοριών που ενδεχομένως απαιτούν διαφορετικούς τρόπους προετοιμασίας. Εξετάστηκαν τρόφιμα, τα οποία είναι πιθανό – σύμφωνα με το εθνικό σχέδιο απόκρισης σε ραδιολογική έκτακτη ανάγκη – να βρεθούν στον χώρο του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας (ΕΠΤ) του ΕΜΠ προς ανάλυση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο ακολουθεί, όμοια με το προηγούμενο, η παρουσίαση των πειραμάτων πειράματα και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων από δειγματοληψίες αέρα με χρήση φορητών αντλιών υψηλής παροχής. Σε αυτό το σημείο συγκρίνονται διαφορετικά πρωτόκολλα δειγματοληψίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, αναφορικά με τη πειραματική διαδικασία, πχ. διαφορετικοί χρόνοι δειγματοληψίας και χρόνοι «αναμονής» (delay).

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της ΔΕ πραγματοποιείται η σύνοψή της εργασίας και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν βάσει των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας προετοιμασίας και ανάλυσης των δειγμάτων τροφίμων και φίλτρων αέρα που προηγήθηκε.

Τέλος ακολουθούν τα Παραρτήματα, οι Κατάλογοι Πινάκων, Διαγραμμάτων και Εικόνων, και η Βιβλιογραφία της εργασίας.

## 2. Σχέδιο Άμεσης Δράσης σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος

### 2.1 Απόκριση σε άμεση ανάγκη

Ένα σχέδιο άμεσης δράσης (emergency response) αναφέρεται σε ένα συντονισμένο σύνολο ενεργειών και διαδικασιών που αναλαμβάνονται από τις υπεύθυνες αρχές, ως «απόκριση» σε απρόβλεπτες και επείγουσες καταστάσεις ή κρίσεις, όπως φυσικές καταστροφές, ατυχήματα ή άλλα επείγοντα γεγονότα. Ο κύριος στόχος της κινητοποίησης σε έκτακτη ανάγκη είναι να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά οι άμεσες και κρίσιμες ανάγκες της περιοχής που πλήττεται και επηρεάζεται από την κρίση. Συνήθως, αυτό περιλαμβάνει την παροχή βοήθειας και πόρων για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της έκτακτης ανάγκης, την προστασία ζωών και του περιβάλλοντος, καθώς και την αποτροπή περαιτέρω κινδύνων. Η αντιμετώπιση της έκτακτης ανάγκης περιλαμβάνει δραστηριότητες όπως η εκκένωση, η ιατρική βοήθεια, η αναζήτηση και διάσωση, η επικοινωνία και ο συντονισμός μεταξύ σχετικών αρχών και κυβέρνησης. Ο στόχος του σχεδίου είναι να αντιμετωπιστούν γρήγορα και αποτελεσματικά οι προκλήσεις που δημιουργήσει η έκτακτη ανάγκη και να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις της.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι έκτακτης ανάγκης όσον αφορά τα πυρηνικά και ραδιολογικά ατυχήματα. Σοβαρότερη περίπτωση έκτακτης ανάγκης αποτελούν τα ατυχήματα σε πυρηνικές εγκαταστάσεις, όπου όμως οι τοποθεσίες τους είναι γνωστές και στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχουν ήδη ειδικά σχέδια άμεσης δράσης για τους χώρους των εγκαταστάσεων. Από την άλλη, καταστάσεις έκτακτης ανάγκης μπορούν να προκύψουν οπουδήποτε (πχ. κατά τη μεταφορά ραδιενεργών υλικών), παρουσιάζουν όμως μικρότερο ραδιολογικό κίνδυνο ή σοβαρή απειλή για το κοινό. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι τοπικοί πόροι επαρκούν για την αντιμετώπιση της κρίσης που θα δημιουργηθεί, ενώ ενδέχεται να ζητηθεί επίσης περιορισμένη εθνική ανταπόκριση για την υποστήριξη της προσπάθειας αυτής [1].

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται και σχολιάζεται το σχέδιο άμεσης δράσης σε ραδιολογική ή πυρηνική έκτακτη ανάγκη εξαιτίας σοβαρού ατυχήματος σε πυρηνική εγκατάσταση.

#### 2.1.1 Στόχοι αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης

Τα μέτρα και πρωτόκολλα για την αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος μπορεί να διαφέρουν από χώρα σε χώρα, αλλά γενικά καθοδηγούνται από διεθνή πρότυπα και συστάσεις, όπως αυτά που παρέχει ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) – International Atomic Energy Agency (IAEA). Ο γενικός στόχος είναι η προστασία της δημόσιας υγείας και η ελαχιστοποίηση των συνεπειών τέτοιων περιστατικών, διατηρώντας παράλληλα τη διαφάνεια και τη λογοδοσία στις προσπάθειες αντιμετώπισής τους. Συγκεκριμένα οι γενικοί στόχοι της αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης είναι:

- Η μείωση του κινδύνου και ο μετριασμός των συνεπειών του ατυχήματος.
- Η πρόληψη των ντετερμινιστικών επιπτώσεων στην υγεία (π.χ. πρόωροι θάνατοι και τραυματισμοί), με τη λήψη μέτρων πριν ή λίγο μετά την έκθεση, και με τη διατήρηση των ατομικών δόσεων λόγω ακτινοβολίας του κοινού και των εργαζομένων έκτακτης ανάγκης, κάτω από τα όρια των ντετερμινιστικών επιπτώσεων στην υγεία.
- Η μείωση του κινδύνου στοχαστικών επιπτώσεων στην υγεία (π.χ. καρκίνος και σοβαρές κληρονομικές επιπτώσεις), όσο αυτό είναι εφικτό, με την εφαρμογή προστατευτικών δράσεων υπό την καθοδήγηση του ΔΟΑΕ και με τη διατήρηση των δόσεων λόγω ακτινοβολίας των εργαζομένων έκτακτης ανάγκης κάτω από τα καθορισμένα από τον ΔΟΑΕ επίπεδα [2].

### 2.1.2 Φιλοσοφία του σχεδίου έκτακτης ανάγκης

Ο διαδικασίες που προτείνονται από τον ΔΟΑΕ βασίζονται στην ακόλουθη φιλοσοφία: Να είναι απλές αλλά αποτελεσματικές. Συγκεκριμένα, στα πρωτόκολλα των διαδικασιών αυτών παρέχονται κριτήρια δράσης, τα οποία είναι:

- σαφή, συνοπτικά και προκαθορισμένα, επιτρέποντας την άμεση ανάληψη δράσης,
- βασισμένα στις τρέχουσες γνώσεις και την εμπειρία σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης που προκύπτουν λόγω έκλυσης ακτινοβολίας [2].

Σε πολλά ραδιολογικά έκτακτα περιστατικά εκτός πυρηνικών αντιδραστήρων, ο κίνδυνος λόγω της ακτινοβολίας είναι συχνά μικρότερος από άλλους συμβατικούς κινδύνους που υπάρχουν (π.χ. φωτιά, επικίνδυνες χημικές ουσίες). Στις περιπτώσεις αυτές, η μη ραδιολογική πτυχή ενός ραδιολογικού έκτακτου περιστατικού θα πρέπει σχεδόν πάντα να υπερισχύει: η διάσωση ζωών, η αντιμετώπιση τραυματισμών, η πυρόσβεση, η προστασία κρίσιμου εξοπλισμού και η ασφάλεια του προσωπικού πρέπει να είναι οι προτεραιότητες. Μόλις σταθεροποιηθεί η μη ραδιολογική κατάσταση, πρέπει να ληφθούν άμεσα μέτρα για την ελαχιστοποίηση του ραδιολογικού κινδύνου για το κοινό, τους εργαζόμενους έκτακτης ανάγκης και το περιβάλλον [4].

Οι διεθνείς οδηγίες καθορίζουν τα «Γενικά Επίπεδα Παρέμβασης» - «Generic Intervention Levels» (GIL), στα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται επείγοντα και μακροπρόθεσμα μέτρα προστασίας για το κοινό και «γενικά επίπεδα δράσης» - «Generic Action Levels» (GAL) στα οποία θα πρέπει να γίνονται έλεγχοι στα τρόφιμα. Τα επίπεδα αυτά επιλέχθηκαν με σκοπό οι προστατευτικές δράσεις να αποφέρουν περισσότερες θετικές παρά αρνητικές συνέπειες, δηλαδή ο κίνδυνος που αποφεύγεται με την αποτροπή μιας δόσης στον πληθυσμό να είναι μεγαλύτερος από τη βλάβη που συνεπάγεται η εφαρμογή της προστατευτικής δράσης. Ειδικότερα, αυτό σημαίνει επίσης ότι η λήψη προστατευτικών μέτρων σε σημαντικά χαμηλότερες ή υψηλότερες τιμές ακτινοβολίας από αυτές που καθορίζουν τα επίπεδα αυτά

θα μπορούσε να αυξήσει τον συνολικό κίνδυνο για το γενικό πληθυσμό ή τους εργαζομένους. Τα GIL και GAL δεν σχεδιάστηκαν για να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης, επειδή δεν μπορούν οι τιμές τους να μετρηθούν αμέσως στο πεδίο και δεν αφορούν τις συνθήκες των εγκαταστάσεων. Ωστόσο, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη, στο πλαίσιο του σχεδιασμού, «Επιχειρησιακών Επιπέδων Παρέμβασης» - «Operational Intervention Levels» (OIL) και άλλων κριτηρίων που μπορούν εύκολα να μετρηθούν κατά τη διάρκεια μιας έκτακτης ανάγκης (π.χ. ρυθμός δόσης) και βάσει των οποίων μπορεί να διαπιστωθεί γρήγορα η ανάγκη για προστατευτική δράση [5].

### 2.1.3 Κατηγορίες σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης

Προτού ξεκινήσει οποιοσδήποτε σχεδιασμός, πρέπει να προσδιοριστούν οι διάφορες πρακτικές και οι δραστηριότητες για τις οποίες είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης. Ο σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης μπορεί να είναι διαφορετικός για κάθε πρακτική. Ωστόσο, αυτό μπορεί να απλουστευθεί με την ομαδοποίηση των πρακτικών σε πέντε κατηγορίες, καθεμία από τις οποίες παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά όσον αφορά το μέγεθος και τον χρόνο του κινδύνου. Οι κατηγορίες σχεδιασμού (Πίνακας 1) χρησιμοποιούνται μόνο για καθοδήγηση κατά τον σχεδιασμό της απόκρισης σε έκτακτη ανάγκη και όχι κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος. Ο σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης για τις πρακτικές της κατηγορίας I είναι ο πιο απαιτητικός. Για τον εθνικό οργανισμό, ο σχεδιασμός και η αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης στις εγκαταστάσεις της κατηγορίας I διασφαλίζει ότι υπάρχει η δυνατότητα αντιμετώπισης των συμβάντων και των υπολοίπων κατηγοριών. Ωστόσο, για τους επιτόπιους και τοπικούς οργανισμούς, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση θα πρέπει να βασίζονται στις τοπικές πρακτικές και δραστηριότητες [3].

**Πίνακας 1:** Κατηγορίες σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης [5].

Κατηγορία	Περιγραφή του πεδίου εφαρμογής της κατηγορίας
I	Εγκαταστάσεις με πιθανότητα πολύ μεγάλων εκλύσεων που έχουν ως αποτέλεσμα σοβαρές ντετερμινιστικές επιπτώσεις στην υγεία. Αυτό το επίπεδο σχεδιασμού απαιτείται από τις περιοχές κοντά στην εγκατάσταση, οι οποίες πρέπει να είναι προετοιμασμένες να αναλάβουν άμεσα μέτρα προστασίας σε περίπτωση ατυχήματος σε αυτή.
II	Εγκαταστάσεις με πιθανότητα εκλύσεων που θα οδηγήσουν σε δόσεις εκτός του χώρου του εργοταξίου πάνω από τα GIL έκτακτης ανάγκης, αλλά με μικρή ή μηδενική απειλή δόσεων που θα οδηγήσουν σε ντετερμινιστικές επιπτώσεις στην υγεία εκτός του χώρου του εργοταξίου. Το συγκεκριμένο επίπεδο σχεδιασμού απαιτείται από τις περιοχές που πρέπει να είναι προετοιμασμένες να αναλάβουν δράσεις προστασίας σε περίπτωση ατυχήματος στην εγκατάσταση.

III	Εγκαταστάσεις χωρίς σημαντικό κίνδυνο εκτός του χώρου, αλλά με πιθανότητα ατυχημάτων που θα έχουν ως αποτέλεσμα ντετερμινιστικές επιπτώσεις στην υγεία στον χώρο της εγκατάστασης. Αυτό το επίπεδο σχεδιασμού απαιτείται από τις υπηρεσίες που παρέχουν πυροσβεστική, αστυνομική ή ιατρική υποστήριξη σε αυτές τις εγκαταστάσεις.
IV	Περιοχές με μικρή ή καθόλου γνωστή απειλή. Αυτό είναι το ελάχιστο όριο για όλες τις χώρες, διότι ατυχήματα που αφορούν χαμένες ή κλεμμένες πηγές ή τη μεταφορά ραδιενεργών υλικών είναι δυνατόν να συμβούν οπουδήποτε.
V	Περιοχές με σημαντική πιθανότητα να χρειαστεί να εφαρμοστούν παρεμβάσεις σχετικά με τα τρόφιμα σε περίπτωση ατυχημάτων σε εγκαταστάσεις εκτός της χώρας.

#### 2.1.4 Περιοχές και ζώνες σχεδιασμού

Για τους περισσότερους τύπους ατυχημάτων, η αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης λαμβάνει χώρα σε δύο διαφορετικές περιοχές: (α) η περιοχή που περιβάλλει την εγκατάσταση εντός της περιμέτρου ασφαλείας, του φράχτη ή άλλου σχεδιασμένου σήματος ιδιοκτησίας και (β) η περιοχή εκτός της εγκατάστασης.

Η πρώτη περιοχή βρίσκεται υπό τον άμεσο έλεγχο του διαχειριστή ή του χρήστη της εγκατάστασης. Η δεύτερη περιοχή είναι αυτή που βρίσκεται πέρα από τον έλεγχο του διαχειριστή της εγκατάστασης [3]. Η δεύτερη περιοχή συνήθως περιβάλλει την πρώτη.

Για τις εγκαταστάσεις με πιθανότητα ατυχημάτων που θα οδηγήσουν σε σημαντικές εκλύσεις εκτός του χώρου εγκατάστασης (κατηγορίες σχεδιασμού I και II), το επίπεδο σχεδιασμού ποικίλλει, ανάλογα με την απόσταση από την εγκατάσταση. Για τις εγκαταστάσεις αυτές, ο σχεδιασμός μπορεί να συζητηθεί για τρεις ζώνες σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης:

- Ζώνη προληπτικής δράσης - Precautionary Action Zone (PAZ): Προκαθορισμένη περιοχή γύρω από μια εγκατάσταση, όπου έχουν προσχεδιαστεί επείγουσες προστατευτικές ενέργειες οι οποίες θα εφαρμοστούν αμέσως μετά την κήρυξη γενικής έκτακτης ανάγκης. Ο στόχος είναι να μειωθεί σημαντικά ο κίνδυνος καθοριστικών επιπτώσεων στην υγεία με τη λήψη προστατευτικών μέτρων πριν από την απελευθέρωση ραδιενεργών ισοτόπων.
- Ζώνη σχεδιασμού επείγουσας προστατευτικής δράσης - Urgent Protective Action Planning Zone (UPZ): Προκαθορισμένη περιοχή γύρω από μια εγκατάσταση όπου γίνονται προετοιμασίες για την άμεση εφαρμογή επειγόντων μέτρων προστασίας με βάση την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.



- Μακροπρόθεσμη ζώνη σχεδιασμού προστατευτικών δράσεων - Longer Term Protective Action Planning Zone (LPZ): Προκαθορισμένη περιοχή γύρω από μια εγκατάσταση που βρίσκεται πιο μακριά από την ίδια και περιλαμβάνει τη ζώνη σχεδιασμού επείγουσας προστατευτικής δράσης. Είναι η περιοχή όπου θα πρέπει να εφαρμοστούν οι προστατευτικές δράσεις για τη μείωση της μακροπρόθεσμης δόσης από την εναπόθεση και την κατάποση [3].

Οι ζώνες αυτές θα πρέπει να είναι περίπου κυκλικές περιοχές γύρω από την εγκατάσταση. Το μέγεθος των ζωνών μπορεί να καθοριστεί με ανάλυση των πιθανών συνεπειών. Ωστόσο, προηγούμενες μελέτες για ένα πλήρες φάσμα ραδιολογικών και πυρηνικών ατυχημάτων παρέχουν μια βάση για τα γενικά μεγέθη ζωνών. Τα όρια των ζωνών θα πρέπει να καθορίζονται από τοπικά ορόσημα (π.χ. δρόμους ή ποτάμια), ώστε να είναι εύκολη η αναγνώρισή τους κατά τη διάρκεια μιας απόκρισης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί επίσης ότι οι ζώνες δεν σταματούν στα εθνικά σύνορα [3].

### 2.1.5 Επίπεδα και αρμοδιότητες σχεδιασμού

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης απαιτεί αλληλοϋποστηριζόμενο και ολοκληρωμένο σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης σε τρία επίπεδα:

- Εγκατάσταση:
 

Το προσωπικό της εγκατάστασης ή το προσωπικό που χρησιμοποιούσε το υλικό κατά τη στιγμή του ατυχήματος είναι υπεύθυνοι για: (α) τις άμεσες ενέργειες για τον μετριασμό του ατυχήματος (β) την προστασία των ανθρώπων στο χώρο του ατυχήματος και (γ) την ενημέρωση των αρμοδίων εκτός του χώρου του ατυχήματος και την παροχή συστάσεων σε αυτούς σχετικά με τις προστατευτικές ενέργειες και την τεχνική βοήθεια.

Για τα ατυχήματα μεταφοράς, αυτό περιλαμβάνει τον αποστολέα, τον ιδιοκτήτη της πηγής και τον μεταφορέα.
- Εκτός του χώρου εγκατάστασης:
 

Οργανισμοί υπεύθυνοι για την προστασία του κοινού. Σε αυτούς περιλαμβάνονται:

  1. Τοπικοί αρμόδιοι: οι κυβερνητικοί και υποστηρικτικοί φορείς που είναι υπεύθυνοι για την παροχή άμεσης υποστήριξης στον χρήστη και την άμεση προστασία του κοινού στην περιοχή. Αυτό περιλαμβάνει επίσης την αστυνομία, την πυροσβεστική, την πολιτική προστασία ή το ιατρικό προσωπικό που μπορεί να είναι οι πρώτοι που μαθαίνουν για ένα ατύχημα. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει αρμόδιους από διαφορετικές χώρες, εάν η εγκατάσταση βρίσκεται κοντά σε σύνορα.
  2. Εθνικοί και περιφερειακοί (περιφέρεια, επαρχία ή πολιτεία) αρμόδιοι: οι κυβερνητικοί φορείς που είναι υπεύθυνοι για το σχεδιασμό και την αντιμετώπιση σε εθνικό (ή περιφερειακό και πολιτειακό) επίπεδο. Αυτές οι υπηρεσίες είναι συνήθως υπεύθυνες για καθήκοντα που δεν χρειάζεται να

υλοποιηθούν επειγόντως για να είναι αποτελεσματικά. Σε αυτά περιλαμβάνονται: (α) μακροπρόθεσμες προστατευτικές δράσεις και (β) υποστήριξη των τοπικών αρμοδίων σε περίπτωση υπέρβασης των δυνατοτήτων τους [3].

➤ Διεθνές επίπεδο:

Οργανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την παροχή διεθνούς βοήθειας. Σε αυτούς περιλαμβάνονται:

1. Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ), ο οποίος εφαρμόζει τη «Σύμβαση για την έγκαιρη κοινοποίηση πυρηνικού ατυχήματος» και τη «Σύμβαση για τη βοήθεια σε περίπτωση πυρηνικής ή ραδιολογικής έκτακτης ανάγκης». Τα συμβαλλόμενα μέρη της «Σύμβασης Κοινοποίησης» δεσμεύονται να κοινοποιούν αμέσως τις χώρες που ενδέχεται να πληγούν από ένα ατύχημα. Οι κοινοποιήσεις αυτές μπορούν να γίνουν απευθείας ή μέσω του ΔΟΑΕ. Οι περιοχές των χωρών στις οποίες πρέπει να ληφθούν επείγοντα μέτρα προστασίας πρέπει να κοινοποιούνται απευθείας και όχι μέσω του ΔΟΑΕ. Στο πλαίσιο της «Σύμβασης Βοήθειας», οι χώρες έχουν δεσμευτεί να διευκολύνουν την άμεση παροχή βοήθειας σε περίπτωση ατυχήματος.
2. Οργανισμοί όπως ο UNHCR (United Nations Department of Humanitarian Affairs) ή ο WHO (World Health Organization) που μπορούν να παράσχουν τεχνική, ανθρωπιστική ή ιατρική βοήθεια σε περίπτωση ατυχήματος [3].

### 2.1.6 Κατηγορίες έκτακτης ανάγκης, συνθήκες και άμεσες ενέργειες

Η ανταπόκριση σε μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης απαιτεί ταχεία και συντονισμένη ανταπόκριση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εγκατάστασης ενός συστήματος ταξινόμησης με τις ακόλουθες κατηγορίες έκτακτης ανάγκης: (α) γενική έκτακτη ανάγκη, (β) έκτακτη ανάγκη περιοχής και (γ) συναγερμός. Οι ενέργειες που πρέπει να ληφθούν για κάθε κατηγορία πρέπει να έχουν καθοριστεί εκ των προτέρων και να ξεκινούν με την κήρυξη της έκτακτης ανάγκης. Η ταξινόμηση «έκτακτης ανάγκης» δεν πρέπει να συγχέεται με την κατάταξη του ατυχήματος σύμφωνα με τη Διεθνή Κλίμακα Πυρηνικών Συμβάντων - International Nuclear Events Scale (INES). Η Κλίμακα INES έχει σχεδιαστεί για να δείχνει πόσο σοβαρό ήταν ένα συμβάν **αφού έχει μελετηθεί** και δεν αποτελεί τη βάση για οποιαδήποτε δράση. Άλλωστε, ο προσδιορισμός της κατάταξης INES είναι αδύνατος στην αρχή ενός συμβάντος, και η κατάταξή του κατά INES δεν θα πρέπει να καθυστερεί τις ενέργειες αντιμετώπισης της έκτακτης ανάγκης [3].

### 2.1.7 Επικοινωνία με τα ΜΜΕ

Ένα ραδιολογικό ατύχημα θα προσελκύσει κατά πάσα πιθανότητα την προσοχή των μέσων ενημέρωσης. Αυτό θα συμβεί με βεβαιότητα εάν υπάρχουν σοβαροί κίνδυνοι ή απλά υποψίες για την υγεία του πληθυσμού που συνδέονται με το ατύχημα. Εκπρόσωποι του

Τύπου – κυρίως της τηλεόρασης – σε πολλές περιπτώσεις είναι πιθανό να βρίσκονται στον τόπο του ατυχήματος και να παρέχουν ζωντανή κάλυψη πριν από την πλήρη κινητοποίηση του μηχανισμού αντίδρασης. Ως εκ τούτου, η προετοιμασία για την επικοινωνία με τα μέσα μαζικής ενημέρωσης και το κοινό αποτελεί ουσιαστικό μέρος των σχεδίων αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης. Είναι σημαντικό το προσωπικό στον τόπο του συμβάντος να γνωρίζει το ενδεχόμενο ταχείας ανταπόκρισης των μέσων ενημέρωσης και να προβαίνει σε ρυθμίσεις για την υποδοχή, τη συγκέντρωση και τον έλεγχο του προσωπικού των μέσων ενημέρωσης το συντομότερο δυνατό. Ο υπεύθυνος διαχείρισης του συμβάντος θα πρέπει να δημιουργήσει ένα σημείο υποδοχής των μέσων ενημέρωσης και να ορίσει έναν υπεύθυνο επικοινωνίας με τον Τύπο, ανάλογα με την περίπτωση [2].

### 2.1.8 Καθήκοντα

Για την ανάπτυξη και εφαρμογή σχεδίων και διαδικασιών αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης πρέπει να ανατεθούν τα παρακάτω καθήκοντα [3]:

- Καθήκον 1 - Αναθεώρηση και ανάπτυξη εθνικής πολιτικής
- Καθήκον 2 - Καθορισμός του απαιτούμενου επιπέδου ετοιμότητας
- Καθήκον 3 - Ανάπτυξη της βάσης σχεδιασμού
- Καθήκον 4 - Κατανομή αρμοδιοτήτων
- Καθήκον 5 - Συγγραφή του εθνικού σχεδίου έκτακτης ανάγκης για τη ραδιενέργεια
- Καθήκον 6 - Ενημέρωση όλων των σχετικών οργανισμών
- Καθήκον 7- Σχηματισμός και εκπαίδευση προσωρινής ομάδας εργασίας για την αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης
- Καθήκον 8 - Ανάπτυξη και εφαρμογή λεπτομερών σχεδίων
- Καθήκον 9 - Συντονισμός και δοκιμή σχεδίων και διαδικασιών
- Καθήκον 10 - Ανάπτυξη και εφαρμογή προγραμμάτων συνεχούς ενημέρωσης και κατάρτισης.

### 2.1.9 Τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού

Πριν από την έναρξη του σχεδιασμού θα πρέπει να οριστεί ένας ενιαίος συνολικός Εθνικός Συντονιστής Σχεδιασμού Άμεσης Δράσης - National Emergency Planning (EP) Coordinator, ο οποίος:

- αναπτύσσει ένα ολοκληρωμένο εθνικό σχέδιο ραδιολογικής έκτακτης ανάγκης,
- συντονίζει την ανάπτυξη σχεδίων και διαδικασιών σε κάθε επίπεδο,
- καθοδηγεί τη διαδικασία σχεδιασμού που περιγράφεται στις ακόλουθες ενότητες,
- ενεργεί ως σημείο επαφής για τη διεθνή συνεργασία που περιλαμβάνει τις διεθνείς συμβάσεις κοινοποίησης και βοήθειας και τα σχέδια βοήθειας του ΔΟΑΕ [3].

## 2.2 Εθνικό Ειδικό Σχέδιο Απόκρισης σε Ραδιολογική ή Πυρηνική Έκτακτη Ανάγκη (ΕΣΑΡΠΕΑ) εξαιτίας σοβαρού ατυχήματος εκτός συνόρων

Αφού έγινε αναφορά στις γενικές αρχές για τη δημιουργία ενός σχεδίου δράσης σε περίπτωση ραδιολογικής έκτακτης ανάγκης, όπως ορίζονται από οδηγίες του ΔΟΑΕ, στις παραγράφους που ακολουθούν το ενδιαφέρον εστιάζεται στο αντίστοιχο σχέδιο για την Ελλάδα, που ακούει στο όνομα «Εθνικό Ειδικό Σχέδιο Απόκρισης σε Ραδιολογική ή Πυρηνική Έκτακτη Ανάγκη (ΕΣΑΡΠΕΑ)» [4] και το οποίο συντονίζεται από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). Στην εφαρμογή του Σχεδίου αυτού συμμετέχει και το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, ως μέλος του δικτύου συνεργαζομένων εργαστηρίων.

### 2.2.1 Σκοπός του ειδικού σχεδίου και οδηγίες για την εφαρμογή του

Το Σχέδιο ενεργοποιείται και εφαρμόζεται σε περίπτωση που συμβεί, ή υπάρχει η υπόνοια ότι έχει συμβεί ή θα συμβεί, έκλυση ραδιενέργειας στο περιβάλλον, ως αποτέλεσμα σοβαρού πυρηνικού ατυχήματος σε πυρηνική εγκατάσταση εκτός συνόρων με πιθανές επιπτώσεις στην Ελληνική επικράτεια. Το Σχέδιο ενεργοποιείται από τον Γενικό Γραμματέα Πολιτικής Προστασίας, αφού ενημερωθεί από τον Πρόεδρο της ΕΕΑΕ, ότι η προαναφερόμενη έκλυση ραδιενέργειας μπορεί να προκαλέσει διασπορά ραδιενέργειας στην Ελληνική επικράτεια, σε επίπεδα που δεν δύναται να παραβλεφθούν από άποψη ακτινοπροστασίας [4].

Με το Ειδικό Σχέδιο αντιμετώπισης σοβαρού ατυχήματος σε πυρηνική εγκατάσταση εκτός συνόρων που δύναται να πλήξει την Ελληνική επικράτεια, επιδιώκεται η άμεση και συντονισμένη απόκριση των εμπλεκόμενων φορέων σε όλα τα επίπεδα διοίκησης (κεντρικό, περιφερειακό, τοπικό):

- για την προστασία της υγείας και της περιουσίας των πολιτών, καθώς και την προστασία του περιβάλλοντος, των πλουτοπαραγωγικών πηγών και των υποδομών της χώρας,
- για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των εκτάκτων αναγκών και τη διαχείριση των συνεπειών του συμβάντος, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μεσοπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα,
- για την ενημέρωση των πολιτών· προϋπόθεση για την επίτευξη του σκοπού αυτού είναι η συνέργεια, η συνεργασία και η διαλειτουργικότητα των εμπλεκόμενων φορέων σε όλα τα επίπεδα διοίκησης [4].

### 2.2.2 Αντικειμενικοί στόχοι Ειδικού Σχεδίου

Οι αντικειμενικοί στόχοι του Ειδικού Σχεδίου είναι:

- Ο προσδιορισμός ρόλων και αρμοδιοτήτων όλων των εμπλεκόμενων φορέων σε κάθε επίπεδο Διοίκησης, σε όλες τις φάσεις κινητοποίησης του συστήματος Πολιτικής Προστασίας.
- Η συντονισμένη δράση όλων των εμπλεκόμενων φορέων, με βάση το θεσμικό τους πλαίσιο, με απώτερο σκοπό την αποκατάσταση της καθημερινής λειτουργίας των περιοχών της χώρας που έχουν πληγεί από τη διασυνοριακή έκτακτη ανάγκη [4].

### 2.2.3 Ανάλυση κινδύνου

Καθώς η χώρα δεν διαθέτει πυρηνικούς σταθμούς, η παρούσα περίπτωση έκτακτης ανάγκης αφορά ενδεχόμενο σοβαρό ατύχημα σε πυρηνικό σταθμό σε άλλο κράτος, με διασυνοριακές επιπτώσεις από την έκλυση ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Τα σοβαρά πυρηνικά ατυχήματα που έχουν μέχρι σήμερα συμβεί παγκοσμίως είναι ευρέως γνωστά λόγω των πολύ σοβαρών επιπτώσεών τους, αλλά και λόγω του κοινωνικού και οικονομικού αντικτύπου τους, καθώς και του μεγάλου ενδιαφέροντος του κοινού παγκοσμίως.

Τέτοια ατυχήματα ήταν το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl το 1986, αλλά και το πιο πρόσφατο στη Fukushima το 2011. Ένα σοβαρό ατύχημα σε πυρηνικό σταθμό στην Ευρώπη θεωρείται μικρής πιθανότητας, ειδικά μετά τις βελτιώσεις στο Ευρωπαϊκό σύστημα πυρηνικής ασφάλειας τα τελευταία χρόνια. Εντούτοις, ένα ατύχημα δεν μπορεί να αποκλειστεί εντελώς και επομένως απαιτείται να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης.

Ο ραδιολογικός κίνδυνος σε μία τέτοια περίπτωση συνδέεται με την άμεση έκθεση κατά τη διέλευση του ραδιενεργού νέφους, λόγω απευθείας ακτινοβόλησης από αυτό και λόγω εισπνοής του. Καθώς το ραδιενεργό νέφος μεταφέρεται και διασπείρεται στην ατμόσφαιρα, τμήμα των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχει εναποτίθεται στις περιοχές από τις οποίες διέρχεται. Η εναπόθεση επιτείνεται σημαντικά από τυχόν βροχοπτώσεις. Η ραδιενέργεια που αποτίθεται στο έδαφος προκαλεί, δευτερογενώς, εξωτερική έκθεση λόγω της απευθείας ακτινοβολίας και ενδεχόμενης εσωτερική έκθεση λόγω της κατάποσης ραδιοϊσοτόπων μέσω της ρύπανσης της τροφικής αλυσίδας και του νερού. Στις περισσότερες περιπτώσεις πυρηνικού ατυχήματος τα ραδιοϊσότοπα ενδιαφέροντος είναι κυρίως το **Ιώδιο-131**, το **Καίσιο-134** και το **Καίσιο-137**, τα οποία αποτελούν σημαντικούς δείκτες της ραδιενεργού ρύπανσης.

Σε περίπτωση ραδιενεργού ρύπανσης του εδάφους και των καλλιεργειών, τα πλέον επίφοβα είδη διατροφής, όσον αφορά την άμεση προστασία του πληθυσμού, είναι τα φυλλώδη λαχανικά, τα κηπευτικά και το γάλα από ζώα ελευθέρως βοσκής (εφεξής «πρώτη ομάδα προϊόντων»). Στην πρώτη ομάδα αυτή περιλαμβάνεται και το νερό της βροχής αν χρησιμοποιείται ως πόσιμο. Σε δεύτερο χρόνο, εξετάζονται και άλλα προϊόντα **φυτικής προέλευσης** (κυρίως ζωοτροφές) με εφαρμογή κατάλληλων πρωτοκόλλων δειγματοληψίας

και τη διενέργεια εργαστηριακών ελέγχων για τον προσδιορισμό των επιπέδων της ραδιενέργειας που περιέχουν. Σύμφωνα με τη διεθνή κατηγοριοποίηση των ραδιολογικών ή πυρηνικών κινδύνων, οι καταστάσεις έκτακτης ανάγκης λόγω πυρηνικού ατυχήματος εκτός συνόρων εντάσσονται στην «κατηγορία IV» του Πίνακα 1, δηλαδή ανήκουν σε κατηγορία σχετικά χαμηλού επιπέδου ραδιολογικού κινδύνου.

Πράγματι, οι αναλύσεις που έχουν γίνει ως σήμερα τεκμηριώνουν ότι οι πιθανές ραδιολογικές συνέπειες, πέραν μιας ζώνης μερικών δεκάδων χιλιομέτρων από τον σταθμό στον οποίο έγινε το ατύχημα, δεν υπερβαίνουν τα δοσιμετρικά κριτήρια για τη λήψη επειγόντων μέτρων προστασίας του γενικού πληθυσμού, όπως η εκκένωση ή η χορήγηση σταθερού Ιωδίου. Η συνθήκη αυτή ισχύει με μεγάλα περιθώρια ασφάλειας και για τη χώρα μας, δεδομένου ότι οι κοντινότεροι σταθμοί, δηλαδή Kozloduy (Βουλγαρία), Cernavoda (Ρουμανία), Pakks (Ουγγαρία) και Krško (Σλοβενία), απέχουν από τα σύνορα 250, 320, 600 και 700 km αντίστοιχα, ο δε υπό κατασκευή σταθμός Akkuyu (Τουρκία) απέχει 330 km. Ως εκ τούτου, η παρούσα περίπτωση έκτακτης ανάγκης δεν περιλαμβάνει επείγουσες δράσεις απόκρισης για την αντιμετώπιση επιπτώσεων στην υγεία του γενικού πληθυσμού, ενώ είναι αντιληπτό ότι δεν υπάρχουν επιπτώσεις και σε εργαζόμενους έκτακτης ανάγκης. Ωστόσο, ανάλογα με το μέγεθος της έκλυσης λόγω του ατυχήματος, και τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, μπορεί να λάβει χώρα μη αμελητέα διασπορά και εναπόθεση της ραδιενεργού ρύπανσης σε τμήματα της Ελληνικής επικράτειας, με αρνητικές συνέπειες στην αγροτική και κτηνοτροφική παραγωγή και ως εκ τούτου στη διάθεση τέτοιων προϊόντων στην αγορά, συμπεριλαμβανομένου και ενδεχόμενου πλήγματος στην εικόνα και την εμπιστοσύνη, τόσο στα ίδια τα παραγόμενα προϊόντα, όσο και γενικότερα στην κοινωνική λειτουργία και σε οικονομικές δραστηριότητες και κλάδους, όπως π.χ. ο τουρισμός [4].

#### **2.2.4 Κεντρική ιδέα της απόκρισης**

Λόγω των περιορισμένων πληροφοριών και δεδομένων για την εξέλιξη του ατυχήματος και της έκλυσης ραδιενέργειας, καθώς και της εν γένει μεγάλης αβεβαιότητας σε τέτοιου είδους ατυχήματα, η απόκριση βασίζεται καταρχάς σε εκτιμήσεις της διασποράς του ραδιενεργού νέφους και παροχής συστάσεων στον πληθυσμό για την ενδεδειγμένη συμπεριφορά πριν και κατά τη διάρκεια διέλευσης του ραδιενεργού νέφους.

Σε περίπτωση, ωστόσο όπου, είτε προβλέπεται βάσιμα είτε διαπιστώνεται από τις ενδείξεις του τηλεμετρικού δικτύου μέτρησης ραδιενέργειας ή άλλες μετρήσεις, η υπέρβαση του προκαθορισμένου κριτηρίου ρυθμού δόσης λόγω της ραδιενεργού ακτινοβολίας στον ελλαδικό χώρο («επιχειρησιακό επίπεδο επέμβασης», OIL), εφαρμόζονται άμεσα μέτρα περιορισμού της «πρώτης ομάδας προϊόντων». Το μέτρο λαμβάνεται πριν ακόμα γίνουν οι δειγματοληπτικές μετρήσεις σε τρόφιμα και περιβαλλοντικά δείγματα, δεδομένου ότι οι δειγματοληψίες και η διεξαγωγή αυτών των εργαστηριακών μετρήσεων απαιτούν χρόνο και δεν μπορούν να υποστηρίξουν την άμεση λήψη απόφασης. Αυτή η αρχική απόκριση, αν και συντηρητική, θα βοηθήσει στην αποφυγή πανικού και στη διατήρηση της εμπιστοσύνης

του πληθυσμού και της εικόνας και αξιοπιστίας των ελληνικών προϊόντων και κλάδων της οικονομίας.

Τα μέτρα απόκρισης σταδιακά θα προσαρμόζονται με βάση τις διαθέσιμες νέες πληροφορίες και τα αποτελέσματα από τη διεξαγωγή ενός εκτενούς προγράμματος δειγματοληπτικών μετρήσεων για τον προσδιορισμό της πραγματικής ρύπανσης του περιβάλλοντος, των τροφίμων και των ζωοτροφών.

Με βάση την εμπειρία του ατυχήματος του Chernobyl, μετά τη λήξη του ατυχήματος και της φάσης της έκτακτης ανάγκης, τα μέτρα απόκρισης πρέπει να περιλαμβάνουν τη φάση αποκατάστασης πολύμηνης διάρκειας, κατά την οποία το πρόγραμμα δειγματοληπτικών μετρήσεων εξακολουθεί να διενεργείται, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια των τροφίμων και ζωοτροφών σε όλη την περίοδο του βλαστικού κύκλου.

Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι, όπως αναγνωρίζεται πλέον διεθνώς, οι μη-ραδιολογικές συνέπειες ενός πυρηνικού ατυχήματος είναι εξίσου σημαντικές με τις ραδιολογικές. Τέτοιες συνέπειες σχετίζονται με τη διατάραξη της κανονικότητας (κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες) και το αντίστοιχο κόστος, καθώς και με ψυχολογικές επιπτώσεις λόγω του φόβου της ραδιενέργειας ή/και στιγματισμού, που μπορούν να υποβαθμίσουν συνολικά και σε σημαντικό βαθμό την υγεία και την ποιότητα ζωής εν γένει. Ως εκ τούτου, η διατήρηση της εμπιστοσύνης του πληθυσμού και η αποφυγή αυθαίρετων αντιδράσεων, με κόστος ακόμα και για την υγεία του πληθυσμού (π.χ. αναίτιες διακοπές κύησης) ή την οικονομία (π.χ. στιγματισμός περιοχών που μπορεί να θεωρηθεί ότι ενδέχεται να έχουν ρυπανθεί), αποτελούν βασικούς στόχους της απόκρισης [4].

### **2.2.5 Δράσεις Αντιμετώπισης Έκτακτων Αναγκών και Άμεσης/Βραχείας Διαχείρισης Συνεπειών**

Το Ειδικό Σχέδιο (ΕΣΑΡΠΕΑ) εξαιτίας σοβαρού ατυχήματος σε πυρηνική εγκατάσταση εκτός συνόρων είναι δυναμικό και εφαρμόζεται κατά το μέρος που απαιτείται σε κάθε περίπτωση, με βάση την ειδική εκτίμηση κινδύνου της ΕΕΑΕ και σύμφωνα με τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα, τα οποία φυσικά επανεξετάζονται και επανεκτιμώνται συνεχώς.

Η ΕΕΑΕ έχει την ευθύνη του σχεδιασμού των μέτρων απόκρισης σε κάθε περίπτωση, τα οποία εισηγείται στη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας (ΓΓΠΠ). Η ΓΓΠΠ έχει την ευθύνη της κινητοποίησης και του συντονισμού των δράσεων των λοιπών εμπλεκόμενων φορέων προς υλοποίηση των μέτρων απόκρισης. Η υπόψη έκτακτη ανάγκη, λόγω της φύσης της, δεν περιλαμβάνει σχεδόν αποκλειστικά, δράσεις προστασίας του πληθυσμού και διαχείρισης των συνεπειών, κυρίως όσον αφορά τα τρόφιμα και τις ζωοτροφές. Στο παρόν εδάφιο προσδιορίζονται οι δράσεις που λαμβάνουν χώρα και τα μέτρα που δρομολογούνται ξεχωριστά από τον κάθε έναν φορέα κατά τη φάση αντιμετώπισης της έκτακτης ανάγκης [4]:

- Δράσεις αναγγελίας
- Δρομολογούμενες άμεσες δράσεις προστασίας πληθυσμού, εφόσον απαιτούνται
- Δρομολογούμενες πάγιες δράσεις απόκρισης
- Δρομολογούμενες δράσεις απόκρισης λοιπών φορέων
- Επικοινωνίες
- Δειγματοληψίες και μετρήσεις ραδιενέργειας περιβάλλοντος και τροφίμων
- Διαχείριση των ρυπασμένων τροφίμων
- Λήξη Περιστατικού
- Ενημέρωση Κοινού

### **2.2.6 Δειγματοληψίες και μετρήσεις ραδιενέργειας περιβάλλοντος και τροφίμων**

Κατά τη φάση της απόκρισης της έκτακτης ανάγκης, αλλά και κατά τη φάση της αποκατάστασης που ακολουθεί μετά τη λήξη της έκτακτης ανάγκης, είναι απαραίτητο να διεξαχθούν εκτενείς δειγματοληψίες και μετρήσεις ραδιενέργειας, προκειμένου να γίνει εκτίμηση του περιστατικού και να υποστηριχθεί η λήψη αποφάσεων για τις δράσεις απόκρισης και τα μέτρα προστασίας. Με βάση τα αποτελέσματα των δειγματοληψιών και μετρήσεων – τροφίμων, νερού αέρα – γίνεται συνεχής επανεκτίμηση των συνθηκών, καθώς και των δράσεων/μέτρων που πιθανά έχουν δρομολογηθεί ή απαιτείται να δρομολογηθούν.

Κατά τη **φάση της απόκρισης στην έκτακτη ανάγκη** οι μετρήσεις των δειγμάτων αφορούν:

- Στον έκτακτο, άμεσο έλεγχο, εφόσον κρίνεται απαραίτητο, της «πρώτης ομάδας προϊόντων», συμπεριλαμβανομένου του βρόχινου νερού προοριζόμενου για ανθρώπινη κατανάλωση, ώστε να εντοπισθούν τυχόν υπερβάσεις επιτρεπόμενων τιμών σε σχέση με την άμεση κατανάλωση. Οι μετρήσεις διενεργούνται από την ΕΕΑΕ και το Δίκτυο Συνεργαζόμενων Εργαστηρίων<sup>1</sup>, ενώ οι δειγματοληψίες και η προώθηση των δειγμάτων προς τα εργαστήρια διενεργούνται από τις Περιφέρειες.
- Στη μέτρηση της διάχυτης γ-ακτινοβολίας και της ραδιενέργειας του αέρα, ώστε να γίνεται εκτίμηση της έντασης και της έκτασης του περιστατικού. Οι δειγματοληψίες και οι μετρήσεις διενεργούνται από την ΕΕΑΕ και το Δίκτυο Συνεργαζόμενων Εργαστηρίων.
- Στον συστηματικό έλεγχο του γάλακτος και φυτικών προϊόντων, σε σχέση με τη διάθεσή τους στην αγορά. Οι μετρήσεις διενεργούνται από την ΕΕΑΕ και το Δίκτυο

---

<sup>1</sup> Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ είναι μέλος του δικτύου συνεργαζόμενων εργαστηρίων



Συνεργαζόμενων Εργαστηρίων, ενώ οι δειγματοληψίες και η προώθηση των δειγμάτων προς τα εργαστήρια διενεργούνται από τις Περιφέρειες.

Κατά τη **φάση της αποκατάστασης**, που ακολουθεί τη λήξη της έκτακτης ανάγκης, οι μετρήσεις αφορούν:

- Στην εκτίμηση της ποιότητας του γάλακτος και φυτικών προϊόντων σε σχέση με τη διάθεσή τους στην αγορά για όλη την καλλιεργητική περίοδο, ώστε να καλυφθεί ένας πλήρης βλαστικός κύκλος τροφών και ζωοτροφών. Οι μετρήσεις διενεργούνται από την ΕΕΑΕ και το Δίκτυο Συνεργαζόμενων Εργαστηρίων, ενώ οι δειγματοληψίες και η προώθηση των δειγμάτων προς τα εργαστήρια διενεργούνται από τις Περιφέρειες.
- Στη ραδιενέργεια του εδάφους ώστε να γίνει εκτίμηση της έκτασης της ραδιενεργού ρύπανσης της Ελληνικής επικράτειας.
- Στη ραδιενέργεια των επιφανειακών υδάτων, κυρίως εάν υπάρχουν υπόνοιες ότι έχει επέλθει ρύπανση υδρολογικής λεκάνης που είναι σημαντική πηγή νερού ύδρευσης. Οι μετρήσεις διενεργούνται από την ΕΕΑΕ και το Δίκτυο Συνεργαζόμενων Εργαστηρίων, ενώ οι δειγματοληψίες και η προώθηση των δειγμάτων προς τα εργαστήρια διενεργούνται από τις Περιφέρειες σε περιοχές που θα υποδειχθούν από την ΕΕΑΕ [4].

### 2.2.7 Εκτέλεση δειγματοληψιών και διακίνηση των δειγμάτων

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, κατά τη διάρκεια της απόκρισης αλλά και της αποκατάστασης σε έκτακτη ανάγκη, απαιτείται μεγάλος όγκος δειγματοληψιών οι οποίες πραγματοποιούνται από τις εμπλεκόμενες Περιφέρειες, ενώ τα δείγματα προωθούνται προς την ΕΕΑΕ και τα συνεργαζόμενα με αυτήν εργαστήρια για τις σχετικές αναλύσεις. Οι δειγματοληψίες πραγματοποιούνται ακολουθώντας συγκεκριμένα πρωτόκολλα, όπως περιγράφεται στους Πίνακες 2 και

Πίνακας 3 και σύμφωνα με τις ακόλουθες γενικές οδηγίες:

- Η περιοδική δειγματοληψία γίνεται πάντα από το ίδιο σημείο.
- Η δειγματοληψία επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική, δηλαδή, λαμβανομένου υπόψη του πλήθους των προς συλλογή δειγμάτων, να καλύπτονται όσο γίνεται καλύτερα παράμετροι όπως π.χ. τα διαστήματα δειγματοληψίας, τα διαφορετικά φυτικά είδη, κλπ.
- Το δείγμα συσκευάζεται, σφραγίζεται και συνοδεύεται από τα παρακάτω στοιχεία: Περιφερειακή Ενότητα, Δήμος, περιοχή, είδος, ποσότητα που αντιπροσωπεύει το δείγμα, ημερομηνία και ώρα δειγματοληψίας.
- Η ετικέτα με τα στοιχεία του δείγματος υπογράφεται από τον υπεύθυνο της δειγματοληψίας.

- Για δειγματοληψίες από καλλιέργειες: για χαμηλού ύψους καλλιέργειες (μαρούλι, σπανάκι, πατάτες κλπ.) λαμβάνεται δείγμα από τυχαία φυτά κατά διαστήματα, επιδιώκοντας να καλυφθεί όσο γίνεται μεγαλύτερη επιφάνεια της έκτασης. Από δενδρώδεις καλλιέργειες, λαμβάνεται δείγμα από κάθε ομοιόμορφη δενδροκομική έκταση. Οι καρποί συλλέγονται τυχαία από την εξωτερική επιφάνεια της κόμης και στο ύψος ενός ανθρώπου, από τυχαία δένδρα κατά διαστήματα [4].

Οι Περιφέρειες οφείλουν να αποστέλλουν χωρίς καθυστέρηση στα εργαστήρια μετρήσεων τα δείγματα που συλλέγουν, σύμφωνα με πίνακα γεωγραφικής κατανομής (Πίνακας 4). Ο Πίνακας 4 είναι ενδεικτικός και μπορεί να αναπροσαρμοστεί από την ΕΕΑΕ, που έχει τον συντονισμό όλου το έργου των αναλύσεων δειγμάτων, συνεκτιμώντας τις επικρατούσες συνθήκες της έκτακτης ανάγκης και λαμβάνοντας υπόψη την ετοιμότητα και διαθεσιμότητα των εργαστηρίων του Δικτύου Συνεργαζόμενων Εργαστηρίων. Ο κατά περίπτωση ισχύων Πίνακας 4 με όλα τα στοιχεία επαφής, κοινοποιείται έγκαιρα από την ΕΕΑΕ στη ΓΓΠΠ προς περαιτέρω διανομή [4].

**Πίνακας 2:** Δειγματοληψίες «πρώτης ομάδας τροφίμων» κατά τη φάση της έκτακτης ανάγκης.

α/α	Είδος δείγματος	Σημείο δειγματοληψίας	Συνολικό πλήθος δειγμάτων	Ποσότητα ενός δείγματος
1	Γάλα αιγοπροβάτων από ζώα ελεύθερης βοσκής	Από προεπιλεγμένες κτηνοτροφικές μονάδες* της Περιφερειακής Ενότητας	3 εβδομαδιαίως	Ένα λίτρο
2	Γάλα αγελάδας από ζώα ελεύθερης βοσκής	Από προεπιλεγμένες κτηνοτροφικές μονάδες* της Περιφερειακής Ενότητας	2 εβδομαδιαίως	Ένα λίτρο
3	Λαχανικά και κηπευτικά υπαίθριας καλλιέργειας**	Από προεπιλεγμένες αγροτικές μονάδες*** της Περιφερειακής Ενότητας	2 εβδομαδιαίως (όλα τα διαφορετικά είδη)	Ένα κιλό από το είδος
4	Νερό ανθρώπινης κατανάλωσης	<u>Η δειγματοληψία γίνεται μόνο σε τυχόν Δήμους της Περιφερειακής ενότητας όπου το σύστημα ύδρευσης περιλαμβάνει συλλογή βρόχινου νερού.</u> (σύμφωνα με τις διαδικασίες ΚΥΑ Π/112/1057/2016, ιδίως του άρθρου 5 αυτής)	2 εβδομαδιαίως από κάθε Δήμο που τυγχάνει εφαρμογής.	Σύμφωνα με τις διαδικασίες της ΚΥΑ Π/112/1057/2016

- \* Οι κτηνοτροφικές μονάδες των περιπτώσεων 1 και 2 μπορεί να είναι οι ίδιες.  
 \*\* Επιλέγονται, ανάλογα με την εποχή και τα είδη που καλλιεργούνται στην Περιφερειακή Ενότητα, κάποια από τα ακόλουθα είδη: μαρούλι, μπρόκολο, λάχανο, κουνουπίδι, σπανάκι, ραδίκια, αμπελόφυλλα, μανιτάρια, αγκινάρες.  
 \*\*\* Από την ίδια αγροτική μονάδα μπορεί να ληφθούν δείγματα διαφορετικών ειδών.

**Πίνακας 3:** Δειγματοληψίες κατά τη φάση της έκτακτης ανάγκης και κατά τη φάση της αποκατάστασης.

α/α	Είδος δείγματος	Σημείο δειγματοληψίας	Συνολικό πλήθος δειγμάτων	Ποσότητα ενός δείγματος
1	Γάλα αιγοπροβάτων	Από προεπιλεγμένες κτηνοτροφικές μονάδες* των Περιφερειακών Ενοτήτων	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σύμφωνα με ΕΣΑΡΠΕΑ</li> <li>• Συχνότητα: εβδομαδιαία</li> </ul>	Ένα λίτρο
2	Γάλα αγελάδας	Από προεπιλεγμένες κτηνοτροφικές μονάδες* των Περιφερειακών Ενοτήτων		
3	Λαχανικά και κηπευτικά υπαίθριας καλλιέργειας**	Από δημοτικές αγορές των Περιφερειακών Ενοτήτων ( <u>νοείται ότι λαμβάνονται δείγματα τοπικά παραγόμενων προϊόντων</u> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σύμφωνα με ΕΣΑΡΠΕΑ</li> <li>• Συχνότητα: εβδομαδιαία</li> </ul>	Ένα κιλό από το είδος
4	Φρούτα			Ένα κιλό
5	Πατάτες			Ένα κιλό
6	Βρώμη – Σίκαλη – Σιτάρι σκληρό και μαλακό	Από τις Περιφερειακές Ενοότητες	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σύμφωνα με ΕΣΑΡΠΕΑ</li> <li>• Συχνότητα: εφάπαξ πριν την συγκομιδή</li> </ul>	Ένα κιλό
7	Επιφανειακά ύδατα (μόνο κατά τη φάση της αποκατάστασης και μόνο μετά από ειδική υπόδειξη)	Από πιθανά μέρη που θα υποδείξει η ΕΕΑΕ (όπως συγκεκριμένες λίμνες, ποτάμια)	Ένα δείγμα την εβδομάδα από κάθε μέρος δειγματοληψίας που έχει υποδειχθεί	Ένα κιλό
8	Έδαφος (μόνο κατά τη φάση της αποκατάστασης)	Μέχρι δέκα θέσεις σε κάθε Περιφερειακή Ενότητα	Ένα δείγμα από κάθε θέση σε κάθε κιλό δειγματοληψιών μετά από σήμα της ΕΕΑΕ	Δείγμα από επιφάνεια διαστάσεων 10 x 20 cm και βάθος 5 cm

- \* Οι κτηνοτροφικές μονάδες των περιπτώσεων 1 και 2 μπορεί να είναι ίδιες

- \*\* Ανάλογα με την εποχή και τα είδη που καλλιεργούνται στην Περιφερειακή Ενότητα, επιλέγονται κάποια (π.χ. ένα, δύο ή τρία διαφορετικά) από τα ακόλουθα είδη: μαρούλι, μπρόκολο, λάχανο, κουνουπίδι, καρότα, σπανάκι, ραδίκια, μαιντανός, άνηθος, σέλινο, αμπελόφυλλα, παντζάρια, μανιτάρια, κρεμμύδια, σκόρδα, κουκιά, αγκινάρες.
- \*\*\* Αν το πλήθος των δειγμάτων είναι μεγαλύτερο του ενός, το κάθε δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό έκτασης 10.000 στρεμμάτων.

**Πίνακας 4:** Κατανομή των εργαστηρίων μετρήσεων κατά Περιφέρειες.

Περιφέρεια	Εργαστήριο Μετρήσεων
Αττικής	Τμήμα Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της ΕΕΑΕ
Θεσσαλίας	
Βορείου Αιγαίου	
Στερεάς Ελλάδας	Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»
Δυτικής Ελλάδας	
Πελοποννήσου	Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ
Ηπείρου	Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Δυτικής Μακεδονίας	Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του Τμήματος Φυσικής του ΑΠΘ
Κεντρικής Μακεδονίας	Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ
Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης	
Κρήτης	Εργαστήριο Αναλυτικής και Περιβαλλοντικής Χημείας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης
Νοτίου Αιγαίου	Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του ΕΛΚΕΘΕ
Ιονίων Νήσων	

### 2.3 Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα 4, το ΕΠΤ-ΕΜΠ πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκριθεί άμεσα σε περίπτωση κατάστασης έκτακτης ανάγκης για την ανάλυση δειγμάτων τροφίμων τα οποία θα προσκομισθούν στον εργαστήριο από την περιοχή της Πελοποννήσου με ευθύνη της Περιφέρειας, Μία από τις βασικές δραστηριότητες του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) είναι η μέτρηση ραδιενέργειας πάσης φύσεως δειγμάτων – και κατά συνέπεια τροφίμων και περιβαλλοντολογικών δειγμάτων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες αναλυτικές τεχνικές με σημαντικότερη αυτήν της γ-φασματοσκοπίας. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη συλλογή και την εκμετάλλευση του φάσματος της γ-ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα προς ανάλυση δείγματα με στόχο τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχονται σε αυτά.

Για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθενται τέσσερις ανιχνευτές Υπερκαθαρού Γερμανίου (High Purity Germanium – HPGe) για ανάλυση στο εργαστήριο (in vitro) και ένας ανιχνευτής HPGe για ανάλυση στο πεδίο (in situ). Για την γ-φασματοσκοπική ανάλυση, τα δείγματα τοποθετούνται πάνω στον εκάστοτε ανιχνευτή και ξεκινά η συλλογή γ-φάσματος. Το φάσμα συλλέγεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και με χρήση κατάλληλου λογισμικού ολοκληρώνεται η ανάλυση του δείγματος.

Η βαθμονόμηση των ανιχνευτών για τις διάφορες γεωμετρίες δειγμάτων που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο, πραγματοποιείται είτε πειραματικά με πιστοποιημένες πηγές βαθμονόμησης είτε μέσω προσομοίωσης με κώδικες Monte Carlo, είτε με μικτές μεθόδους.

Η ποιότητα των αναλύσεων που γίνονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ ελέγχεται συνεχώς μέσω της συμμετοχής του εργαστηρίου σε διεθνές Ασκήσεις Διασύγκρισης (Intercomparison Exercises και Proficiency Tests) στα πλαίσια του δικτύου ALMERA του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ). Επιπλέον, το ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι μέλος του διεθνούς δικτύου εργαστηρίων ICRM (International Committee for Radionuclide Metrology) και στα πλαίσια αυτής της δραστηριότητάς του στην μετρολογία ραδιενεργών ισοτόπων, γίνεται συνεχής προσπάθεια για βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων και των κατώτερων επιπέδων ανίχνευσης. Τέλος, το ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι εργαστήριο αναγνωρισμένο από την ΕΕΑΕ για την πραγματοποίηση μετρήσεων ραδιενέργειας με την τεχνική της γ-φασματοσκοπίας.

Στην *Εικόνα 1* που ακολουθεί διακρίνεται μία άποψη του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ και ένας από τους τέσσερις ανιχνευτές HPGe – συγκεκριμένα ο ανιχνευτής τύπου XtRa.

Σε επόμενες παραγράφους θα δοθούν περισσότερες πληροφορίες για τους ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της ΔΕ, τις γεωμετρίες δείγματος και τις σχετικές συναρτήσεις βαθμονόμησης απόδοσης.



**Εικόνα 1:** Εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

### 3. Προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων τροφίμων

#### 3.1 Φιλοσοφία της δειγματοληψίας

Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η απειλή για την υγεία του πληθυσμού εξαιτίας του πυρηνικού ατυχήματος, ενεργοποιείται το σχέδιο άμεσης δράσης. Ένα ζωτικής σημασίας κομμάτι του εν λόγω προγράμματος αποτελεί η εγγύηση της ασφαλούς κατανάλωσης γεωργικών τροφίμων. Ωστόσο, σε μία τέτοια περίπτωση είναι αδύνατο να γίνει εξέταση όλων των γεωργικών προϊόντων που διατίθενται στην αγορά. Επομένως, απαιτείται μια επιλεκτική δειγματοληψία που θα παρέχει τα αναγκαία δείγματα για τον προσδιορισμό της δυνητικής ρύπανσης των τροφίμων από ραδιοϊσότοπα [5]. Προς την κατεύθυνση αυτή προτιμώνται φυτικά και ζωικά προϊόντα, τα οποία, είτε έχουν καταταχθεί εμπειρικά ως περισσότερο επίφοβα στη ρύπανση, είτε παρουσιάζουν συσσώρευση ραδιοϊσοτόπων, τα οποία μεταφέρονται από την ατμόσφαιρα, το νερό και το έδαφος.

Κύρια ανησυχία αποτελούν τα γεωργικά προϊόντα με βρώσιμα μέρη τα οποία εκτίθενται στη ρύπανση. Όσον αφορά τα λαχανικά, οι υψηλότερες περιεκτικότητες σε ραδιοϊσότοπα βρίσκονται στα φυλλώδη λαχανικά που καλλιεργούνται σε ανοικτά πεδία και ειδικά σε αυτά με μακρά χρονική διάρκεια ανάπτυξης και μεγάλη επιφάνεια φύλλων (π.χ. λάχανο) [5].

Τα φυτικά τρόφιμα που υπόκεινται σε παρακολούθηση πρέπει να επιλέγονται με τρόπο τέτοιο ώστε να διασφαλίζεται ότι περιλαμβάνονται όλες οι κατηγορίες των προϊόντων που είναι έτοιμα για συγκομιδή, από όλες τις γεωργικές περιοχές που σχετίζονται με την εφοδιαστική αλυσίδα του ανθρώπινου πληθυσμού και για όλες τις εποχές του χρόνου.

Για την παρακολούθηση των λαχανικών και των φρούτων που καλλιεργούνται σε ανοικτά πεδία, συνιστάται – για λόγους ταχύτητας – η επιλογή να περιοριστεί στα είδη εκείνα που κυριαρχούν στη γεωργική βιομηχανία μιας περιοχής, είτε από πλευράς επιφάνειας είτε από πλευράς όγκου παραγωγής [6], [7].

#### 3.2 Αποθήκευση των δειγμάτων

Μετά τη συλλογή, τα δείγματα πρέπει να αποθηκεύονται κατάλληλα για να αποφευχθεί η σήψη, η αποσύνθεση αλλά και η οποιαδήποτε περαιτέρω ρύπανση τους. Επίσης, πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα προστασίας για να αποφευχθεί η ακούσια απομάκρυνση των ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία ενδεχομένως έχουν ρυπάνει τα δείγματα.

Σε περιόδους σύντομης αποθήκευσης πριν την ανάλυση, μπορεί να απαιτηθεί ψύξη, κατάψυξη ή προσθήκη συντηρητικού για τη διατήρηση βιολογικών δειγμάτων, όπως

θειώδες νάτριο, οινόπνευμα ή φορμαλδεΐδη (π.χ. στην περίπτωση του γάλακτος). Όταν απαιτούνται μακρές περιόδους αποθήκευσης, ενδέχεται να είναι προτιμότερο να αποκτήσουν τα δείγματα μια πιο σταθερή μορφή αμέσως μετά τη δειγματοληψία. Η ξήρανση (drying) του δείγματος επιτρέπει την επέκταση της διάρκειας αποθήκευσης. Ωστόσο, η θερμοκρασία πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά κατά τις διεργασίες αυτές για να αποφευχθεί η απώλεια ραδιενεργών ισotόπων κατά τη διαδικασία [8].

### 3.3 Καθαρισμός των τροφίμων

Ο καθαρισμός του δείγματος είναι ένα σημαντικό βήμα της προετοιμασίας του. Το δείγμα πρέπει να καθαριστεί από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο έχει πάνω του (π.χ. χώμα) ώστε να μην επηρεαστούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Σε αυτό το σημείο, επίσης, πρέπει να **αφαιρεθούν τα μη βρώσιμα μέρη των τροφίμων**, ώστε η μέτρηση να είναι ακόμα πιο αντιπροσωπευτική της ενδεχόμενης ραδιολογικής επιβάρυνσης από το υπόψη τρόφιμο.

Για να πραγματοποιηθεί ένας τυπικός καθαρισμός, το δείγμα τροφίμου πρέπει να πλυθεί με νερό για περίπου 3 λεπτά. Ο λόγος μεταξύ της μάζας του δείγματος και του νερού πρέπει να είναι ένα προς δέκα (1:10). Στη συνέχεια, το δείγμα αφήνεται να στραγγίξει για περίπου 2 λεπτά. Εάν είναι ιδιαίτερα λερωμένο, η διαδικασία πλυσίματος πρέπει να επαναληφθεί με τον ίδιο τρόπο. Τα φυλλώδη λαχανικά στεγνώνονται σε μια στεγνή πετσέτα. Επίσης, σημαντικό είναι να καθαρίζεται πολύ καλά και όλος ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την αποφυγή μεταφοράς της ρύπανσης από τον εξοπλισμό στα δείγματα (cross-contamination) [8].

Αναλυτικότερα, η διαδικασία καθαρισμού για ορισμένα τυπικά τρόφιμα παρατίθεται παρακάτω [5], [8], [9]:

- Μανιτάρια: Αφαίρεση των ριζών (μυκήλιο) και των κακώς διατηρημένων σημείων, ζύγιση του δείγματος και τυπικό ξέπλυμα.
- Πατάτες: Αφαίρεση βλαστών και ενδεχομένως χώματος και τυπικός καθαρισμός, αποφλοίωση και σύντομο ξέπλυμα για δεύτερη φορά. Η αποφλοίωση παραλείπεται εάν αναμένεται ότι η φλούδα θα καταναλωθεί.
- Μούρα: Αφαίρεση των κοτσανιών, των καταλοίπων ανθέων και των χαλασμένων καρπών. Ακολουθεί τυπικός καθαρισμός.
- Καρποί: Αφαίρεση φλούδας.
- Αυγά: Αφαίρεση φλοιού.
- Κρέας: Το μυϊκό κρέας πρέπει να απαλλαγεί από όλα τα οστά, τους τένοντες, τους σφιχτούς και ελαστικούς ιστούς καθώς και τα λιπαρά τμήματα, όσο αυτό είναι δυνατόν.

### 3.4 Ζύγιση του δείγματος

Το δείγμα πρέπει να ζυγίζεται μία φορά μετά τον καθαρισμό του κι ακόμη μία φορά μετά την διαδικασία της ξήρανσης, ώστε να είναι γνωστή η ξηρή του μάζα. Προφανώς, το τελικό δείγμα προς ανάλυση πρέπει επίσης να ζυγιστεί πριν την τοποθέτησή του στον αντίστοιχο ανιχνευτή, για τον ποσοτικό προσδιορισμό των ραδιενεργών ισοτόπων ενδιαφέροντος στο δείγμα κατά τη φασματοσκοπική ανάλυση [6].

### 3.5 Ξήρανση

Στις περιπτώσεις όπου τα δείγματα απαιτούν ξήρανση, καταλληλότεροι για τη τοποθέτηση και τον χειρισμό των δειγμάτων είναι οι νικελένιοι δίσκοι με χαμηλά ποσοστά άνθρακα (low carbon). Ωστόσο, δίσκοι από άλλο υλικό, οι οποίοι επικαλύπτονται με λεπτό φύλλο αλουμινίου το οποίο απορρίπτεται μετά από κάθε χρήση, μπορεί να είναι εξίσου ικανοποιητικοί. Οι δίσκοι καθαρίζονται εύκολα με απορρυπαντικό ή διαλύματα αραιού οξέος (συνήθως HCl).

Η θερμοκρασία για τη διαδικασία ξήρανσης ποικίλλει, αλλά συνίσταται ένα άνω όριο περί τους 450 °C. Για τα τρόφιμα επιλέγονται θερμοκρασίες από 70°C και άνω. Ο χρόνος της ξήρανσης εξαρτάται από τον τύπο και την ποσότητα του υλικού, καθώς μεγάλα δείγματα μπορεί να απαιτούν 16-24 ώρες. **Η διαδικασία της ξήρανσης πρέπει να περιορίζεται στις περιπτώσεις ραδιοϊσοτόπων που δεν ατμοποιούνται στις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες.** Ενδεικτικά, μεγάλη ποσότητα Καισίου χάνεται σε θερμοκρασίες άνω των 400°C, ενώ αν η ανάλυση γίνεται μόνο για το Στρόντιο, η θερμοκρασία ξήρανσης μπορεί να φτάσει έως τους 600°C [8].

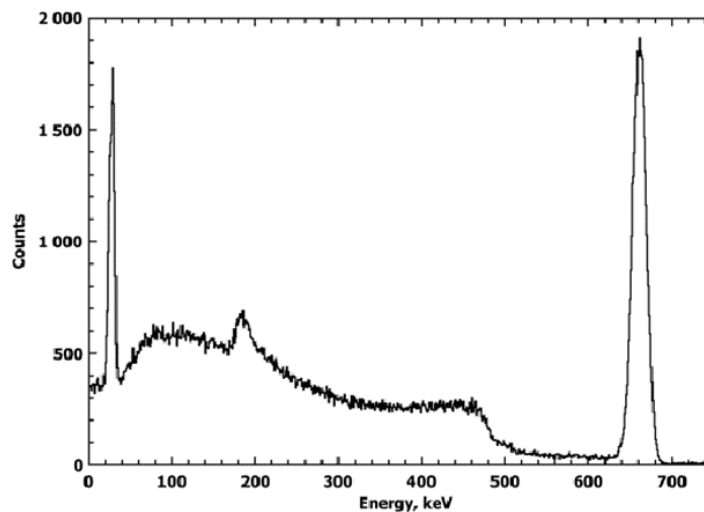
### 3.6 Ομογενοποίηση

Τα δείγματα μετά τη διαδικασία της ξήρανσης ομογενοποιούνται. Η ομογενοποίηση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, όπως π.χ. με αναμείκτη (blender). Είναι απαραίτητο να γίνεται ενδεδειγμένη ομογενοποίηση των δειγμάτων, προκειμένου να επιτυγχάνονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα κατά τις αναλύσεις που ακολουθούν. Παρόλα αυτά, ανεξάρτητα από την προσοχή που δίνεται στην ομογενοποίηση των δειγματικών υλικών, ένα δείγμα μπορεί να μην είναι πάντα αντιπροσωπευτικό του συνόλου από το οποίο προέρχεται, όπως παραδείγματος χάριν σε περιπτώσεις δειγμάτων όπου ορισμένα ραδιοϊσότοπα δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στον όγκο του δείγματος. Η συνιστώμενη διαδικασία για δείγματα αυτού του τύπου είναι να ληφθεί ένα δείγμα όσο το δυνατόν μεγαλύτερο, προκειμένου να είναι όσο γίνεται πιο αντιπροσωπευτικό του συνόλου [8].



### 3.7 γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων

Μετά την προετοιμασία τους τα δείγματα είναι έτοιμα για ανάλυση με στόχο τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχουν. Η τεχνική που συνήθως χρησιμοποιείται είναι αυτής της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, καθώς είναι αυτή που απαιτεί την ελάχιστη προετοιμασία των δειγμάτων και επιπλέον είναι διαθέσιμη στα περισσότερα εργαστήρια που διεξάγουν μετρήσεις ραδιενέργειας. Στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας (ΕΠΤ-ΕΜΠ) πραγματοποιούνται γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις με τη χρήση ανιχνευτών Υπερκαθαρού Γερμανίου (High Purity Germanium – HPGe). Το εξαιρετικό πλεονέκτημα της γ-φασματοσκοπίας είναι η δυνατότητα μέτρησης της γ-ακτινοβολίας απευθείας στο αρχικό δείγμα, χωρίς την ανάγκη ραδιοχημικής επεξεργασίας. Επίσης, η γ-φασματοσκοπία επιτρέπει τόσο τον ποιοτικό όσο και τον ποσοτικό προσδιορισμό των ραδιενεργών ισοτόπων στο δείγμα. Στην *εικόνα 2* διακρίνεται τυπικό γ-φάσμα.



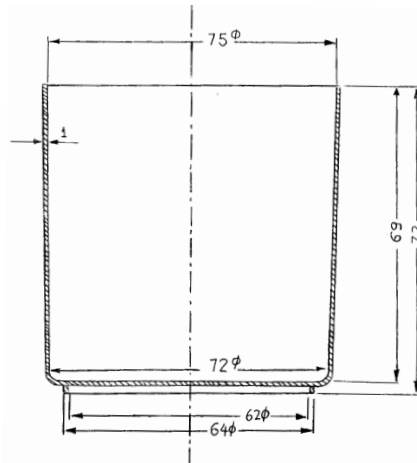
**Εικόνα 2:** Τυπικό γ-φάσμα στο οποίο διακρίνεται η φωτοκορυφή των φωτονίων του Cs-137

Όσον αφορά στη γεωμετρία του δείγματος, αυτή εξαρτάται από τον τύπο και την ποσότητα του δείγματος, τον διαθέσιμο εξοπλισμό και τα επίπεδα της ραδιενέργειας του δείγματος. Τα δείγματα που αναλύονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ συνήθως συσκευάζονται σε κυλινδρικά πλαστικά δοχεία με επίπεδη βάση και βιδωτό καπάκι (χωρητικότητας 282ml), όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3*. Το δείγμα, συνήθως σε ξηρή μορφή, συμπιέζεται στον καθορισμένο όγκο. Καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να μην υπάρχει επαρκής ποσότητα υλικού για να γεμίζει πλήρως ο δοχείο, έχουν τυποποιηθεί τρεις διαφορετικές γεωμετρίες δείγματος που βασίζονται στο δοχείο αυτό. Συγκεκριμένα:

- Γεωμετρία «2» όπου το δοχείο είναι πλήρες υλικού (όγκος 282ml)

- Γεωμετρία «5» όπου το δοχείο έχει πληρωθεί μέχρι ύψους 22mm (όγκος 97.2ml)
- Γεωμετρία «8» όπου το δοχείο έχει πληρωθεί μέχρι ύψους 10mm (όγκος 40ml)

Επιπλέον, ανάλογα με την εφαρμογή μπορούν να χρησιμοποιούνται και άλλα δοχεία μικρότερου όγκου ή και δοχεία Marinelli.



**Εικόνα 3:** Πλαστικό κυλινδρικό δοχείο όγκου 282ml που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την συσκευασία στερεών και υγρών δειγμάτων.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας για τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε οι παρακάτω ανιχνευτές:

- ανιχνευτής HPGe με σχετική απόδοση 40%, για την ανάλυση δειγμάτων τροφίμων,
- ανιχνευτής HPGe με σχετική απόδοση 33.8%, για την ανάλυση τυποποιημένων φίλτρων αέρα (glass fiber) διαμέτρου 4" που συλλέγονται με την φορητή αντλία TFIA-2 της Staplex.

Για τη συσκευασία των δειγμάτων τροφίμων χρησιμοποιήθηκε το δοχείο της *Εικόνας 3* σε διάφορες γεωμετρίες («2», «5» και «8»).

Τα δείγματα για την γ-φασματοσκοπική ανάλυση τοποθετούνται απευθείας πάνω στον ανιχνευτή για να υπάρχει μεγαλύτερη απόδοση. Ο χρόνος μέτρησης ποικίλλει, ανάλογα με τον τύπο του δείγματος, τα απαιτούμενα όρια ανίχνευσης, την απόδοση ανίχνευσης και τα ραδιενεργά ισότοπα που αναλύονται, και μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες έως και μερικές μέρες, ανάλογα από τα επίπεδα ραδιενέργειας του δείγματος και την αβεβαιότητα της μέτρησης που πρέπει να επιτευχθεί. Ένα δείγμα με χαμηλή ενέργεια θα χρειαστεί μεγάλο χρόνο μέτρησης, ώστε τα αποτελέσματα να είναι ικανοποιητικά [5].

Τα φάσματα της γ-ακτινοβολίας συνήθως αναλύονται από κατάλληλο λογισμικό που έχει αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό. Τα προγράμματα περιλαμβάνουν συνήθως δυνατότητες όπως [6]:

- αναζήτηση φωτοκορυφών,
- υπολογισμός της συνολικής και καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής,
- προσαρμογή βαθμονόμησης ενέργειας, διακριτικής ικανότητας και απόδοσης,
- αναγνώριση ραδιενεργών ισοτόπων στο φάσμα και ποσοτικοποίησή τους,
- διόρθωση λόγω διάσπασης από τη συλλογή ή και κατά τη διάρκεια της ανάλυσης,
- διόρθωση λόγω πραγματικής σύμπτωσης, και
- διόρθωση λόγω αυτοαπορρόφησης.

Στα πειράματα που λαμβάνουν χώρα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τη συλλογή του φάσματος των ανιχνευτών χρησιμοποιείται το λογισμικό Genie 2000. Ορισμένα βασικά και σημαντικά χαρακτηριστικά του λογισμικού αυτού είναι:

- Η απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο: Το λογισμικό επιτρέπει στους χρήστες να παρακολουθούν και να καταγράφουν τα γ-φάσματα που συλλέγονται. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι κρίσιμο για τη «ζωντανή» παρακολούθηση και τη λήψη αποφάσεων κατά τη διάρκεια πειραμάτων ή μετρήσεων.
- Η απόκτηση φάσματος: Το Genie 2000 μπορεί να συλλέξει και να αποθηκεύσει φάσματα γ-ακτινοβολίας από τον ανιχνευτή. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να αποθηκευτούν σε διάφορα μορφές για περαιτέρω ανάλυση.
- Η βαθμονόμηση ενέργειας: Το λογισμικό παρέχει εργαλεία για τη βαθμονόμηση ενέργειας, το οποίο είναι κρίσιμο για τον μετατροπή των αριθμών καναλιών στο φάσμα σε πραγματικές τιμές ενέργειας γ-ακτινοβολίας.

Για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φασμάτων που συλλέγονται χρησιμοποιείται το λογισμικό SPUNAL που έχει αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Στην εικόνα 4 που ακολουθεί παρατίθεται ένα μικρό τμήμα της λίστας αποτελεσμάτων από την ανάλυση ενός φάσματος με τον κώδικα SPUNAL.

R A D I O N U C L I D E A N A L Y S I S											
Isotope	A c t i v i t y		90% Error		N e t A c t i v i t y		90% Error		E n e r g i e s (keV)		
	Bq/								Theoretical	Estimated	Shift
Pb-210	9.30059E-04	+-	107.7 %	-4.26415E-04	+-	***** %	46.52	46.55	0.03		
Eu-152D ?	1.77154E-03	+-	107.7 %	1.77154E-03	+-	107.7 %	46.60		-0.05		
Th-234	2.07210E-03	+-	51.0 %	3.31382E-04	+-	323.6 %	63.29	63.36	0.07		
U-235	1.55546E-04	+-	60.7 %	1.55546E-04	+-	60.7 %	185.72	185.75	0.03		
U5-Ra6	8.39947E-05	+-	60.7 %	6.71381E-06	+-	767.1 %	185.99		-0.24		
Ra-226	2.56081E-03	+-	60.7 %	2.56081E-03	+-	60.7 %	186.25		-0.50		
Pb-214A	1.89457E-04	+-	104.6 %	3.42041E-05	+-	587.7 %	295.22	295.47	0.25		
Ac-228E ?	8.72430E-04	+-	108.6 %	8.72430E-04	+-	108.6 %	328.00	327.16	-0.84		
Pb-214B	1.15874E-04	+-	72.8 %	-3.34662E-05	+-	***** %	351.99	352.05	0.06		
Bi-214A	7.02535E-05	+-	73.5 %	-2.56643E-05	+-	***** %	609.32	609.43	0.11		
Ru-103B ?	6.12286E-04	+-	73.5 %	6.12286E-04	+-	73.5 %	610.30		-0.87		
K-40	7.91307E-03	+-	4.6 %	7.47399E-03	+-	4.9 %	1460.75	1461.00	0.25		
Bi-214C	9.95315E-05	+-	74.1 %	-2.16164E-05	+-	***** %	1764.51	1765.06	0.55		

Εικόνα 4: Τμήμα αναφοράς γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης από το πρόγραμμα SPUNAL

### 3.8 Υπολογισμός της Κατώτερης Ανιχνεύσιμης Ραδιενέργειας – MDA

Στο πλαίσιο της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης χρησιμοποιείται συχνά ο όρος MDA (Minimum Detectable Activity, ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια). Συγκεκριμένα, ο όρος αυτός αντιπροσωπεύει στην χαμηλότερη ποσότητα ραδιενέργειας ή συγκέντρωση ενός συγκεκριμένου ραδιοϊσοτόπου που υπάρχει σε ένα δείγμα, η οποία μπορεί να ανιχνευθεί και να μετρηθεί αξιόπιστα από ένα ανιχνευτικό σύστημα. Η κατώτερη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια απαντά στην ερώτηση «ποια είναι η ελάχιστη ποσότητα ραδιενέργειας που μπορεί να μετρηθεί σε ένα δείγμα;» [10]

Αρκετοί είναι οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν, και εν τέλει καθορίζουν, τη κατώτερη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια, όπως τα επίπεδα της φυσικής ακτινοβολίας του περιβάλλοντος (ακτινοβολία υποστρώματος – background radiation), η ευαισθησία και η απόδοση του ανιχνευτή, ο χρόνος μέτρησης και η στατιστική αβεβαιότητα που σχετίζεται με τις μετρήσεις και φυσικά το συγκεκριμένο ισότοπο. Η επίτευξη χαμηλού MDA είναι κρίσιμη καθώς διασφαλίζει την ανίχνευση και της ακριβή μέτρηση ραδιενεργών δειγμάτων, ακόμη και σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Στο πλαίσιο της ΔΕ, για τον υπολογισμό του MDA χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$MDA = \frac{L_d}{t_s * yield * eff * mass} \quad (1)$$

όπου:

$t_s$ : ο χρόνος συλλογής του φάσματος,

**eff**: η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή για τη συγκεκριμένη ενέργεια στην οποία εκπέμπει το υπόψη ισότοπο,

**mass**: η μάζα του δείγματος,

**$L_d$** : το όριο ανίχνευσης σε πλήθος καταμετρημένων γεγονότων (counts), δηλαδή η ελάχιστη τιμή που πρέπει να έχει η επιφάνεια μίας φωτοκορυφής, ώστε να μπορεί να ανιχνευθεί.

Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν τα μεγέθη που εμφανίζονται στη σχέση 1.

Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης λόγω πυρηνικού ατυχήματος, στα πρώτα τουλάχιστον στάδια, έχει ενδιαφέρον να μελετηθούν τα εξής ραδιοϊσότοπα:

- Cs-137 (661.657 keV)
- Cs-134 (604.721 keV)
- Cs-134 (795.864 keV)<sup>2</sup>
- I-131 (364.489 keV)

Για το λόγο αυτό στο πλαίσιο της ΔΕ το ενδιαφέρον εστιάσθηκε στα ισότοπα αυτά.

### 3.8.1 Απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή

Η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων μίας ανιχνευτικής διάταξης εξαρτάται από τον ίδιο τον ανιχνευτή, τη γεωμετρία του δείγματος και την ενέργεια του ισότοπου που μελετάται. Η απόδοση εκφράζει το ποσοστό των φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμπονται από την πηγή, τα οποία αποδίδουν όλη την ενέργεια στον ανιχνευτή, συνεισφέροντας στο σχηματισμό της αντίστοιχης φωτοκορυφής στο φάσμα. Η απόδοση υπολογίζεται πειραματικά, μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo, είτε με μικτές μεθόδους, και εκφράζεται ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων.

Ο ορισμός της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή είναι ο λόγος των γεγονότων που καταγράφονται από την διάταξη και τα οποία οφείλονται σε πλήρη απορρόφηση της ενέργειας των φωτονίων, προς το συνολικό πλήθος των φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμπονται από την πηγή. Η απόδοση φωτοκορυφής υπολογίζεται από την εξίσωση 2.

$$\varepsilon = \frac{area}{T * yield * A} \quad (2)$$

όπου:

**area**: το πλήθος γεγονότων υπό την φωτοκορυφή που αντιστοιχεί στα φωτόνια ενέργειας (χωρίς υπόστρωμα),

<sup>2</sup> Χάρην συντομίας, οι δύο ακτίνες-γ του Cs-134, ενέργειας 604.721 keV και 795.864 keV, θα αναφέρονται ως Cs-134(a) και Cs-134(b) αντίστοιχα.

**T**: η διάρκεια μέτρησης σε s,

**yield**: το ποσοστό εκπομπής των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας,

**A**: η ραδιενέργεια της πηγής σε Bq.

Η εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής (διαδικασία βαθμονόμησης) είναι απολύτως απαραίτητη για τον ποσοτικό προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων.

Οι ανιχνευτικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ έχουν βαθμονομηθεί στα πλαίσια μίας σειράς Διδακτορικών Διατριβών και Διπλωματικών Εργασιών για τις γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο.

Ειδικότερα, για τον ανιχνευτή Ge του ΕΠΤ-ΕΜΠ (με σχετική απόδοση 40%) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις δειγμάτων τροφίμων στο πλαίσιο της ΔΕ, έχουν εκτιμηθεί οι παρακάτω συναρτήσεις βαθμονόμησης απόδοσης:

- Για την γεωμετρία «2», η απόδοση *eff* του ανιχνευτή βρίσκεται μέσω των εξισώσεων:  
Για ενεργειακή περιοχή  $0 < E < 279.19$  keV, όπου E η ενέργεια των φωτονίων:

$$\ln(\text{eff}) = -22.8115 + 8.0057 \cdot \ln(E) - 0.8214 \cdot (\ln(E))^2 \quad (2)$$

και για ενεργειακή περιοχή  $E > 279.19$  keV:

$$\ln(\text{eff}) = 1.6403 - 1.1037 \cdot \ln(E) + 0.0257 \cdot (\ln(E))^2 \quad (3)$$

- Για την γεωμετρία «5», η απόδοση *eff* του ανιχνευτή βρίσκεται μέσω των εξισώσεων:  
Για ενεργειακή περιοχή  $0 < E < 300$  keV:

$$\ln(\text{eff}) = -22.1966 + 8.0595 \cdot \ln(E) - 0.8265 \cdot (\ln(E))^2 \quad (4)$$

και για ενεργειακή περιοχή  $E > 300$  keV:

$$\ln(\text{eff}) = 3.5895 - 1.4372 \cdot \ln(E) + 0.0460 \cdot (\ln(E))^2 \quad (5)$$

- Για την γεωμετρία «8» απόδοση *eff* του ανιχνευτή βρίσκεται μέσω των εξισώσεων:  
Για ενεργειακή περιοχή  $0 < E < 279.195$  keV:

$$\ln(\text{eff}) = -23.0539 + 8.5444 \cdot \ln(E) - 0.8782 \cdot (\ln(E))^2 \quad (6)$$

και για ενεργειακή περιοχή  $E > 279.195$  keV:

$$\ln(\text{eff}) = 3.2930 - 1.2619 \cdot \ln(E) + 0.0328 \cdot (\ln(E))^2 \quad (7)$$

Αντίστοιχα, για τον ανιχνευτή HPGe 33.8%, οποίος χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις φίλτρων αέρα γεωμετρίας «4» (φίλτρα αέρα διαμέτρου 4") έχουν εκτιμηθεί οι παρακάτω συναρτήσεις βαθμονόμησης απόδοσης:

Για ενεργειακή περιοχή  $0 < E < 279.19$  keV, όπου  $E$  η ενέργεια των φωτονίων:

$$\ln(\text{eff}) = -27.6447 + 10.1856 \cdot \ln(E) - 1.0384 \cdot (\ln(E))^2 \quad (9)$$

και για ενεργειακή περιοχή  $E > 279.195$  keV:

$$\ln(\text{eff}) = -1.9954 + 0.3125 \cdot \ln(E) - 0.0878 \cdot (\ln(E))^2 \quad (10)$$

### 3.8.2 Το όριο ανίχνευσης σε όρους επιφάνειας φωτοκορυφής (detection limit)

Το όριο ανίχνευσης ( $L_d$  – detection limit) σε πλήθος καταμετρημένων γεγονότων, δηλαδή σε όριο επιφάνειας φωτοκορυφής, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5 υπολογίζεται από την εξίσωση (11):

$$L_d = 2k_\alpha \sqrt{B_s \left(1 + \frac{n_s}{2m_s}\right) + A_b \left(1 + \frac{t_s}{t_b}\right) + B_b \left(1 + \frac{n_b}{2m_b}\right)} \quad (11)$$

όπου:

$k_\alpha$ : συντελεστής (coverage factor), ο οποίος για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ισούται με 1.645,

$B_s, B_b$ : η επιφάνεια του συνεχούς υποστρώματος στα φάσματα του δείγματος και του υποστρώματος<sup>3</sup> αντίστοιχα,

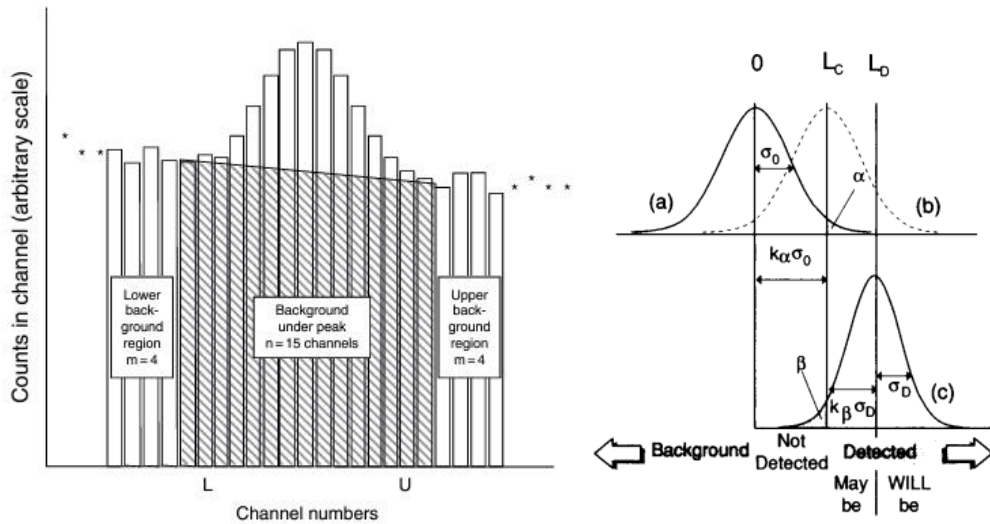
$t_s, t_b$ : ο χρόνος συλλογής των φασμάτων δείγματος και υποστρώματος αντίστοιχα,

$A_b$ : η καθαρή επιφάνεια της εκάστοτε φωτοκορυφής στο φάσμα του υποστρώματος,

$n_s, n_b$ : το πλήθος των καναλιών στα οποία κατανέμεται η φωτοκορυφή στα φάσματα δείγματος και υποστρώματος αντίστοιχα,

$m_s, m_b$ : το πλήθος των καναλιών αριστερά και δεξιά της φωτοκορυφής στα φάσματα του δείγματος και υποστρώματος για τον προσδιορισμό της επιφάνειας του συνεχούς υποστρώματος.

<sup>3</sup> Εφόσον ανιχνεύεται αυτή η φωτοκορυφή στο υπόστρωμα της διάταξης



**Εικόνα 5:** Αριστερά: Υπολογισμός της περιοχής κορυφής με χρήση εκτεταμένων περιοχών background. Δεξιά:  $L_d$  - Detection Limit,  $L_c$  - Critical Limit (αφορά την καθαρή επιφάνεια, αν είναι στατιστικά σημαντική),  $k_\alpha \sigma_0$  – πολλαπλάσιο τυπικής απόκλισης [10].

### 3.9 Το όριο προσδιορισμού (determination limit)

Το όριο προσδιορισμού ( $L_Q$  – determination limit) δείχνει το πλήθος των γεγονότων που πρέπει να καταγραφούν σε μία φωτοκορυφή, ώστε να επιτευχθεί ένα καθορισμένο επίπεδο αβεβαιότητας. Για τα πειράματα που διεξάχθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ ο υπολογισμός του  $L_Q$  πραγματοποιήθηκε για επίπεδο στατιστικής αβεβαιότητας 10% [10]. Δηλαδή, το μέγεθος αυτό απαντάει στο ερώτημα «ποια πρέπει να είναι η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής, πάνω από ορισμένο επίπεδο του υποστρώματος, για να έχει η επιφάνεια της φωτοκορυφής αβεβαιότητα 10%».

Το μέγεθος  $L_Q$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$L_Q = 50 \left( 1 + \left( 1 + B \frac{1 + \frac{n}{2m}}{25} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (12)$$

όπου:

**B:** η επιφάνεια του συνεχούς υποστρώματος στα φάσματα του δείγματος,

**n:** το πλήθος των καναλιών στα οποία κατανέμεται η φωτοκορυφή στα φάσματα δείγματος.

Η αξία του μεγέθους αυτού είναι ότι μπορεί δίνει μία ιδέα για το χρόνο που απαιτείται για την ανάλυση ενός δείγματος, προκειμένου να επιτευχθούν ορισμένα επίπεδα αβεβαιότητας.



### 3.10 Ο χρόνος προσδιορισμού (determination time)

Στα πλαίσια της εργασίας, και για την εξαγωγή συμπερασμάτων από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης διαφόρων δειγμάτων, αποφασίστηκε η εισαγωγή του όρου *determination time* (χρόνος προσδιορισμού), ο οποίος συνδέεται με το όριο προσδιορισμού  $L_Q$ . Ειδικότερα, ο χρόνος προσδιορισμού είναι ο χρόνος που απαιτείται για την ανάλυση ενός δείγματος, προκειμένου να επιτευχθεί η επιφάνεια  $L_Q$  και συνεπώς ορισμένα επίπεδα αβεβαιότητας. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος αυτός υπολογίζεται θεωρώντας το υπόστρωμα  $B$  σταθερό, ενώ όπως είναι γνωστό αυτό εξαρτάται από τη διάρκεια της ανάλυσης. Όταν ο χρόνος προσδιορισμού είναι μικρότερος από τη διάρκεια της φασματοσκοπικής ανάλυσης κατά την οποία εκτιμήθηκε το επίπεδο του υποστρώματος  $B$  που χρησιμοποιείται στη σχέση 12, αυτό δείχνει ότι το κατά τη διάρκεια της ανάλυσης έχει επιτευχθεί καλύτερη αβεβαιότητα από το όριο αβεβαιότητας που έχει τεθεί (στην περίπτωση της σχέσης 12 είναι 10%).

Στο πλαίσιο της ΔΕ, τα επίπεδα ραδιενέργειας στα δείγματα τροφίμων που επιλέχθηκαν να αναλυθούν για τα ισότοπα ενδιαφέροντος, είναι αυτά που αναφέρονται στις κατευθυντήριες γραμμές (Guidelines) του ΔΟΑΕ (IAEA TECDOC 1788) σχετικά με τα ισότοπα σε τρόφιμα που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση και διακινούνται διεθνώς, μετά από πυρηνική ή ραδιολογική έκτακτη ανάγκη [12], οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 5.

**Πίνακας 5:** Guideline Levels για τρόφιμα

Ισότοπο	Guideline Level (Bq/kg)
Cs-137	1000
Cs-134	1000
I-131	100

Ο χρόνος προσδιορισμού υπολογίστηκε από την εξίσωση (8):

$$\mathit{determination\ time} = \frac{L_Q}{\mathit{yield} * \mathit{eff} * \mathit{Guideline\ Level} * \mathit{total\ mass}} \quad (8)$$

Όπου ***total mass***, η συνολική μάζα του δείγματος που αναλύεται. Για τα ξηρά δείγματα γίνεται αναγωγή στη συνολική μάζα του δείγματος, ενώ για τα ωμά δείγματα ως συνολική μάζα θεωρήθηκε αυτούσια η μάζα του δείγματος.

Αντίστοιχα, για τις συγκεντρώσεις ισωτόπων στον αέρα μετά από ραδιολογικό ατύχημα, δεν βρέθηκαν δημοσιοποιημένες κατευθυντήριες γραμμές από τον ΔΟΑΕ – καθώς σε κανονικές συνθήκες δεν πρέπει να ανιχνεύονται τα ισότοπα ενδιαφέροντος στον αέρα – οπότε οι τιμές αναφοράς για το Καίσιο βασίστηκαν στις οδηγίες του US Department of Health and Human Services του 2004 [13] οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 Και αφορούν σε όρια για εκπομπές στον αέρα από ΠΑΙ ( $2 \cdot 10^{-10}$   $\mu\text{Bq} \cdot \text{mL}^{-1}$ ). Προφανώς, οι τιμές αυτές δεν είναι

αντιπροσωπευτικές της συγκέντρωσης στον αέρα μετά από ατύχημα, μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα από τον ΠΑΙ, χρησιμοποιήθηκαν όμως ως ενδεικτικές τιμές αναφοράς. Αξίζει να σημειωθεί πως οι τιμές αυτές είναι της ίδιας τάξης μεγέθους συγκέντρωσης που μετρήθηκαν στον αέρα στην Αθήνα μετά το ατύχημα στο Chernobyl. .

Πίνακας 6 Για το Ιώδιο δε βρέθηκε συγκεκριμένη τιμή αναφοράς.

**Πίνακας 6:** Guideline Levels για αέρα

Ισότοπο	Guideline Level (Bq·m <sup>3</sup> )
Cs-137	7.4
Cs-134	7.4

## 4. Προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων τροφίμων

Σε αυτό το σημείο της ΔΕ αρχίζει η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας για την προετοιμασία και γ-φασματοσκοπική ανάλυση των τροφίμων στο ΕΠΤ – ΕΜΠ. Τα είδη τροφίμων επιλέχθηκαν σύμφωνα με τον

*Πίνακας 3*, στον οποίο καταγράφονται τα τρόφιμα που πρέπει να μελετηθούν έπειτα από ένα ραδιολογικό ατύχημα. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα λαχανικά και κηπευτικά υπαίθριας καλλιέργειας (καθώς είναι τα πιο ευάλωτα να ρυπανθούν), η πατάτα, τα φρούτα, το σιτάρι και το γάλα από ζώα ελεύθερης βοσκής. Έχοντας ως στόχο την σύγκριση διαφορετικών τρόπων προετοιμασίας και την εύρεση της ταχύτερης/αποτελεσματικότερης μεθόδου, πραγματοποιήθηκαν για όλα τα τρόφιμα αρχικά τα βήματα προετοιμασίας, όπως περιγράφονται στην βιβλιογραφία. Στη συνέχεια για ορισμένα τρόφιμα παραλήφθηκε το βήμα της ξήρανσης για την επιτάχυνση της διαδικασίας, κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά οι διαδικασίες προετοιμασίας των διαφόρων τύπων τροφίμων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της ΔΕ.

### 4.1 Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος μαρουλιού

Το πρώτο τρόφιμο που επιλέχθηκε προς μελέτη ήταν το μαρούλι, με σκοπό να αναπτυχθεί αντιπροσωπευτική διαδικασία για όλα τα φυλλώδη λαχανικά. Μελετήθηκε (α) ένα δείγμα μαρουλιού, το οποίο είχε περάσει από την διαδικασία του τυπικού καθαρισμού, (β) ένα δείγμα το οποίο παρέμεινε χωρίς πλύση, και (γ) ένα πλυμένο δείγμα το οποίο δεν πέρασε από τη διαδικασία της ξήρανσης. Ειδικότερα, το τελευταίο δείγμα με προετοιμασία χωρίς ξήρανση είχε σκοπό να προσομοιωθούν οι συνθήκες που θα επικρατούσαν σε ένα σχέδιο έκτακτης ανάγκης, οπότε, λόγω μεγάλου όγκου δειγμάτων δε θα υπήρχε διαθέσιμος χρόνος αναμονής για την ανάλυση του δείγματος και απαιτείται μία ταχύτερη διαδικασία προετοιμασίας-ανάλυσης.

#### 4.1.1 Δείγμα μαρουλιού με πλύση και ξήρανση

Η διαδικασία προετοιμασίας ήταν η εξής: Αρχικά καθαρίστηκε το σκεύος (pyrex) που θα χρησιμοποιηθεί και επικαλύφθηκε με αλουμινοχαρτό, τόσο για να προστατευτεί το σκεύος όσο και για να διευκολυνθεί η διαδικασία απομάκρυνσης των όποιων υπολειμμάτων. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το δείγμα στο σκεύος κι αφέθηκε να στεγνώσει πλήρως. Το φύλλο αλουμινίου χρησιμοποιήθηκε κι ως διαχωριστικό μεταξύ των διαφορετικών δειγμάτων, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4*.

Στη συνέχεια, κάθε φύλλο του δείγματος πλύθηκε ξεχωριστά, περίπου 40 δευτερόλεπτα το καθένα, χρονικό διάστημα που θεωρήθηκε τυπικό για τον καθαρισμό ενός μαρουλιού πριν αυτό καταναλωθεί, ενώ αφαιρέθηκε και το μη βρώσιμο τμήμα του (κοτσάνι).

Στη συνέχεια, το δείγμα κόπηκε σε μικρότερα κομμάτια και ζυγίστηκε σε ζυγαριά ακριβείας. Η καθαρή μάζα του δείγματος ανήλθε στα 0.392 kg.



**Εικόνα 6:** Αριστερά: Χρήση αλουμινόχαρτου και σκεύους. Δεξιά: Πλύση του μαρουλιού.

Στη συνέχεια, το δείγμα τοποθετήθηκε σε φούρνο που είχε προθερμανθεί και αφέθηκε να αποξηραθεί στους 75 °C για 24 ώρες. Μετά την ξήρανση, το δείγμα θρυμματίστηκε σε μικρά κομμάτια και ζυγίστηκε η ξηρή του μάζα, η οποία ανήλθε σε 18 g.



**Εικόνα 7:** Πάνω αριστερά: Φούρνος ξήρανσης. Πάνω δεξιά: Ζύγιση σκεύους. Κάτω αριστερά: Ζύγιση μαρουλιού μετά την πλύση. Κάτω δεξιά: Ξήρανση μαρουλιού και μήλου.

Μετά την ξήρανση, το δείγμα ομογενοποιήθηκε σε μπλέντερ, τοποθετήθηκε σε ειδικό κυπελάκι και ζυγίστηκε ξανά. Η μάζα του δείγματος ήταν πάλι 18 g, δηλαδή δε υπήρχε απώλεια υλικού κατά τη διαδικασία αυτή. Η μάζα αυτή ήταν επαρκής για την προετοιμασία δείγματος γεωμετρίας 8, δηλαδή όγκου περίπου  $40 \text{ cm}^3$ . Όλα τα στοιχεία του δείγματος καταγράφηκαν λεπτομερώς σε αναγνωριστικό καρτελάκι.



**Εικόνα 8:** Πάνω αριστερά: Μαρούλι και μήλο μετά τη ξήρανση. Πάνω δεξιά: Θρυμματισμός μαρουλιού με πλύση. Κάτω αριστερά: Ομογενοποίηση του πλυμένου μαρουλιού σε μπλέντερ. Κάτω δεξιά: Καταγραφή δεδομένων, κυπελάκι γεωμετρίας 8.

Τέλος ακολούθησε η γ-φασματοσκοπική ανάλυση του δείγματος στον ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 40%.

#### 4.1.2 Δείγμα μαρουλιού χωρίς πλύση με ξήρανση

Στην περίπτωση αυτή, αρχικά αφαιρέθηκε το μη βρώσιμο τμήμα του δείγματος (κοτσάνι) και στη συνέχεια το δείγμα ζυγίστηκε με τη μάζα του να ανέρχεται στα 0.326 kg. Στη συνέχεια, το δείγμα τοποθετήθηκε στον φούρνο που είχε προθερμανθεί και αφέθηκε να αποξηραθεί στους  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  για 24 ώρες και ακολούθησε ο θρυμματισμός του δείγματος μετά

την αποξήρανση του (Εικόνα 88). Η ξηρή μάζα του μαρουλιού στην περίπτωση αυτή βρέθηκε 14 g, και επέτρεψε την κατασκευή δείγματος γεωμετρίας 8. Αφού καταγράφηκαν τα δεδομένα του δείγματος σε καρτελάκι, ακολούθησε η γ-φασματοσκοπική ανάλυση του δείγματος.

Αξίζει να παρατηρηθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν αρκετά δύσκολο να ξεκολλήσει πλήρως το δείγμα από το φύλλο αλουμινίου και για αυτόν τον λόγο στα υπόλοιπα δείγματα επιλέχθηκε η χρήση λαδόκολλας που δεν παρουσιάζει τέτοια προβλήματα.

#### 4.1.3 Δείγμα μαρουλιού χωρίς ξήρανση

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, επιλέχθηκε να μελετηθεί και ένα δείγμα μαρουλιού το οποίο δεν θα περνούσε από την διαδικασία της ξήρανσης και του θρυμματισμού, ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία και να εξεταστούν τα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής. Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, όπου ο χρόνος είναι περιορισμένος και τα δείγματα που πρέπει να μελετηθούν υπεράριθμα, η ταχύτητα της διαδικασίας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο.

Αρχικά, κάθε φύλλο του δείγματος πλύθηκε ξεχωριστά για περίπου 40 s, και στη συνέχεια αφαιρέθηκε κάθε μη βρώσιμο τμήμα π.χ. κοτσάνι. Έπειτα το δείγμα κόπηκε, πολτοποιήθηκε και ομογενοποιήθηκε σε μπλέντερ. Το δείγμα συμπιέστηκε σε δοχείο και διαμορφώθηκε δείγμα γεωμετρίας 5. Το δείγμα ζυγίστηκε και η μάζα του ανήλθε στα 82g. Στη συνέχεια καταγράφηκαν σε καρτελάκι όλα τα δεδομένα του δείγματος και ακολούθησε η γ-φασματοσκοπική ανάλυσή του.



Εικόνα 9: Ζύγιση ωμού μαρουλιού με την τάρα

Είναι μεγάλης σημασίας να αποφευχθεί η γεωμετρία «2», δηλαδή το πλήρες γέμισμα του δοχείου, καθώς, στην περίπτωση που δεν υπάρχει κενός χώρος στο δοχείο, υπάρχει πιθανότητα να διαρρεύσουν από το δοχείο υγρά που παράγονται κατά τη ζύμωση των τροφίμων, δηλαδή καθώς αυτά σαπίζουν. Ο παραπάνω περιορισμός δεν υφίσταται όταν

αφαιρείται η υγρασία του δείγματος, οπότε αυτό δύναται να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα.

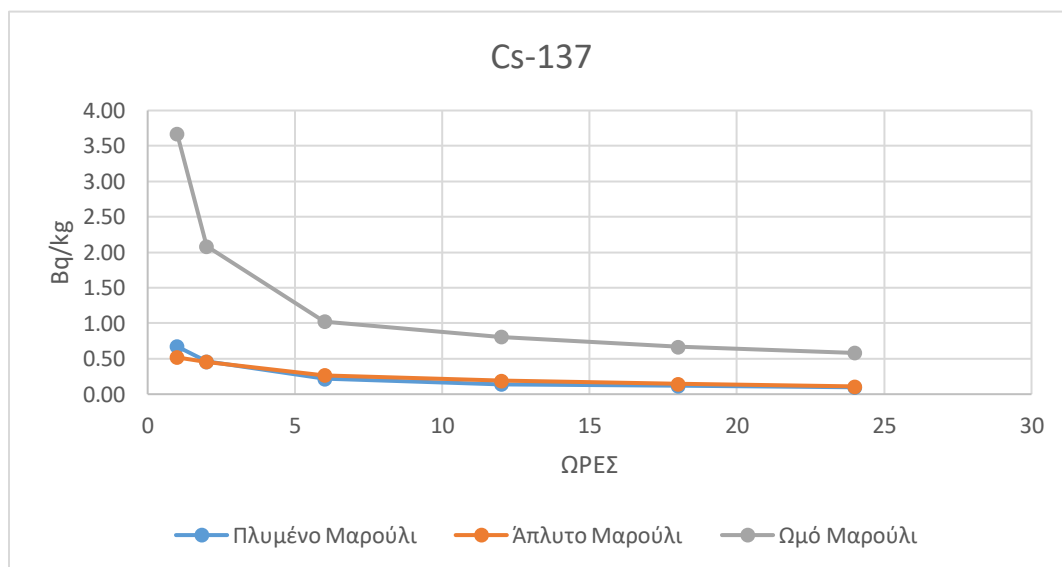
#### 4.1.4 Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση μαρουλιού

Όλα τα δείγματα μαρουλιού αναλύθηκαν από τον ίδιο ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 40%. Κατά την ανάλυση κάθε δείγματος συλλέχθηκαν έξι φάσματα, συγκεκριμένα: μετά την ολοκλήρωση της πρώτης και της δεύτερης ώρας μέτρησης και στη συνέχεια ανά έξι ώρες μέχρι την συμπλήρωση ενός εικοσιτετράωρου.

Για κάθε ένα από αυτά τα ισότοπα που μελετήθηκαν, για κάθε φάσμα και σενάριο προετοιμασίας του δείγματος, υπολογίστηκε το MDA, ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.8. Στον πίνακα 7 και στο Διάγραμμα 1 που ακολουθούν, παρατίθενται τα αποτελέσματα της εκτίμησης του MDA για το Cs-137.

**Πίνακας 7:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης (MDA) Cs-137 σε μαρούλι (σε Bq/kg).

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	0.67	0.52	3.67
2	0.46	0.45	2.08
6	0.22	0.27	1.03
12	0.14	0.19	0.81
18	0.12	0.15	0.67
24	0.10	0.11	0.58



**Διάγραμμα 1:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης (MDA) Cs-137 σε μαρούλι.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για το Cs-134 και το I-131. Τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στους Πίνακες 8, 9 και 10 που ακολουθούν, ενώ τα αντίστοιχα διαγράμματα μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Ι.

**Πίνακας 8:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(a) σε Bq/kg, μαρούλι.

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	0.47	0.59	2.69
2	0.32	0.34	1.82
6	0.16	0.21	0.91
12	0.12	0.15	0.68
18	0.10	0.12	0.55
24	0.08	0.09	0.47

**Πίνακας 9:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(b) σε Bq/kg, μαρούλι.

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	0.60	0.40	3.72
2	0.41	0.31	2.78
6	0.20	0.29	1.33
12	0.15	0.19	0.90
18	0.12	0.15	0.73
24	0.11	0.11	0.62



**Πίνακας 10:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης I-131 σε Bq/kg, μαρούλι.

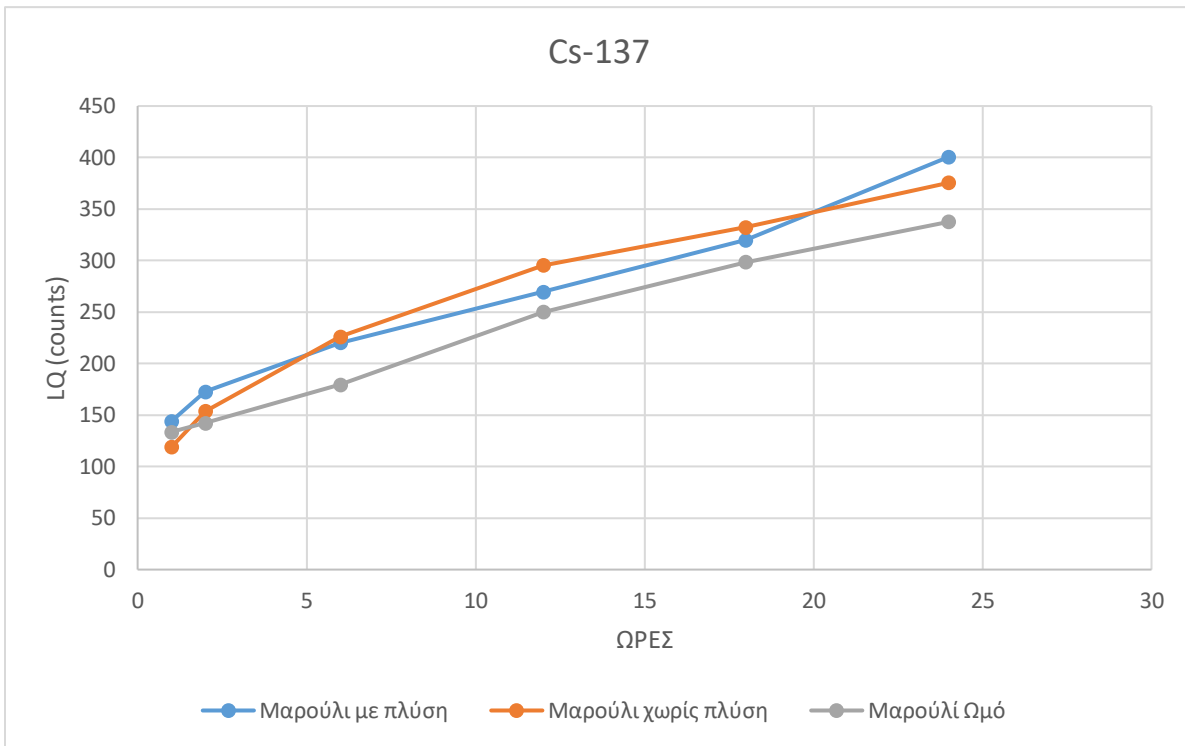
Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	0.48	0.53	2.96
2	0.34	0.35	1.82
6	0.18	0.20	1.02
12	0.12	0.14	0.70
18	0.10	0.11	0.56
24	0.09	0.08	0.49

#### 4.1.5 Εκτίμηση determination limit – determination time

Όπως αναφέρεται στο εδάφιο 3.10, για την εύρεση του determination limit ( $L_D$ ) χρησιμοποιήθηκε η συνολική μάζα κάθε δείγματος. Στις περιπτώσεις των ωμών δειγμάτων (χωρίς ξήρανση), η αναγωγή έγινε στη μάζα που είχε τοποθετηθεί στο δοχείο.

**Πίνακας 11:** Determination Limit  $L_D$  (10%) Cs-137 σε counts για μαρούλι.

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	144	119	134
2	173	154	142
6	220	226	179
12	270	295	250
18	320	332	298
24	401	375	338

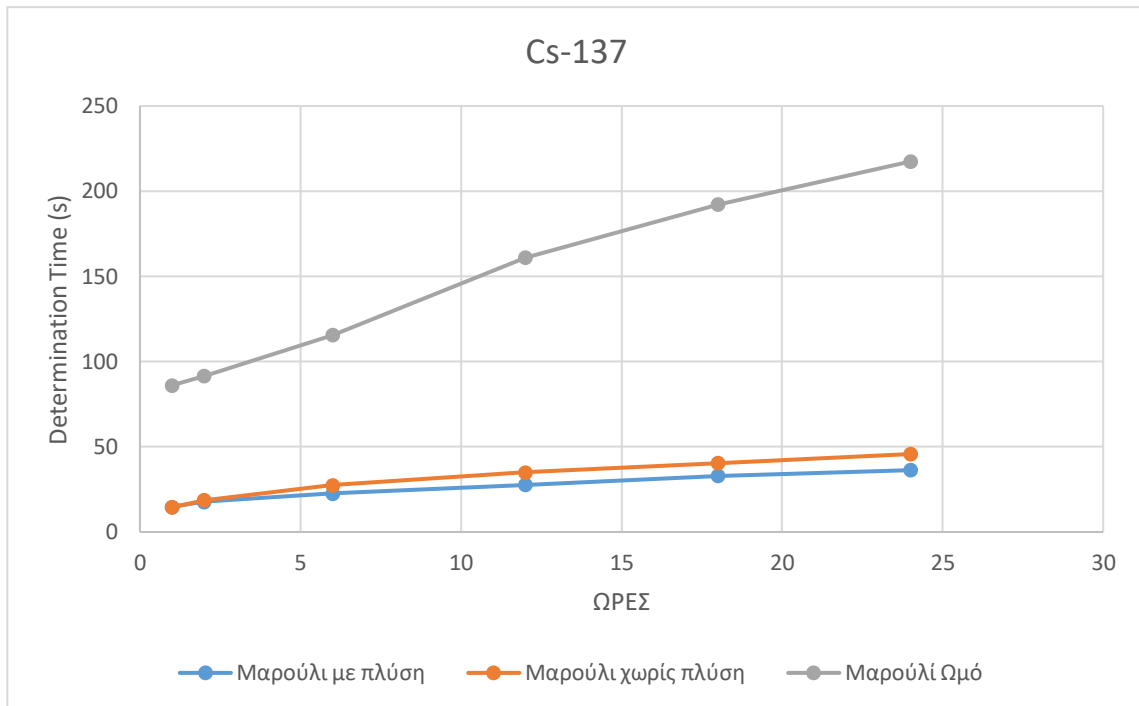


**Διάγραμμα 2:** Determination limit LQ (10%) για το μαρούλι.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για την εύρεση του determination time (Πίνακα 12). Σε όλες τις περιπτώσεις, ο χρόνος προσδιορισμού είναι πολύ μικρότερος από την πραγματική διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, δείχνοντας ότι για ραδιενέργεια δείγματος 1000 Bq/kg θα είχε επιτευχθεί στατιστική αβεβαιότητα πολύ καλύτερη του 10%.

**Πίνακας 12:** Determination time Cs-137 σε s για μαρούλι

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	15	14	86
2	18	19	92
6	23	28	116
12	28	35	161
18	33	40	192
24	36	46	217



**Διάγραμμα 3:** Determination time Cs-137, για μαρούλι.

Η διαδικασία για τα υπόλοιπα ισότοπα ήταν η ίδια – τα αντίστοιχα διαγράμματα μπορούν να βρεθούν στα Παραρτήματα II και III.

**Πίνακας 13:** Determination limit LQ (10%) Cs-134(a) σε counts για μαρούλι.

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	132	137	128
2	155	148	148
6	207	226	190
12	270	287	258
18	333	350	305
24	417	389	336

**Πίνακας 14:** Determination time Cs-134(a) σε s για μαρούλι

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	11	13	67
2	13	15	77
6	17	22	99
12	23	30	134
18	28	34	158
24	31	38	175

Για τα φωτόνια ενέργειας 795.864 keV του Cs-134 παρουσιάζονται παρακάτω οι τιμές determination limit (LQ) και determination time.

**Πίνακας 15:** Determination limit LQ (10%) Cs-134(b) σε counts, για μαρούλι.

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	126	108	126
2	146	121	154
6	182	200	194
12	252	264	243
18	287	291	286
24	401	325	317

**Πίνακας 16:** Determination time Cs-134(b) σε s, για μαρούλι.

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	11	11	66
2	12	12	80
6	15	20	101
12	21	25	126
18	24	29	149
24	28	32	165

Όμοια, τα αποτελέσματα για το ιώδιο I-131 παρουσιάζονται παρακάτω:

**Πίνακας 17:** Determination limit LQ (10%) I-131 σε counts, για μαρούλι.

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	151	146	151
2	186	171	171
6	262	269	249
12	343	337	323
18	416	419	379
24	570	467	431

**Πίνακας 18:** Determination time I-131 σε s, για μαρούλι.

Ώρες	Μαρούλι με πλύση και ξήρανση	Μαρούλι χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μαρούλι
1	99	112	606
2	121	130	685
6	170	206	996
12	224	271	1293
18	271	320	1519
24	307	356	1727

#### 4.1.6 Παρατηρήσεις

Αξίζει να παρατηρηθεί ότι οι τιμές του  $L_Q$  με αβεβαιότητα 10% είναι και στα τρία δείγματα αρκετά κοντινές, ενώ για το determination time παρατηρείται ότι οι τιμές του ωμού μαρουλιού είναι πάντα μεγαλύτερες από τις υπόλοιπες. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη μάζα του δείγματος που αναλύθηκε χωρίς να περάσει το στάδιο της ξήρανσης, λόγω της υγρασίας του. Επίσης, παρατηρείται ότι το μαρούλι χωρίς πλύση εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές determination time για όλα τα ραδιοϊσότοπα κάτι που είναι αναμενόμενο. Πάντως, σε κάθε περίπτωση το determination time είναι πολύ χαμηλότερο από τον πραγματικό χρόνο της φασματοσκοπικής ανάλυσης, κάτι που δείχνει ότι – εφόσον τα επίπεδα ραδιενέργειας σε ένα δείγμα είναι αυτά που υποτέθηκαν – σε μία φασματοσκοπική ανάλυση διάρκειας όπως προβλέπεται στα παραπάνω γραφήματα η αβεβαιότητα που θα επιτευχθεί θα είναι πολύ καλύτερη του 10%. Αντίστοιχα, θα μπορούσε να γίνει και μία εκτίμηση των επιπέδων ραδιενέργειας, για τα οποία στη διάρκεια μία φασματοσκοπικής ανάλυσης θα μπορούσε να επιτευχθεί αβεβαιότητα 10%.

## 4.2 Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος Μήλου

Το δεύτερο τρόφιμο που επιλέχθηκε προς μελέτη ήταν το μήλο, ως τυπικό δείγμα φρούτου με φλούδι. Αντίστοιχα με το μαρούλι, επιλέχθηκε να προετοιμασθεί και να αναλυθεί ένα δείγμα με πλύση, ένα δείγμα χωρίς πλύση και ένα δείγμα «ώμο», δηλαδή χωρίς να περάσει από την διαδικασία της ξήρανσης.

### 4.2.1 Μήλο με πλύση και ξήρανση

Αρχικά, έγινε πλύση του σκεύους και του λοιπού εξοπλισμού που θα χρησιμοποιούνταν. Στη συνέχεια, το δείγμα πλύθηκε με νερό για περίπου 40 δευτερόλεπτα και αφαιρέθηκαν τα μη βρώσιμα κομμάτια (κοτσάνι και κουκούτσια). Το δείγμα δεν καθαρίστηκε, καθώς θεωρήθηκε ότι το δυσμενέστερο, πλην όμως ρεαλιστικό, σενάριο είναι η βρώση χωρίς καθάρισμα.

Ακολούθως, προθερμάνθηκε ο φούρνος στους 75 °C και το δείγμα κόπηκε σε μεγάλες, φαρδιές φέτες ώστε να υπάρχει μεγάλη επιφάνεια. Στη συνέχεια ζυγίστηκε – η μάζα του ανήλθε στα 0.222 kg.

Το δείγμα αφέθηκε να αποξηραθεί στους 75 °C για 24 ώρες και μετά την αποξήρανση του, ζυγίστηκε – η ξηρή μάζα ήταν 34g. Στη συνέχεια έγινε προσπάθεια θρυμματισμού σε μπλέντερ, η οποία απέτυχε· τα αποξηραμένα κομμάτια μήλου ήταν εξαιρετικά σκληρά. Ως εκ τούτου, για την ομογενοποίηση του δείγματος χρησιμοποιήθηκε ο σπαστήρας (crasher) που διαθέτει το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας και χρησιμοποιείται για την προετοιμασία δειγμάτων πετρωμάτων και ορυκτών. Αυτό είναι ένα σημείο που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την προετοιμασία του δείγματος.



Εικόνα 10: Ζύγιση δείγματος μήλου



**Εικόνα 11:** Αριστερά: Ο σπαστήρας του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Δεξιά: Σύνθλιψη μήλου χειροκίνητα.

Σε αυτό το σημείο τοποθετήθηκε το ομογενοποιημένο δείγμα στο ειδικό δοχείο και ζυγίστηκε πάλι. Η μάζα του ανερχόταν πλέον στα 26 g, αποτέλεσμα το οποίο δηλώνει πως ένα ποσοστό του δείγματος χάθηκε. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς η χρήση του σπαστήρα, λόγω της πολύ μεγάλης δυσκολίας στη σύνθλιψη και ομογενοποίηση του δείγματος, πέραν του κινδύνου για cross-contamination, συνέβαλε επίσης στην απώλεια ορισμένης μάζας του δείγματος.

Τέλος, το δείγμα συσκευάστηκε σε γεωμετρία «8», καταγράφηκαν σε καρτελάκι όλα τα στοιχεία του και ακολούθησε η γ-φασματοσκοπική ανάλυσή του με χρήση ανιχνευτή HPGe.

#### 4.2.2 Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση

Παρόμοια διαδικασία με αυτήν που περιγράφεται παραπάνω ακολουθήθηκε και στη περίπτωση του μήλου που δε πέρασε από πλύση. Ο φούρνος προθερμάνθηκε στους 75 °C και το δείγμα κόπηκε σε μεγάλες, φαρδιές φέτες ώστε να υπάρχει μεγάλη επιφάνεια. Στη συνέχεια το δείγμα ζυγίστηκε και η μάζα του ανήλθε στα 0.218kg. Έπειτα, το δείγμα αφέθηκε να αποξηραθεί στους 75 °C για 24 ώρες και μετά την αποξήρανση του, ζυγίστηκε η ξηρή του μάζα στα 32g.

Παρατηρώντας και μελετώντας τις δυσκολίες που υπήρξαν στην σύνθλιψη και στην ομογενοποίηση του μήλου με πλύση, και έχοντας ως σκοπό την αποφυγή του σπαστήρα, επιλέχθηκε το δείγμα να συνθλιβεί πλήρως με το χέρι, με χρήση εργαλείων (Εικόνα 11). Αυτή η διαδικασία ήταν ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα, αλλά επιτεύχθηκε η αποφυγή του σπαστήρα. Τα πολύ μικρά – πλέον – κομμάτια του δείγματος ομογενοποιήθηκαν περαιτέρω στο μπλέντερ.

Στη συνέχεια, το δείγμα τοποθετήθηκε στο ειδικό δοχείο και η μάζα του ζυγίστηκε στα 32g, αποδεικνύοντας ότι με αυτήν την διαδικασία δεν χάθηκε αξιόλογο ποσοστό δείγματος. Παρόλα αυτά στο δοχείο τοποθετήθηκαν τελικά μόνο 26g προς μελέτη, για να επιτευχθεί η



γεωμετρία «8». Τα στοιχεία του δείγματος καταγράφηκαν σε καρτελάκι και ακολούθησε η γ-φασματοσκοπική ανάλυση.

#### 4.2.3 Μήλο χωρίς ξήρανση

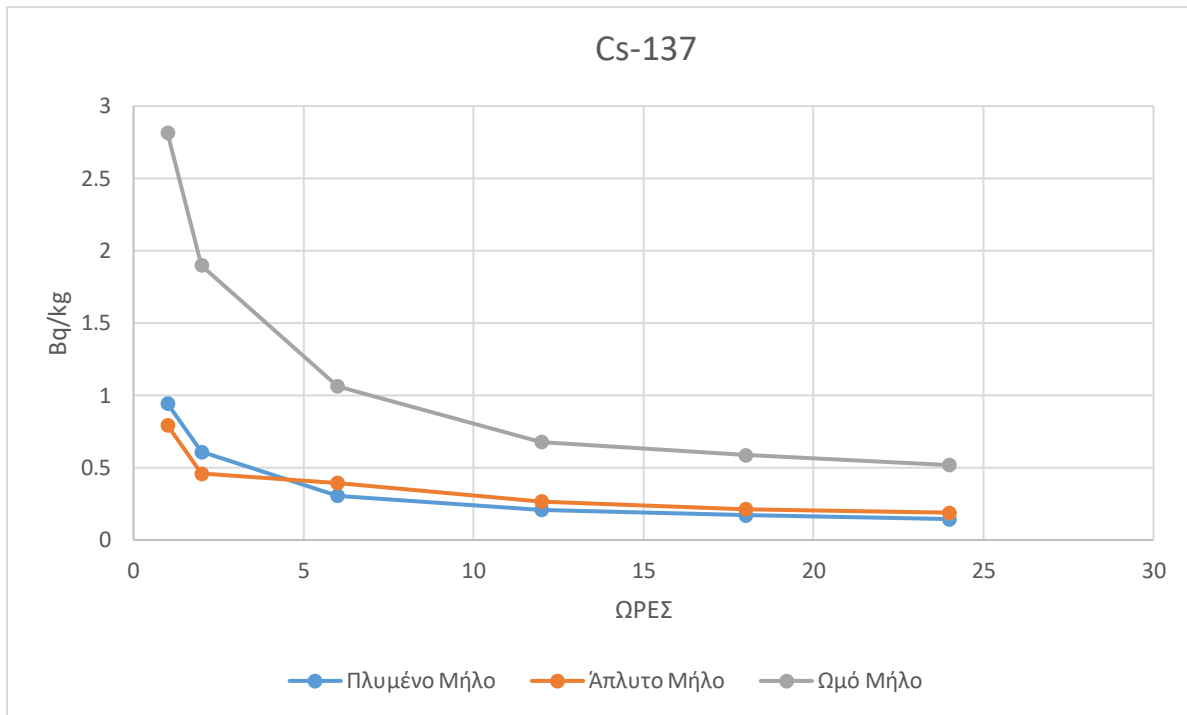
Στην περίπτωση του «ωμού» μήλου, το δείγμα πλύθηκε περίπου 40 δευτερόλεπτα και τα μη βρώσιμα κομμάτια του αφαιρέθηκαν (κοτσάνι και κουκούτσια). Έπειτα, κόπηκε και ομογενοποιήθηκε σε μπλέντερ. Τοποθετήθηκε σε ειδικό δοχείο για να διαμορφωθεί στη τυποποιημένη γεωμετρία «5» – η μάζα του ανήλθε στα 82g. Καταγράφηκαν όλα τα στοιχεία του δείγματος σε καρτελάκι και ακολούθησε η γ-φασματοσκοπική ανάλυση του δείγματος.

#### 4.2.4 Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση μήλου

Ακολούθησε η εύρεση MDA του δείγματος μήλου και ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, όπως στην περίπτωση του μαρουλιού. Ακολουθεί πίνακας με τα αποτελέσματα για το ισότοπο Cs-137, καθώς και το αντίστοιχο γράφημα:

**Πίνακας 19:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-137 σε Bq/kg, μήλο

Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	0.94	0.79	2.81
2	0.61	0.46	1.90
6	0.31	0.39	1.06
12	0.21	0.27	0.68
18	0.17	0.21	0.59
24	0.14	0.19	0.52



**Διάγραμμα 4:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης MDA Cs-137, για μήλο

Ακολουθούν οι αντίστοιχοι πίνακες και για τα ισότοπα Cs-134 και I-131. Τα σχετικά διαγράμματα μπορούν να βρεθούν στο αντίστοιχο Παράρτημα I.

**Πίνακας 20:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(a) σε Bq/kg για μήλο

Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	0.75	0.63	2.65
2	0.55	0.44	1.50
6	0.27	0.36	0.81
12	0.18	0.25	0.59
18	0.14	0.20	0.49
24	0.13	0.18	0.43

**Πίνακας 21:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(b) σε Bq/kg για μήλο

Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	1.23	0.77	3.01
2	0.74	0.59	2.02
6	0.34	0.39	1.04
12	0.23	0.29	0.70
18	0.18	0.26	0.57
24	0.16	0.22	0.52

**Πίνακας 22:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης I-131 σε Bq/kg για μήλο

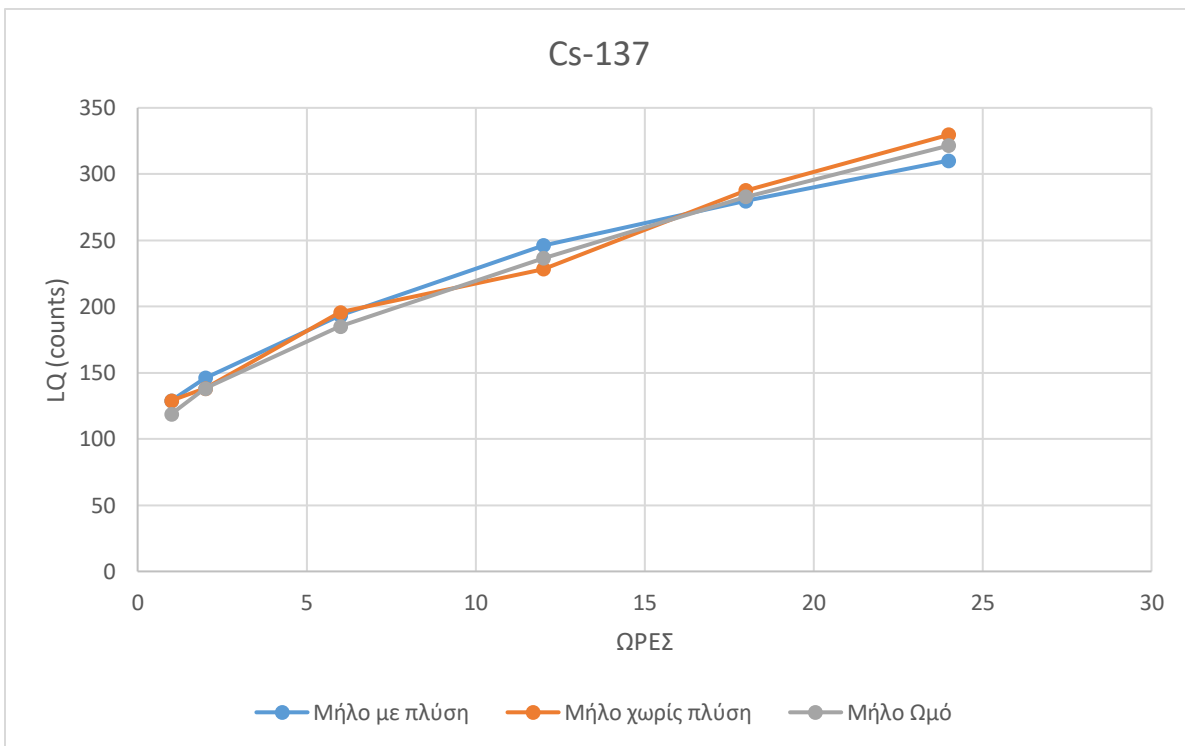
Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	0.83	0.51	2.85
2	0.57	0.41	1.68
6	0.28	0.37	1.02
12	0.20	0.26	0.68
18	0.17	0.22	0.53
24	0.14	0.18	0.45

#### 4.2.5 Εκτίμηση Determination Limit – Determination Time

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης των μεγεθών  $L_Q$  και determination time για το δείγμα μήλου, για το Cs-137:

**Πίνακας 23:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-137 σε counts για μήλο.

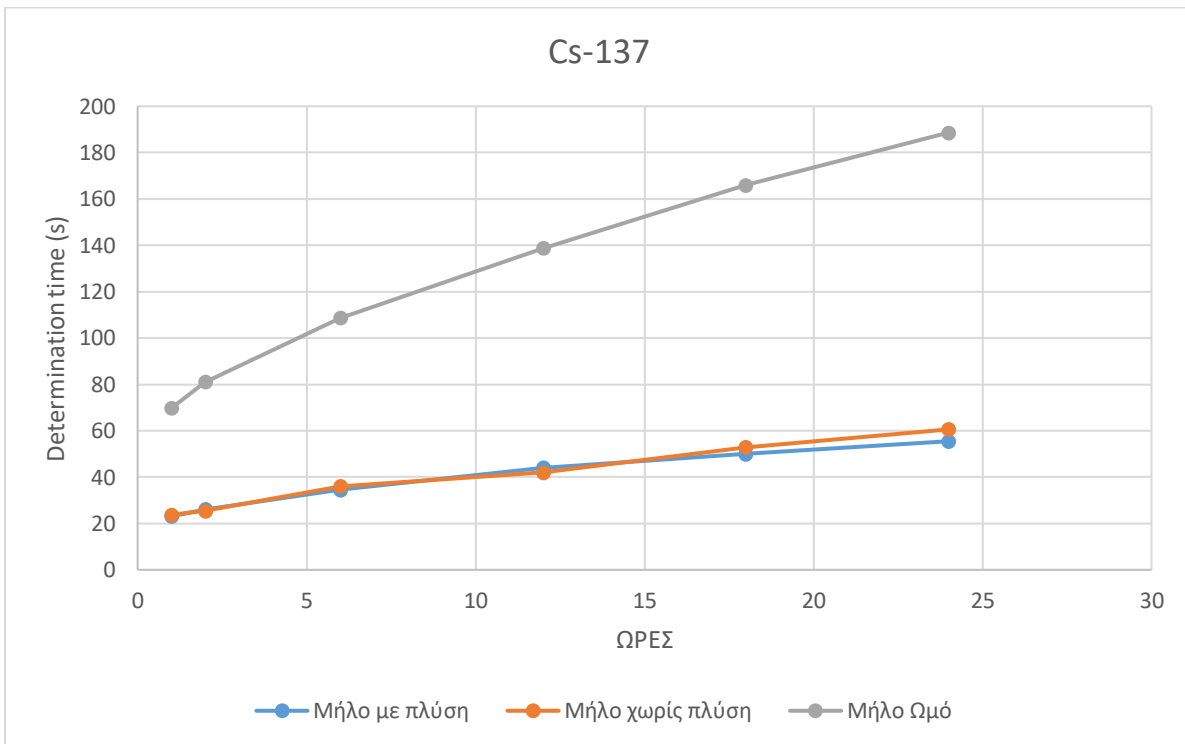
Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	134	129	129
2	142	146	138
6	179	193	196
12	250	246	228
18	298	280	288
24	338	310	330



**Διάγραμμα 5:** Determination Limit  $L_Q$  Cs-137 για μήλο

**Πίνακας 24:** Determination time Cs-137 σε s για μήλο.

Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	23	24	70
2	26	25	81
6	35	36	109
12	44	42	139
18	50	53	166
24	55	61	189



**Διάγραμμα 6:** Determination time Cs-137, για μήλο.

Ακολουθούν οι αντίστοιχοι πίνακες για τα υπόλοιπα ισότοπα Cs-134 και I-131. Τα αντίστοιχα διαγράμματα μπορούν να αναζητηθούν στα αντίστοιχα Παραρτήματα II και III.

**Πίνακας 25:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-134(a) σε counts για μήλο.

Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	128	128	132
2	155	152	152
6	200	209	188
12	251	265	246
18	294	310	299
24	341	360	346

**Πίνακας 26:** Determination time Cs-134(a) σε s για μήλο.

Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	18	19	63
2	22	23	72
6	29	31	89
12	36	39	116
18	43	46	142
24	49	53	164

**Πίνακας 27:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-134(b) σε counts, για μήλο.

Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	136	121	114
2	150	146	126
6	188	200	162
12	232	249	234
18	260	298	271
24	294	331	306

**Πίνακας 28:** Determination time Cs-134(b) σε s για μήλο.

Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	20	18	54
2	22	22	60
6	27	30	77
12	34	37	111
18	37	44	128
24	43	49	145

**Πίνακας 29:** Determination limit  $L_Q$  (10%) I-131 σε counts για μήλο.

Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	151	130	158
2	184	167	175
6	244	251	268
12	324	331	337
18	391	389	394
24	442	442	446

**Πίνακας 30:** Determination time I-131 σε s για μήλο.

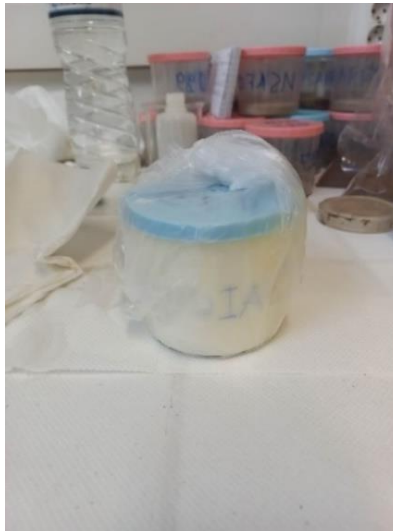
Ώρες	Μήλο με πλύση και ξήρανση	Μήλο χωρίς πλύση με ξήρανση	Ωμό Μήλο
1	170	150	578
2	206	192	639
6	273	289	979
12	363	381	1229
18	438	448	1439
24	496	509	1628

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν τα ίδια ποιοτικά συμπεράσματα που έχουν προκύψει και κατά την προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων μαρουλιού.



### 4.3 Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος γάλατος

Το τρίτο δείγμα που επιλέχθηκε προς μελέτη ήταν το φρέσκο γάλα από την αγορά, με σκοπό να αναπτυχθεί αντιπροσωπευτική διαδικασία για όλα τα δείγματα γάλακτος. Το δείγμα τοποθετήθηκε κατευθείαν στο δοχείο γεωμετρίας 2 – πλήρωση δηλαδή του όγκου του δοχείου (282ml). Η μάζα του δείγματος ανήλθε σε 292 g. Περαιτέρω προετοιμασία του δείγματος δε χρειάστηκε. Το δοχείο τοποθετήθηκε σε πλαστικό σακουλάκι για την περίπτωση διαρροής ή υπερχειλίσης. Όλα τα δεδομένα του δείγματος καταγράφηκαν σε καρτέλακι και ακολούθησε η διαδικασία της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.



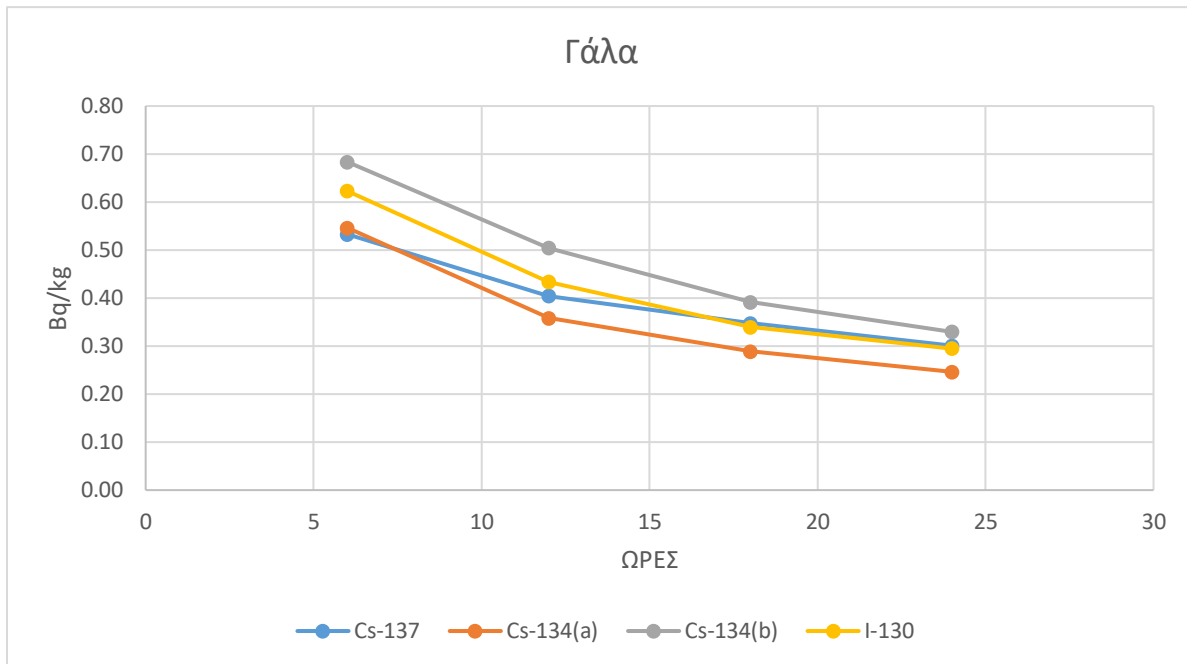
Εικόνα 12: Δείγμα γάλατος.

#### 4.3.1 Εκτίμηση MDA κατά την ανάλυση γάλατος

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από την ανάλυση του δείγματος, καθώς και τα σχετικά διαγράμματα.

**Πίνακας 31:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ισοτόπων σε Bq/kg για γάλα.

Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
6	0.31	0.53	0.55	0.68
12	0.21	0.40	0.36	0.50
18	0.17	0.35	0.29	0.39
24	0.14	0.30	0.25	0.33



**Διάγραμμα 7:** Επίπεδα ανίχνευσης MDA όλων των ισοτόπων, για γάλα

#### 4.3.2 Εκτίμηση Determination limit – Determination time

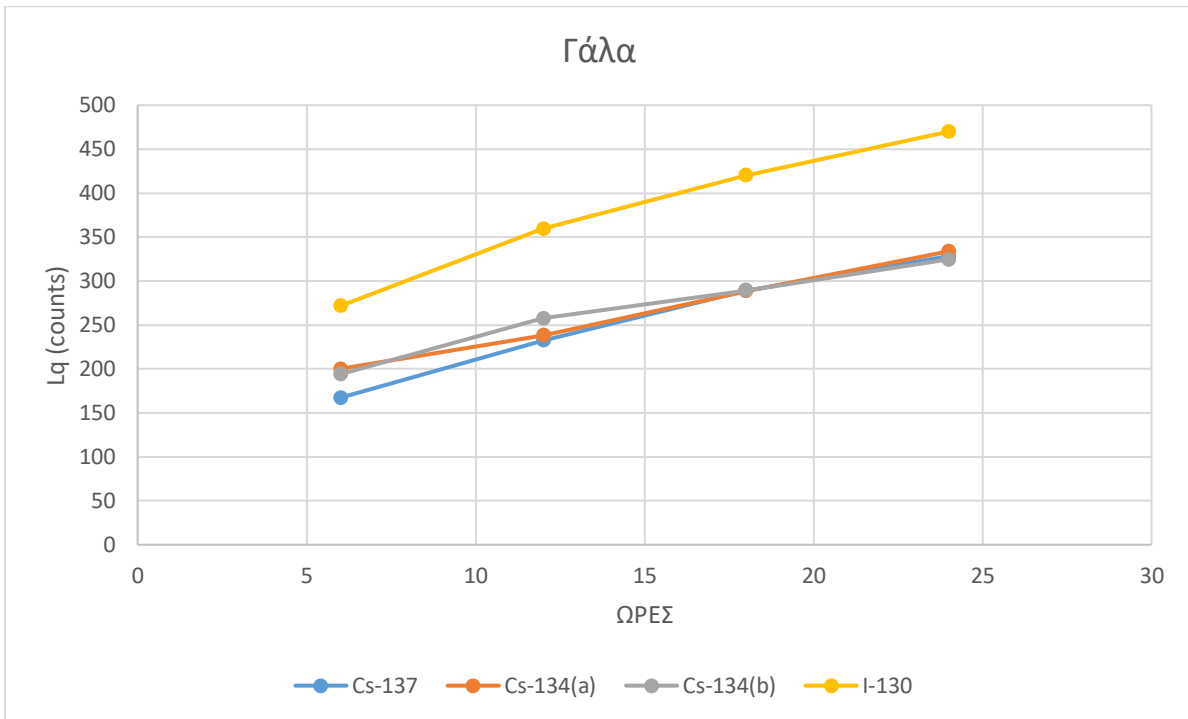
Αντίστοιχα, υπολογίστηκαν και οι τιμές determination limit και determination time.

**Πίνακας 32:** Determination limit  $L_Q$  (10%) σε counts για γάλα.

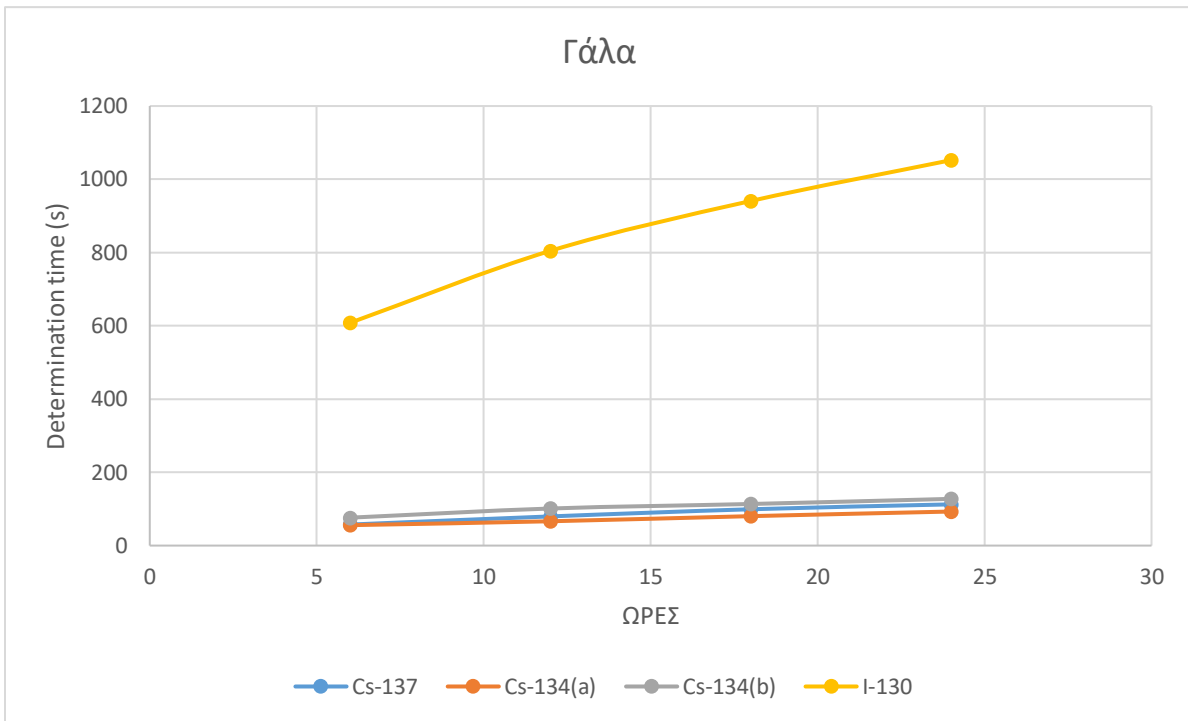
Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
6	167	200	194	272
12	232	238	258	359
18	289	289	289	420
24	328	334	325	470

**Πίνακας 33:** Determination time σε s για γάλα.

Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
6	57	56	76	608
12	80	66	101	805
18	99	80	114	941
24	113	93	128	1052



**Διάγραμμα 8:** Determination limit  $L_q$  όλων των ισοτόπων, για γάλα.



**Διάγραμμα 9:** Determination time των ισοτόπων για γάλα

#### 4.4 Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος πατάτας

Το τέταρτο τρόφιμο που επιλέχθηκε προς μελέτη ήταν η πατάτα. Επιλέχθηκε ένα δείγμα να περάσει από πλύση και ξήρανση, καθώς κι ένα «ώμο», δηλαδή χωρίς να αποξηραθεί, ώστε να γίνει προσπάθεια να επιταχυνθεί η διαδικασία της ανάλυσης.

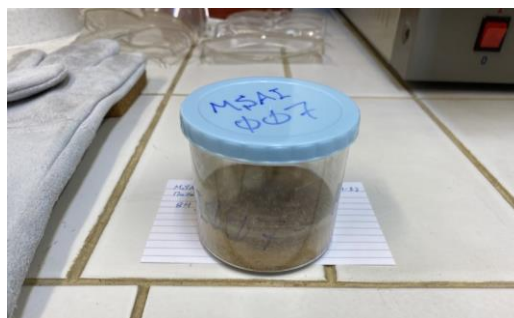
##### 4.4.1 Δείγμα πατάτας με πλύση και ξήρανση

Αρχικά πλύθηκε ο εξοπλισμός και καθαρίστηκε το δείγμα με άφθονο νερό, ώστε να απομακρυνθεί κάθε ίχνος χρώματος. Στη συνέχεια, αφαιρέθηκαν τα μη βρώσιμα κομμάτια. Έπειτα, προθερμάνθηκε ο φούρνος στους 75 °C και κόπηκε το δείγμα σε μεγάλες φέτες για ταχεία ξήρανση λόγω της μεγάλης επιφάνειας. Η μάζα του δείγματος ανήλθε στα 454 g.



**Εικόνα 13:** Αριστερά: Προετοιμασία δείγματος πατάτας. Δεξιά: Το δείγμα ύστερα από την ξήρανση.

Το δείγμα αφέθηκε να αποξηραθεί στους 75 °C για 24 ώρες και, μετά την αποξήρανση του, η ξηρή του μάζα ζυγίστηκε στα 84 g. Ακολούθησε ο θρυμματισμός και η ομογενοποίηση του δείγματος. Τέλος, το δείγμα τοποθετήθηκε σε δοχείο γεωμετρίας 5, καταγράφηκαν σε καρτελάκι όλα τα στοιχεία του δείγματος και πραγματοποιήθηκε η γ-φασματοσκοπική ανάλυση του δείγματος.



**Εικόνα 14:** Καταγραφή στοιχείων σε δοχείο γεωμετρίας «5»

#### 4.4.2 Δείγμα πατάτας χωρίς ξήρανση

Όμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και στη περίπτωση της «ωμής» πατάτας, όπου το δείγμα δε πέρασε από τη διαδικασία της ξήρανσης. Αρχικά, έγινε καλή πλύση του δείγματος και του εξοπλισμού και αφαιρέθηκαν τα μη βρώσιμα κομμάτια του δείγματος. Έπειτα, το δείγμα ομογενοποιήθηκε με χρήση μπλέντερ και απορρίφθηκαν όλα τα ογκώδη κομμάτια.

Το ομογενοποιημένο δείγμα τοποθετήθηκε σε δοχείο γεωμετρίας 5 και καταγράφηκαν τα στοιχεία του. Το δείγμα ζυγίστηκε και η μάζα του ανήλθε στα 82 g. Υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4.1.3, ότι πρέπει να αποφεύγεται η γεωμετρία «2» για δείγματα που δεν έχουν αποξηρανθεί.



**Εικόνα 15:** Αριστερά: Μπλέντερ. Δεξιά: Ομογενοποιημένο δείγμα πατάτας



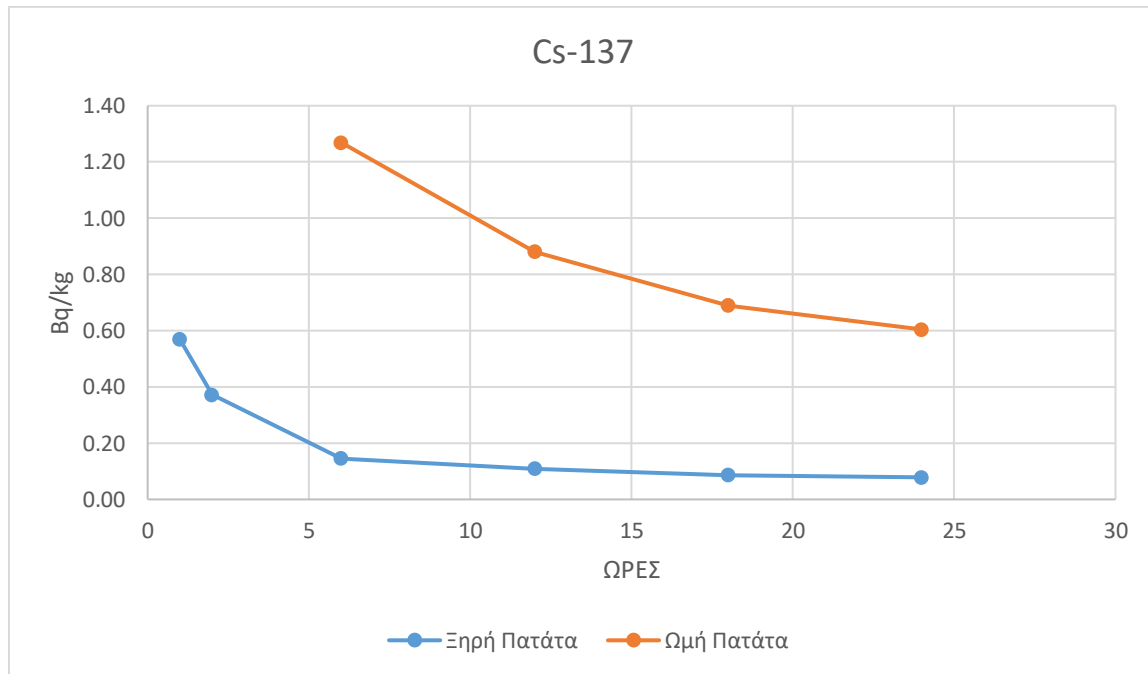
**Εικόνα 16:** Αριστερά: Δείγμα ωμής πατάτας σε γεωμετρία 2. Δεξιά: Δείγμα ωμής πατάτας σε γεωμετρία «2» έπειτα από 6 ώρες.

#### 4.4.3 Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση πατάτας

Για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση και την εύρεση του MDA, ακολουθήθηκε όμοια διαδικασία με τα προηγούμενα δείγματα τροφίμων. Για το Cs-137:

**Πίνακας 34:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-137 σε Bq/kg, για πατάτα.

Ώρες	Πατάτα με πλύση	Ωμή Πατάτα
1	0.57	-
2	0.37	-
6	0.15	1.27
12	0.11	0.88
18	0.09	0.69
24	0.08	0.60



**Διάγραμμα 10:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης MDA Cs-137 για πατάτα.

Ακολουθούν οι αντίστοιχοι πίνακες για Cs-134 και I-131: Τα αντίστοιχα διαγράμματα για το καίσιο Cs-134 και το ιώδιο I-131 μπορούν να βρεθούν στο *Παράρτημα Ι*.

**Πίνακας 35:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(a) σε Bq/kg για πατάτα.

Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
1	0.51	-
2	0.34	-
6	0.12	0.94
12	0.10	0.72
18	0.08	0.59
24	0.07	0.50

**Πίνακας 36:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(b) σε Bq/kg για πατάτα.

Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
1	0.73	-
2	0.48	-
6	0.18	0.97
12	0.12	0.79
18	0.09	0.68
24	0.09	0.59

**Πίνακας 37:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης I-131 σε Bq/kg για πατάτα.

Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
1	0.55	-
2	0.35	-
6	0.14	1.13
12	0.10	0.74
18	0.08	0.59
24	0.07	0.50

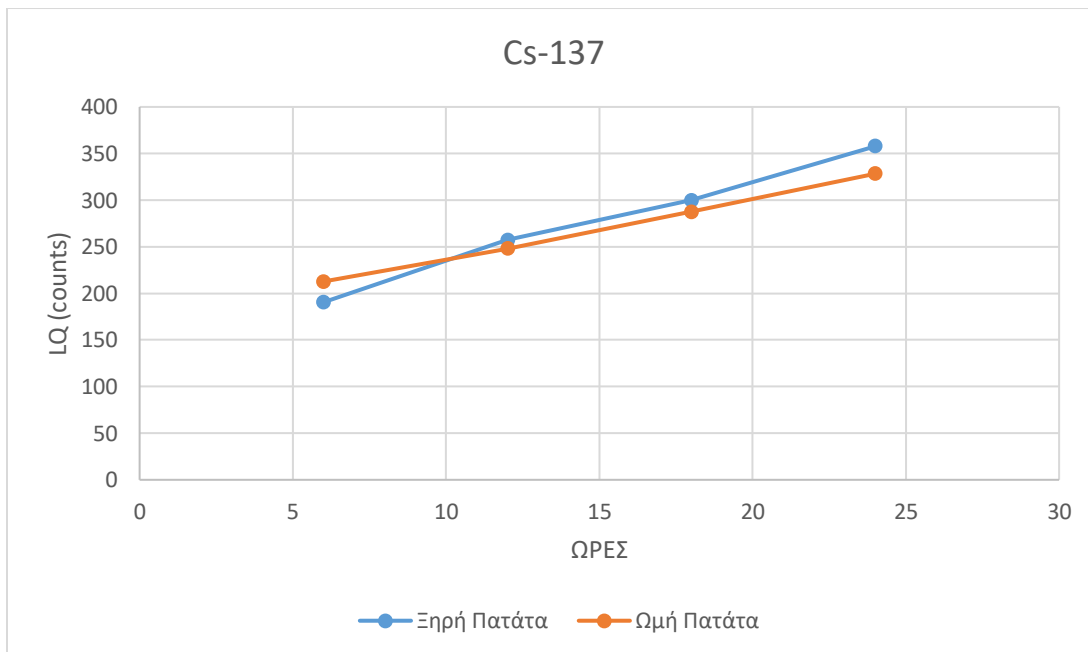


#### 4.4.4 Εκτίμηση Determination limit - Determination time

Ακολούθησε ο υπολογισμός Determination limit και determination time για το δείγμα πατάτας. Για το Cs-137:

**Πίνακας 38:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-137 σε counts για πατάτα.

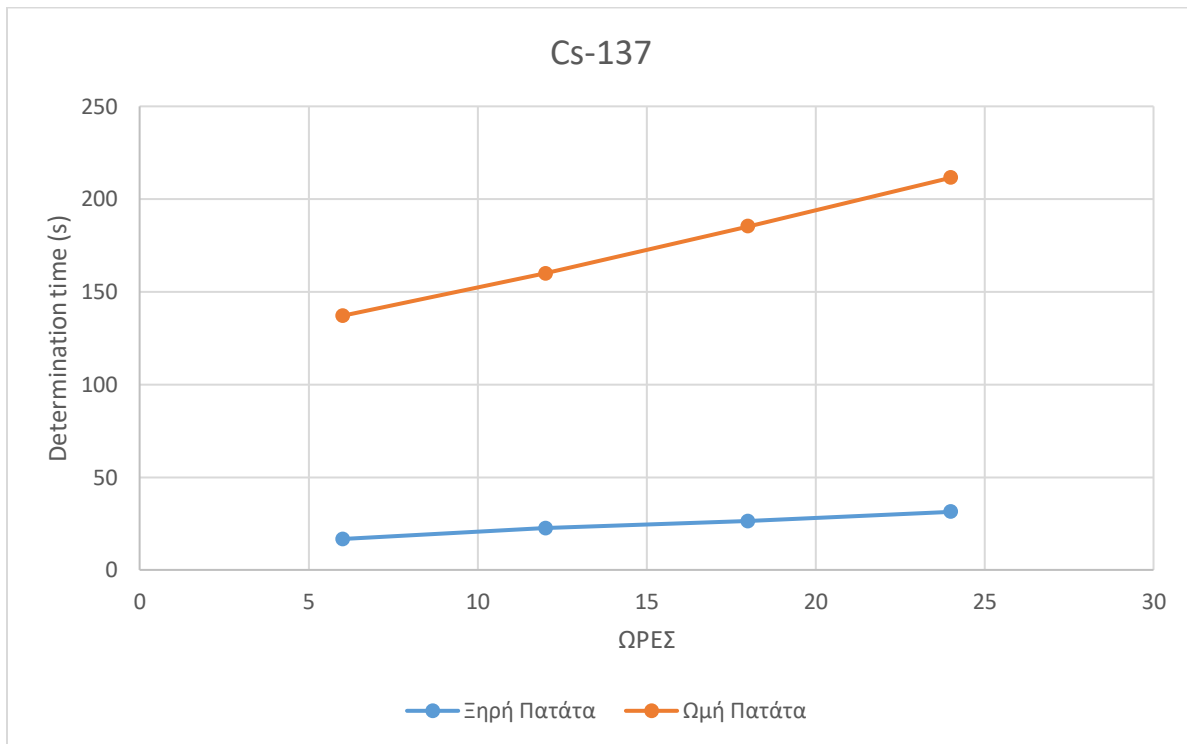
Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
6	190	213
12	257	248
18	300	288
24	358	328



**Διάγραμμα 11:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-137 για πατάτα.

**Πίνακας 39:** Determination time Cs-137 σε s για πατάτα

Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
6	17	137
8	23	160
12	26	185
24	31	211



**Διάγραμμα 12:** Determination time Cs-137 για πατάτα.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα και για τα υπόλοιπα ισότοπα. Τα σχετικά διαγράμματα μπορούν να βρεθούν στα *Παραρτήματα II και III*. Για το Cs-134:

**Πίνακας 40:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-134(a) σε counts για πατάτα.

Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
6	212	220
12	276	262
18	334	311
24	385	365

**Πίνακας 41:** Determination time Cs-134(a) σε s για πατάτα.

Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
6	15	102
12	20	131
18	24	163
24	27	184

**Πίνακας 42:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-134(b) σε counts για πατάτα.

Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
6	220	244
12	262	326
18	311	380
24	365	437

**Πίνακας 43:** Determination time Cs-134(b) σε s για πατάτα.

Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
6	16	133
12	18	179
18	22	208
24	26	239

Όμοίως, για το I-131:

**Πίνακας 44:** Determination limit  $L_Q$  (10%) I-131 σε counts για πατάτα.

Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
6	244	264
12	326	339
18	380	396
24	437	450

**Πίνακας 45:** Determination time I-131 σε s για πατάτα.

Ώρες	Ξηρή Πατάτα	Ωμή Πατάτα
6	133	1057
12	179	1359
18	208	1588
24	239	1802

#### 4.4.5 Παρατηρήσεις

Παρατηρείται μορφή διαγραμμάτων όμοια με τις υπόλοιπες περιπτώσεις τροφίμων· οι τιμές  $L_Q$  είναι αρκετά κοντινές μεταξύ τους, ίσως λίγο λιγότερο από τη περίπτωση του μήλου ή του μαρουλιού. Από την άλλη, οι τιμές determination time φαίνονται να διαφέρουν σημαντικά· η απόκλιση αυτή ήταν αναμενόμενη λόγω της διαφοράς της συνολικής μάζας των δειγμάτων.

#### 4.5 Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος σιταριού

Το πέμπτο τρόφιμο που επιλέχθηκε προς μελέτη ήταν το σιτάρι, ως αντιπροσωπευτικό δείγμα δημητριακών. Το δείγμα τοποθετήθηκε κατευθείαν στο δοχείο γεωμετρίας «2», δηλαδή με πλήρωση όλου του όγκου του δοχείου. Δεν χρειάστηκε κάποια προετοιμασία του δείγματος πριν τη συσκευασία. Η μάζα του δείγματος προς ανάλυση ανήλθε στα 240 g. Καταγράφηκαν σε καρτελάκι όλα τα στοιχεία του δείγματος και στη συνέχεια ακολούθησε η διαδικασία της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσής του.



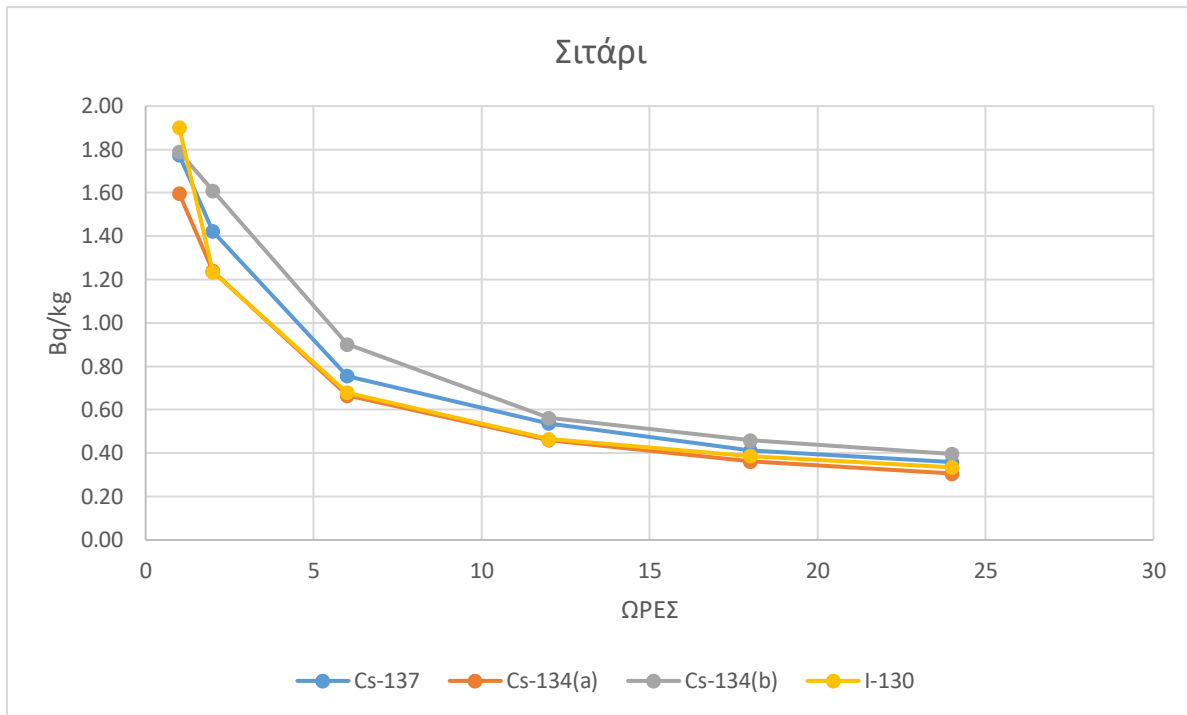
Εικόνα 17: Σιτάρι σε δοχείο γεωμετρίας «2».

##### 4.5.1 Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση σιταριού

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το δείγμα του σιταριού.

**Πίνακας 46:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης των ισοτόπων σε Bq/kg για σιτάρι

Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
1	1.77	1.60	1.79	1.90
2	1.42	1.24	1.61	1.23
6	0.75	0.66	0.90	0.68
12	0.54	0.46	0.56	0.47
18	0.41	0.36	0.46	0.39
24	0.36	0.31	0.40	0.33



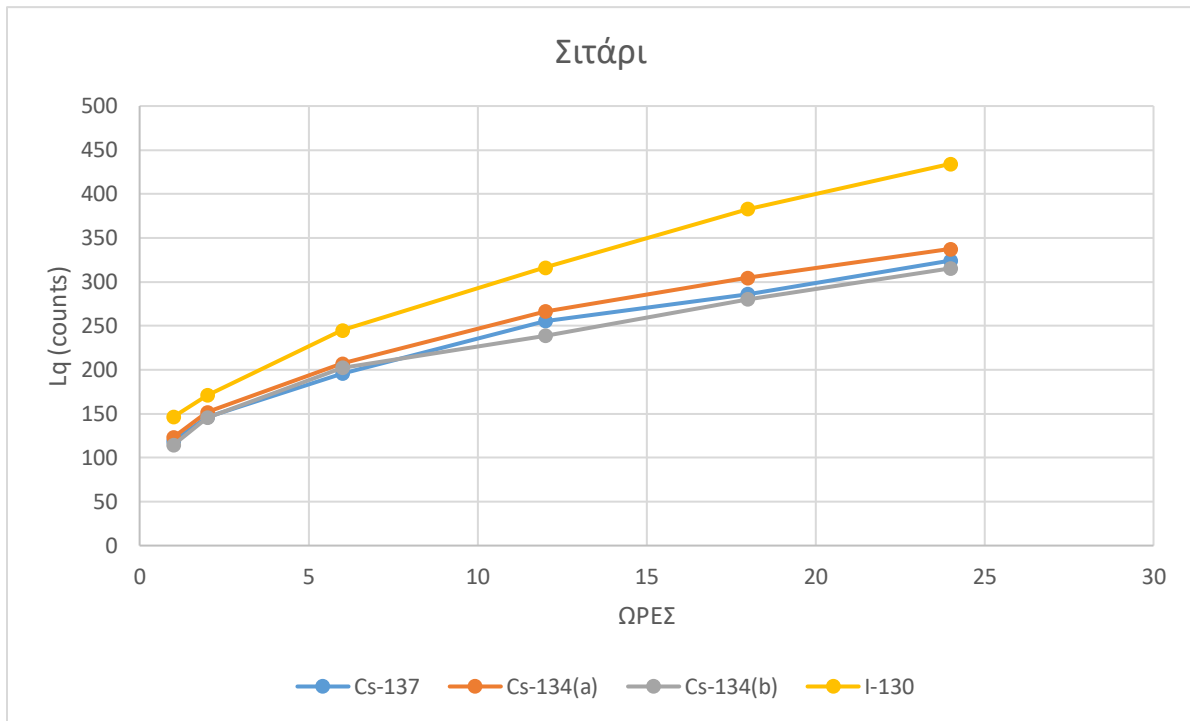
**Διάγραμμα 13: MDA ισotόπων για σιτάρι**

#### 4.5.2 Εκτίμηση Determination limit – Determination time

Αντίστοιχα με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, υπολογίστηκαν οι τιμές determination limit και determination time. Συγκεκριμένα, για το Cs-137:

**Πίνακας 47:** Determination Limit  $L_Q$  (10%) σε counts για σιτάρι

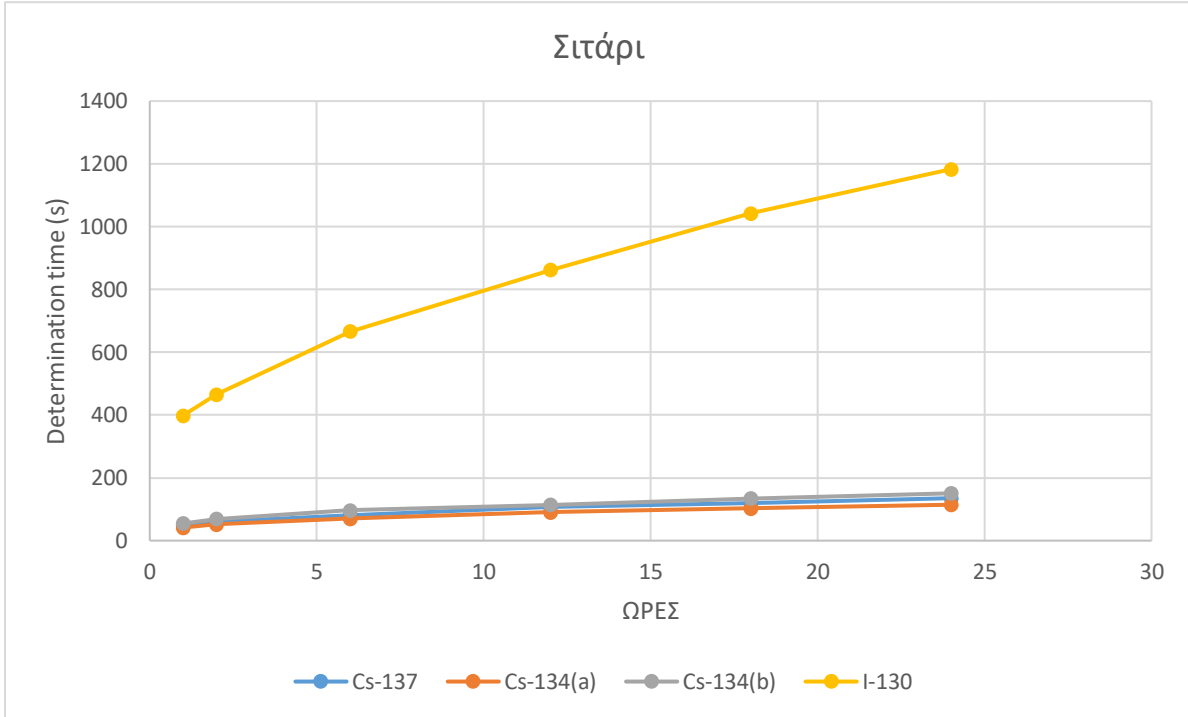
Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
1	119	123	114	146
2	146	152	146	171
6	196	207	202	245
12	255	267	239	316
18	286	305	280	383
24	324	338	315	434



**Διάγραμμα 14:** Determination limit LQ (10%) όλων των ισωτόπων για σιτάρι

**Πίνακας 48:** Determination time σε s, για σιτάρι

Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
1	50	42	55	399
2	61	51	70	466
6	82	70	97	667
12	107	90	114	862
18	119	103	134	1043
24	135	114	151	1183



**Διάγραμμα 15:** Determination time, για σιτάρι



## 4.6 Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος κουνουπιδιού

Το έκτο τρόφιμο που επιλέχθηκε προς μελέτη ήταν το κουνουπίδι. Όμοια με τις περιπτώσεις τροφίμων που αναφέρονται παραπάνω, επιλέχθηκε ένα δείγμα με πλύση και ένα «ώμο», δηλαδή χωρίς να περάσει από τη διαδικασία της ξήρανσης.

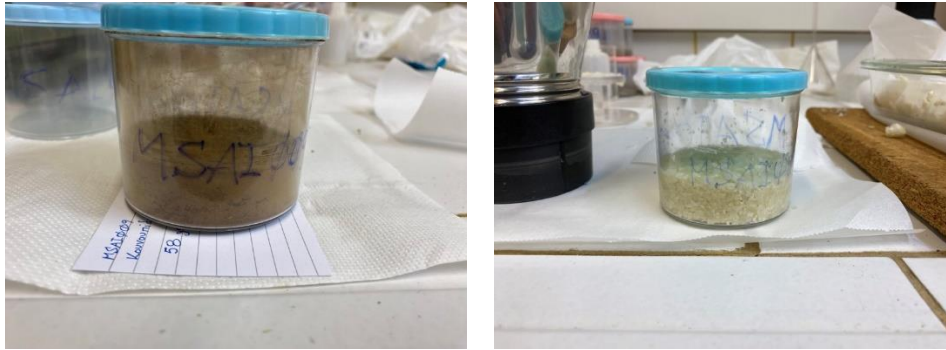
### 4.6.1 Δείγμα κουνουπιδιού με ξήρανση

Αρχικά πλύθηκε ο εξοπλισμός, καθώς και το δείγμα για περίπου 40 δευτερόλεπτα, ενώ ακόμη αφαιρέθηκαν τα μη βρώσιμα κομμάτια του. Έπειτα, προθερμάνθηκε ο φούρνος στους 75 °C και το δείγμα κόπηκε σε πολλά μικρά κομμάτια. Το δείγμα ζυγίστηκε κι η μάζα του ανήλθε στα 2.110 kg. Επιλέχθηκε μεγάλο δείγμα ώστε τελικά να επιτευχθεί γεωμετρία 5 για πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.



**Εικόνα 18:** Πάνω αριστερά και δεξιά: Ζύγιση δείγματος σε σκεύος και σε δίσκους. Κάτω αριστερά: Αποξήρανση δείγματος. Κάτω δεξιά: Ζύγιση ξηρής μάζας κουνουπιδιού.

Το δείγμα αφέθηκε να αποξηραθεί στους 75 °C για 24 ώρες και μετά την αποξήρανση του ζυγίστηκε η ξηρή του μάζα στα 116 g. Μετά την αποξήρανση του, ακολούθησε ο θρυμματισμός και η ομογενοποίηση του δείγματος. Το δείγμα τοποθετήθηκε σε δοχείο γεωμετρίας 5 και καταγράφηκαν όλα τα στοιχεία του· για την επίτευξη της γεωμετρίας «5» τοποθετήθηκαν 58 g δείγματος στο δοχείο. Έπειτα, ακολούθησε η γ-φασματοσκοπική ανάλυση του δείγματος.



**Εικόνα 19:** Αριστερά: Δείγμα ξηρού κουνουπιδιού γεωμετρίας 5. Δεξιά: Δείγμα ωμού κουνουπιδιού γεωμετρίας 5.

#### 4.6.2 Δείγμα ωμού κουνουπιδιού

Για τη περίπτωση του «ωμού» κουνουπιδιού, ακολουθήθηκε διαδικασία παρόμοια με αυτήν που περιγράφεται παραπάνω, με τη διαφορά ότι δε πέρασε από τη διαδικασία της ξήρανσης. Αρχικά, το δείγμα πλύθηκε κι αφαιρέθηκαν τα μη βρώσιμα κομμάτια του. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε το μπλέντερ για την ομογενοποίηση του δείγματος και απορρίφθηκαν όλα τα ογκώδη κομμάτια του<sup>4</sup>. Το ομογενοποιημένο δείγμα τοποθετήθηκε σε δοχείο για τη συγκρότηση γεωμετρίας 5, και ζυγίστηκε στα 66g.

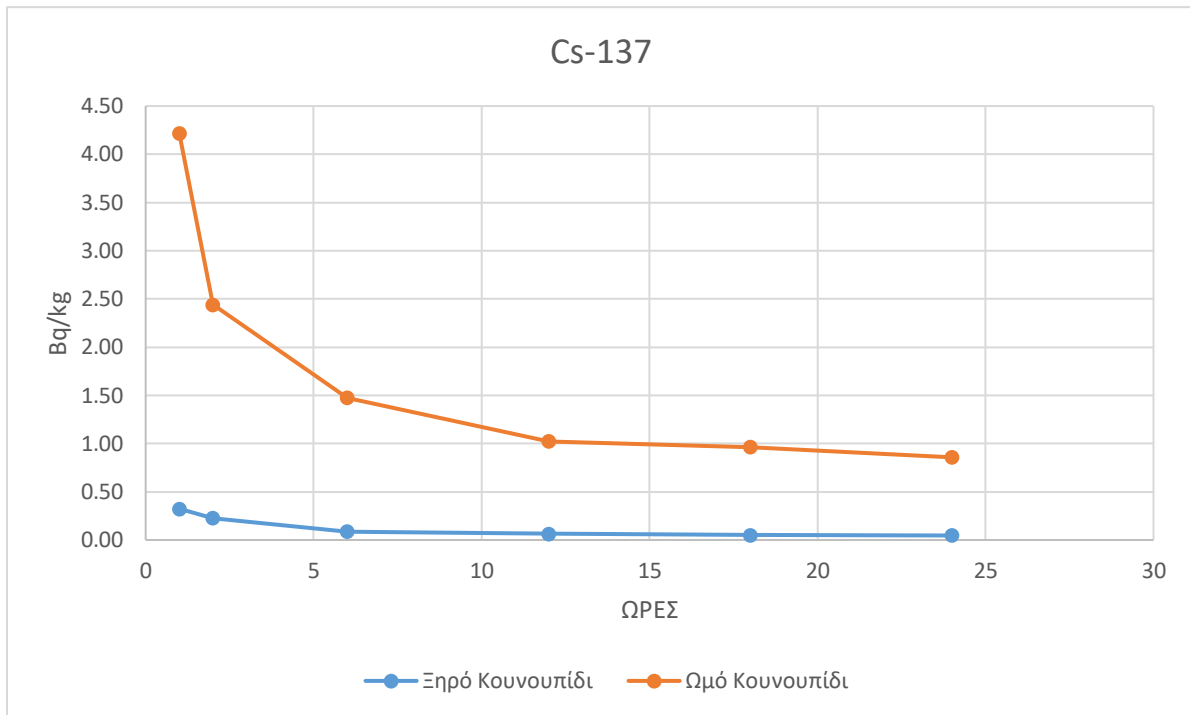
#### 4.6.3 Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση κουνουπιδιού

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το MDA του δείγματος κουνουπιδιού.

**Πίνακας 49:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-137 σε Bq/kg για κουνουπίδι

Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	0.32	4.22
2	0.23	2.44
6	0.09	1.47
12	0.06	1.02
18	0.05	0.96
24	0.05	0.86

<sup>4</sup> Η επιλογή αυτή ίσως δεν ήταν η καλύτερη και πρέπει να αποφεύγεται, καθώς για το κουνουπίδι τα μεγαλύτερα τμήματα που απομένουν είναι αυτά που προέρχονται από το σκληρότερα μέρη του. Κατά συνέπεια δεν είναι αντιπροσωπευτικά της συνολικής μάζας του, κάτι που ισχύει για την πατάτα.



**Διάγραμμα 16:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης MDA Cs-137, για κουνουπίδι

Τα υπόλοιπα διαγράμματα μπορούν να βρεθούν στο *Παράρτημα Ι*. Αντίστοιχα, για το Cs-134 και το I-131, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

**Πίνακας 50:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(a) σε Bq/kg, για κουνουπίδι

Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	0.21	2.70
2	0.13	1.81
6	0.09	1.08
12	0.06	0.75
18	0.05	0.73
24	0.04	0.64

**Πίνακας 51:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(b) σε Bq/kg, για κουνουπίδι.

Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	0.29	4.62
2	0.21	3.29
6	0.09	1.38
12	0.07	0.89
18	0.06	0.86
24	0.05	0.70

**Πίνακας 52:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης I-131 σε Bq/kg, για κουνουπίδι.

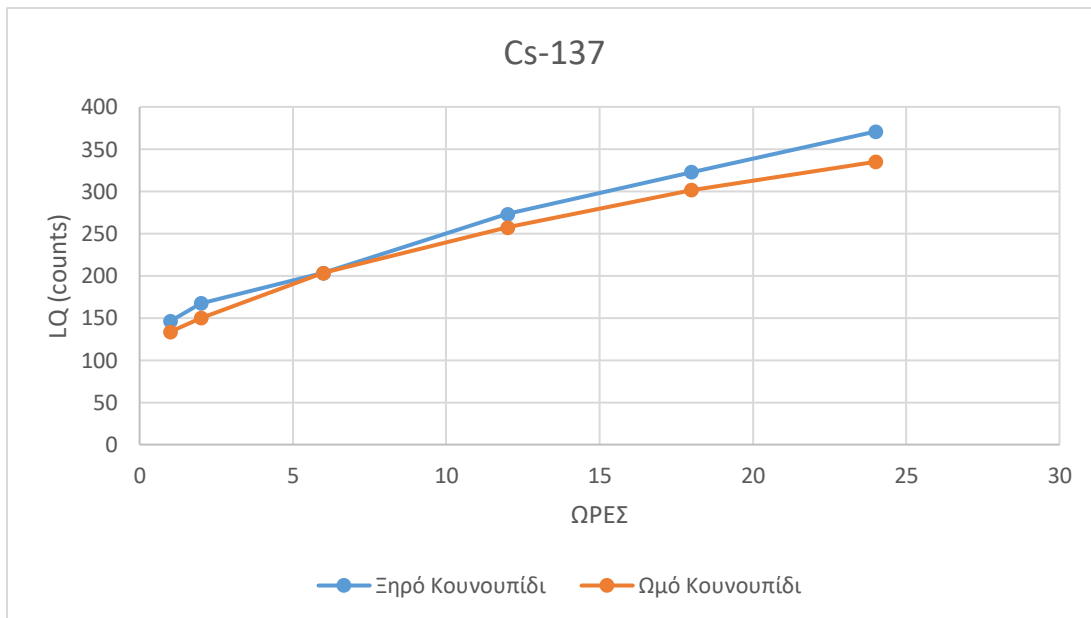
Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	0.24	2.86
2	0.17	2.17
6	0.08	1.22
12	0.06	0.84
18	0.05	0.79
24	0.04	0.68

#### 4.6.4 Εκτίμηση Determination Limit – Determination Time

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με τις τιμές determination limit και determination time.

**Πίνακας 53:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-137 σε counts, για κουνουπίδι.

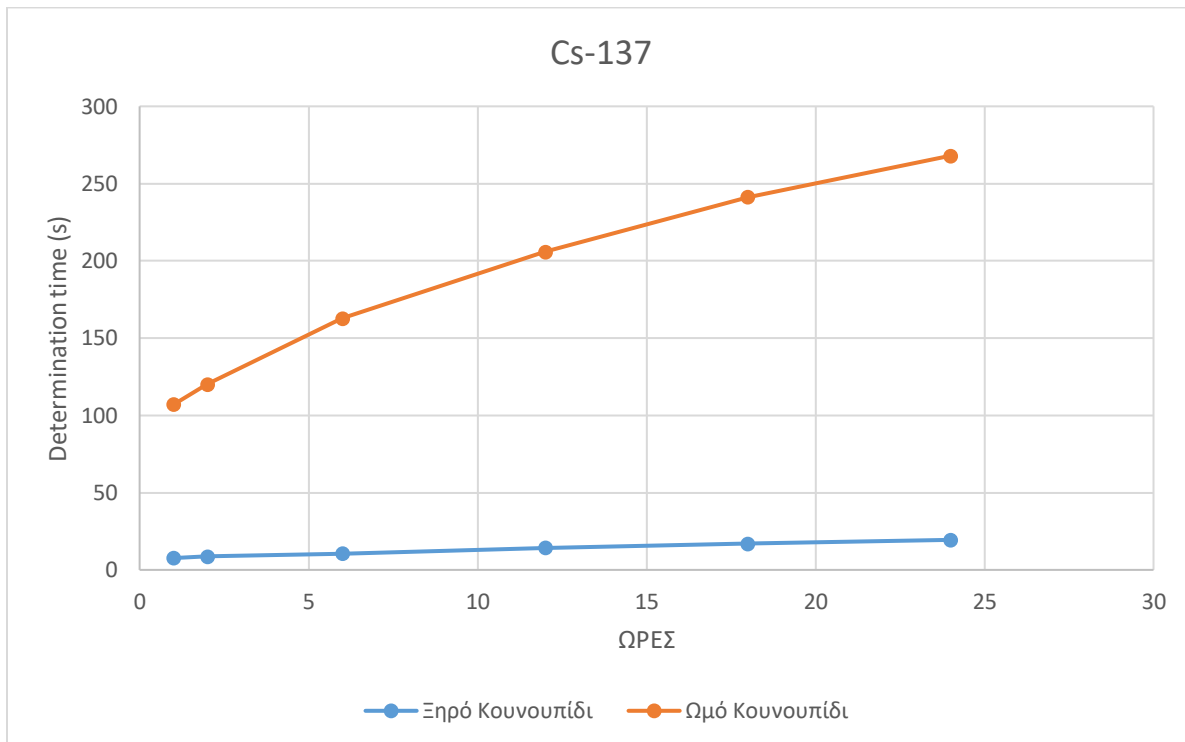
Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	146	134
2	167	150
6	203	203
12	273	257
18	323	301
24	371	335



**Διάγραμμα 17:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-137 σε counts, για κουνουπίδι

**Πίνακας 54:** Determination time Cs-137 σε s για κουνουπίδι

Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	8	107
2	9	120
6	11	163
12	14	206
18	17	241
24	19	268



**Διάγραμμα 18:** Determination time Cs-137 για κουνουπίδι

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το Cs-134, καθώς και για το I-131. Τα σχετικά διαγράμματα μπορούν να βρεθούν στα *Παραρτήματα II και III*.

**Πίνακας 55:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-134(a) σε counts για κουνουπίδι

Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	148	113
2	152	137
6	222	200
12	292	251
18	366	293
24	407	342

**Πίνακας 56:** Determination time Cs-134(a) σε s για κουνουπίδι

Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	146	134
2	167	150
6	203	203
12	273	257
18	323	301
24	371	335

**Πίνακας 57:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-134(b) σε counts για κουνουπίδι

Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	126	121
2	146	132
6	197	185
12	265	223
18	303	245
24	344	284



**Πίνακας 58:** Determination time Cs-134(b) σε s για κουνουπίδι

Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	5	78
2	6	85
6	8	120
12	11	144
18	13	158
24	15	183

**Πίνακας 59:** Determination limit  $L_Q$  (10%) I-131 σε counts για κουνουπίδι

Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	167	139
2	200	177
6	255	252
12	337	327
18	403	391
24	463	450

**Πίνακας 60:** Determination time I-131 σε s για κουνουπίδι

Ώρες	Ξηρό Κουνουπίδι	Ωμό Κουνουπίδι
1	54	690
2	65	880
6	83	1255
12	110	1628
18	131	1945
24	151	2239

#### 4.6.5 Παρατηρήσεις

Όπως και στα προηγούμενα πειράματα, παρατηρείται ότι οι τιμές  $L_Q$  είναι όμοιες μεταξύ των δειγμάτων, και μάλιστα το δείγμα από το «ωμό» κουνουπίδι έχει χαμηλότερες τιμές. Από την άλλη, παρατηρείται έντονη διαφορά μεταξύ των τιμών του determination time. Οι τιμές αυτές είναι ιδιαίτερα χαμηλές στην περίπτωση του ξηρού δείγματος, καθώς η συνολική μάζα που μελετήθηκε, έπειτα από την απαραίτητη αναγωγή της ξηρής μάζας, ανερχόταν στο 1 κιλό.

### 4.7 Προετοιμασία και ανάλυση δείγματος μανιταριού

Το επόμενο δείγμα που μελετήθηκε ήταν το μανιτάρι. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις τροφίμων, προετοιμάστηκαν ένα δείγμα με πύση και ένα δείγμα «ωμό», δηλαδή χωρίς να αποξηραθεί.

#### 4.7.1 Ξηρό Μανιτάρι

Αρχικά, πλύθηκε ο εξοπλισμός και το δείγμα (για περίπου 40 δευτερόλεπτα). Το κοτσάνι του μανιταριού δεν αφαιρέθηκε, καθώς θεωρείται βρώσιμο. Έπειτα, προθερμάνθηκε ο φούρνος στους 75 °C και το δείγμα κόπηκε σε πολλά μικρά κομμάτια. Η μάζα του δείγματος ανήλθε στα 988 g.



**Εικόνα 20:** Αριστερά: Ζύγιση δείγματος σε σκεύος. Δεξιά: Αποξήρανση δείγματος, Μανιτάρι

Το δείγμα αφέθηκε να αποξηραθεί στους 75 °C για 24 ώρες και μετά την αποξήρανση του ζυγίστηκε η ξηρή του μάζα στα 62 g. Ακολούθησε ο θρυμματισμός και η ομογενοποίηση του δείγματος. Η ποσότητα του δείγματος (62 g) δεν επαρκούσε για την επίτευξη γεωμετρίας 5, οπότε το δείγμα διαμορφώθηκε σε γεωμετρία 8· για την επίτευξη της γεωμετρίας 8 τοποθετήθηκαν 38g δείγματος στο δοχείο. Τέλος, καταγράφηκαν σε καρτελάκι όλα τα στοιχεία του δείγματος κι ακολούθησε η ανάλυσή του.



**Εικόνα 21:** Αριστερά: Ζύγιση ξηρού μανιταριού γεωμετρίας 2. Δεξιά: Δείγμα ωμού μανιταριού γεωμετρίας 5.

#### 4.7.2 Ωμό Μανιτάρι

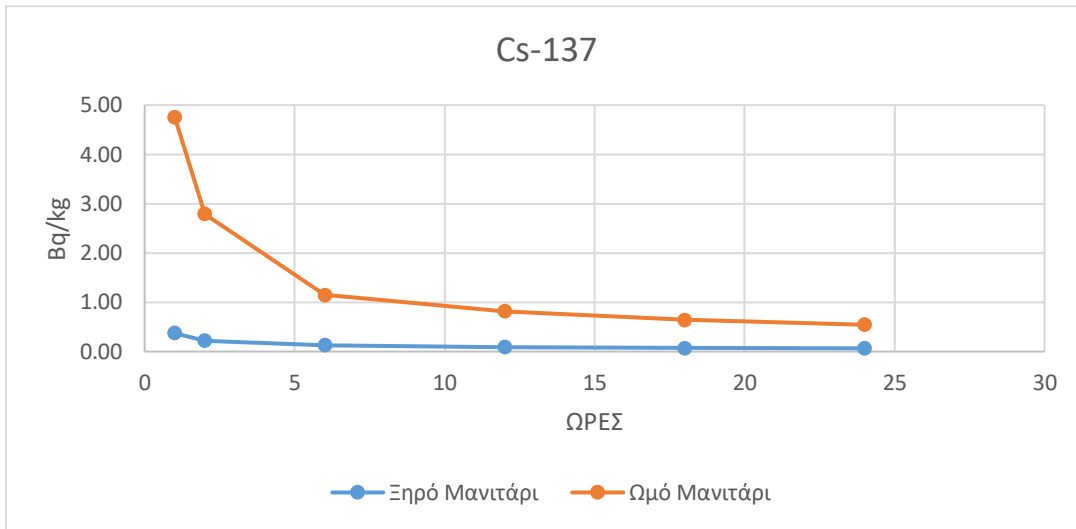
Για το «ωμό» μανιτάρι, η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν όμοια με αυτή που περιγράφεται παραπάνω. Αρχικά πλύθηκε ο εξοπλισμός και το δείγμα, και στη συνέχεια το δείγμα ομογενοποιήθηκε με τη χρήση μπλέντερ, απορρίπτοντας όλα τα ογκώδη κομμάτια που έμειναν. Το ομογενοποιημένο δείγμα τοποθετήθηκε σε δοχείο γεωμετρίας 5. Τέλος, το δείγμα ζυγίστηκε, με τη ξηρή του μάζα να ανέρχεται στα 86 g, κι ακολούθησε η γ-φασματοσκοπική ανάλυση του δείγματος.

#### 4.7.3 Εκτίμηση του MDA κατά την ανάλυση μανιταριού

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια των ισotόπων ενδιαφέροντος, όπως αυτές υπολογίστηκαν για το δείγμα μανιταριού.

**Πίνακας 61:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-137 σε Bq/kg για μανιτάρι

Ώρες	Ξηρό Μανιτάρι	Ωμό Μανιτάρι
1	0.37	4.76
2	0.22	2.79
6	0.13	1.15
12	0.09	0.82
18	0.07	0.65
24	0.07	0.54



**Διάγραμμα 19:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-137 σε Bq/kg για μανιτάρι

**Πίνακας 62:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(a) σε Bq/kg για μανιτάρι

Ώρες	Ξηρό Μανιτάρι	Ωμό Μανιτάρι
1	0.27	2.34
2	0.19	1.48
6	0.11	0.90
12	0.08	0.61
18	0.06	0.53
24	0.05	0.45

**Πίνακας 63:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(b) σε Bq/kg για μανιτάρι

Ώρες	Ξηρό Μανιτάρι	Ωμό Μανιτάρι
1	0.42	3.55
2	0.33	2.26
6	0.18	1.27
12	0.12	0.82
18	0.09	0.63
24	0.07	0.55

**Πίνακας 64:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης I-131 σε Bq/kg για μανιτάρι

Ώρες	Ξηρό Μανιτάρι	Ωμό Μανιτάρι
1	0.37	2.39
2	0.21	1.79
6	0.12	0.97
12	0.08	0.70
18	0.07	0.56
24	0.06	0.49

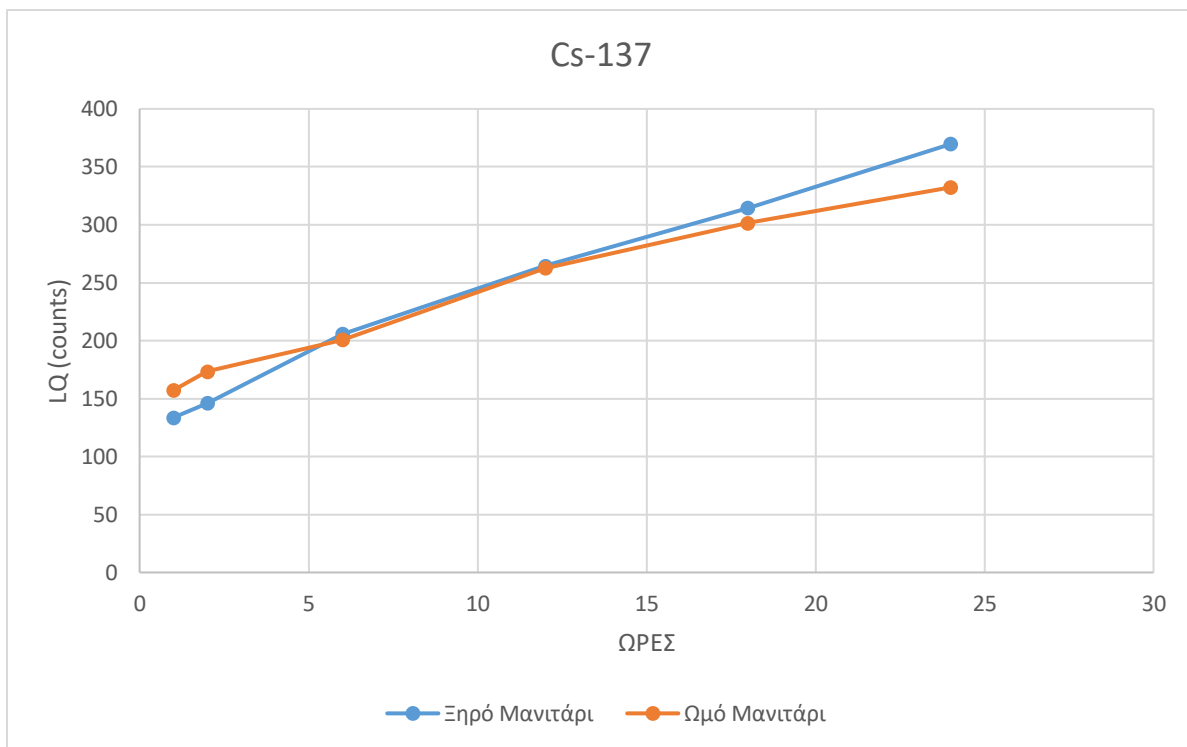
Τα διαγράμματα που αφορούν το Cs-134 και I-131 μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Ι.

#### 4.7.4 Εκτίμηση Determination limit – Determination time

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με τα μεγέθη determination limit και determination time.

**Πίνακας 65:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-137 σε counts για μανιτάρι

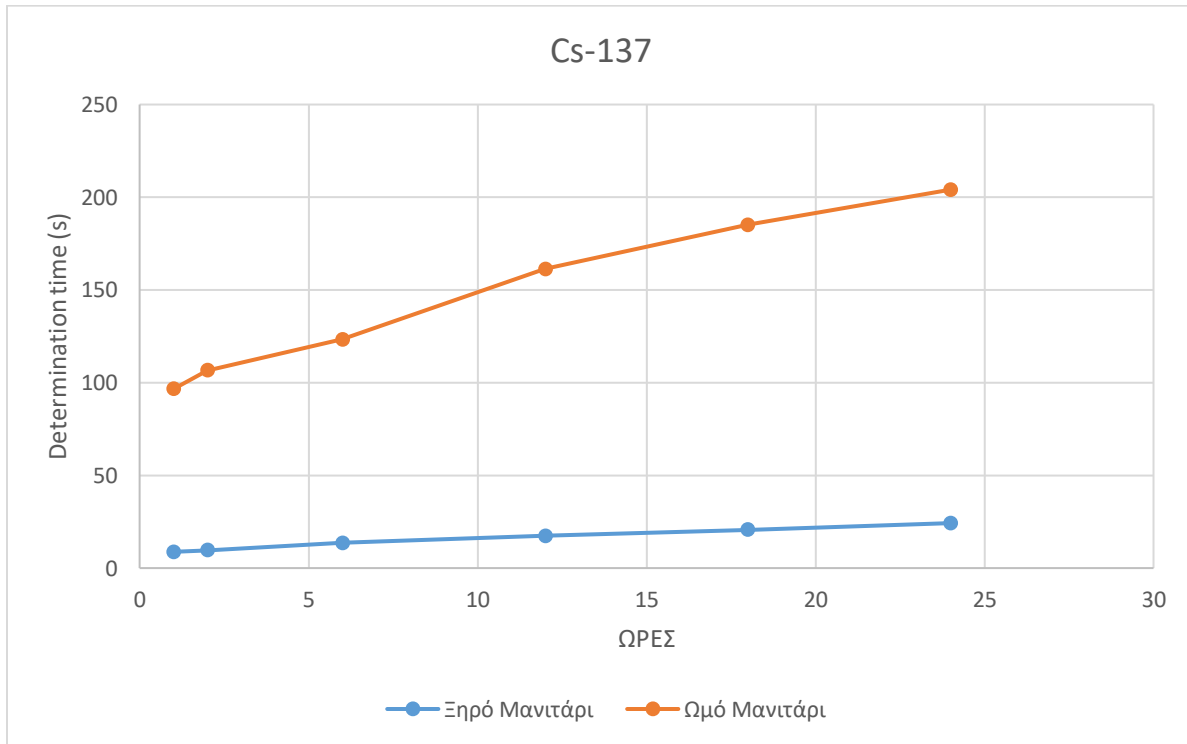
Ώρες	Ξηρό Μανιτάρι	Ωμό Μανιτάρι
1	134	157
2	146	173
6	206	201
12	264	263
18	314	301
24	370	332



**Διάγραμμα 20:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-137 σε counts για μανιτάρι

**Πίνακας 66:** Determination time Cs-137 σε s, για μανιτάρι.

Ώρες	Ξηρό Μανιτάρι	Ωμό Μανιτάρι
1	9	97
2	10	107
6	14	123
12	17	161
18	21	185
24	24	204



**Διάγραμμα 21:** Determination time Cs-137 για μανιτάρι

Για τα υπόλοιπα ραδιοϊσότοπα, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πινακοποιημένα παρακάτω, ενώ τα σχετικά διαγράμματα μπορούν να αναζητηθούν στα *Παραρτήματα II και III*.

**Πίνακας 67:** Determination limit L<sub>Q</sub> (10%) Cs-134(a) σε counts για μανιτάρι.

Ώρες	Ξηρό Μανιτάρι	Ωμό Μανιτάρι
1	128	123
2	152	137
6	220	195
12	278	246
18	329	306
24	372	341

**Πίνακας 68:** Determination time Cs-134(a) σε s, για μανιτάρι.

Ώρες	Ξηρό μανιτάρι	Ωμό μανιτάρι
1	7	61
2	8	68
6	12	97
12	15	122
18	17	152
24	20	169

**Πίνακας 69:** Determination limit L<sub>Q</sub> (10%) Cs-134(b) σε counts για μανιτάρι.

Ώρες	Ξηρό μανιτάρι	Ωμό μανιτάρι
1	132	126
2	169	141
6	243	194
12	307	234
18	344	264
24	365	296



**Πίνακας 70:** Determination time Cs-134(b) σε s για μανιτάρι.

Ώρες	Ξηρό μανιτάρι	Ωμό μανιτάρι
1	7	63
2	9	70
6	13	96
12	16	116
18	18	131
24	19	147

**Πίνακας 71:** Determination limit  $L_Q$  (10%) I-131 σε counts, για μανιτάρι.

Ώρες	Ξηρό μανιτάρι	Ωμό μανιτάρι
1	169	139
2	188	175
6	272	249
12	356	337
18	430	393
24	475	448

**Πίνακας 72:** Determination time I-131 σε s για μανιτάρι.

Ώρες	Ξηρό μανιτάρι	Ωμό μανιτάρι
1	69	529
2	77	668
6	112	949
12	146	1286
18	177	1501
24	195	1711

#### 4.8 Χρήση γεωμετρία Marinelli για την ανάλυση ωμών δειγμάτων

Κατά την ανάλυση δειγμάτων χαμηλής ραδιενέργειας ή σε περιπτώσεις που η ταχύτητα παίζει σημαντικό ρόλο οπότε αναλύονται μεγάλα δείγματα, συχνά χρησιμοποιούνται για τη συσκευασία των δειγμάτων τα δοχεία Marinelli διαφόρων όγκων, συνήθως 0.5L ή 1L. Τα δοχεία αυτά, παρόλο που πλεονεκτούν έναντι άλλων γεωμετριών, καθώς επιτρέπουν την ανάλυση μεγάλων όγκων παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα:

- Έχουν υψηλό κόστος και για το λόγο αυτό συχνά επαναχρησιμοποιούνται
- Δεν ταιριάζουν σε κάθε ανιχνευτή
- Λόγω του όγκου τους έχουν προβλήματα αποθήκευσης

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθενται δοχεία Marinelli, τα οποία όμως χρησιμοποιούνται σε εξαιρετικές περιπτώσεις. Για λόγους πληρότητας στο πλαίσιο της ΔΕ έγινε προσπάθεια εκτίμησης των μεγεθών MDA,  $L_Q$  και Determination Time για την περίπτωση ανάλυσης τροφίμων σε γεωμετρία Marinelli. Επισημαίνεται ότι δεν συσκευάστηκαν δείγματα στη γεωμετρία αυτή, αλλά οι υπολογισμοί έγιναν βάσει της λογικής που παρατίθεται ακολούθως.

Υπό τη θεώρηση πως τα φάσματα που συλλέχθηκαν κατά τη πειραματική διαδικασία ήταν, πρακτικά, φάσματα υπόβαθρου (background), καθώς δεν ανιχνεύθηκε αξιοσημείωτη συγκέντρωση ραδιοϊσοτόπων στα δείγματα που αναλύθηκαν, θα μπορούσε να υποτεθεί πως τα φάσματα θα παρέμεναν εν γένει ίδια, αν τοποθετούνταν δείγματα τροφίμων επί των ανιχνευτών. Μάλιστα, θα μπορούσε να υποτεθεί πως τα ληφθέντα φάσματα δε θα διέφεραν σημαντικά εάν τα δείγματα αναλύονταν σε άλλες γεωμετρίες με τους ανιχνευτές, π.χ. συσκευασμένα σε δοχεία Marinelli. Επομένως, ήταν εφικτό να υπολογιστούν, βάσει των ήδη συλλεχθέντων φασμάτων, τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης (MDA) για τα «ωμά» δείγματα τροφίμων συσκευασμένα σε δοχεία Marinelli, απλώς με τη χρήση των κατάλληλων τιμών της απόδοσης (efficiency) που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία Marinelli, οι οποίες έχουν εκτιμηθεί στο πλαίσιο παλαιότερης Διπλωματικής Εργασίας.



Εικόνα 22: Δοχείο Marinelli.

Στο πλαίσιο της ΔΕ εκείνης, είχε βαθμονομηθεί ανιχνευτή ΗΡGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ απόδοσης 40% για γεωμετρία Marinelli κατασκευασμένα από πολυπροπυλένιο όγκου 0.5L, με χρήση προσομοίωσης Monte-Carlo. Οι συναρτήσεις βαθμονόμησης που είχαν εκτιμηθεί ήταν:

Για την ενεργειακή περιοχή  $50 < E < 279.19$  keV:

$$\ln(\text{eff}) = -18.816 + 6.5494 \cdot \ln(E) - 0.6728 \cdot (\ln(E))^2 \quad (13)$$

και για την ενεργειακή περιοχή  $E > 279.19$  keV:

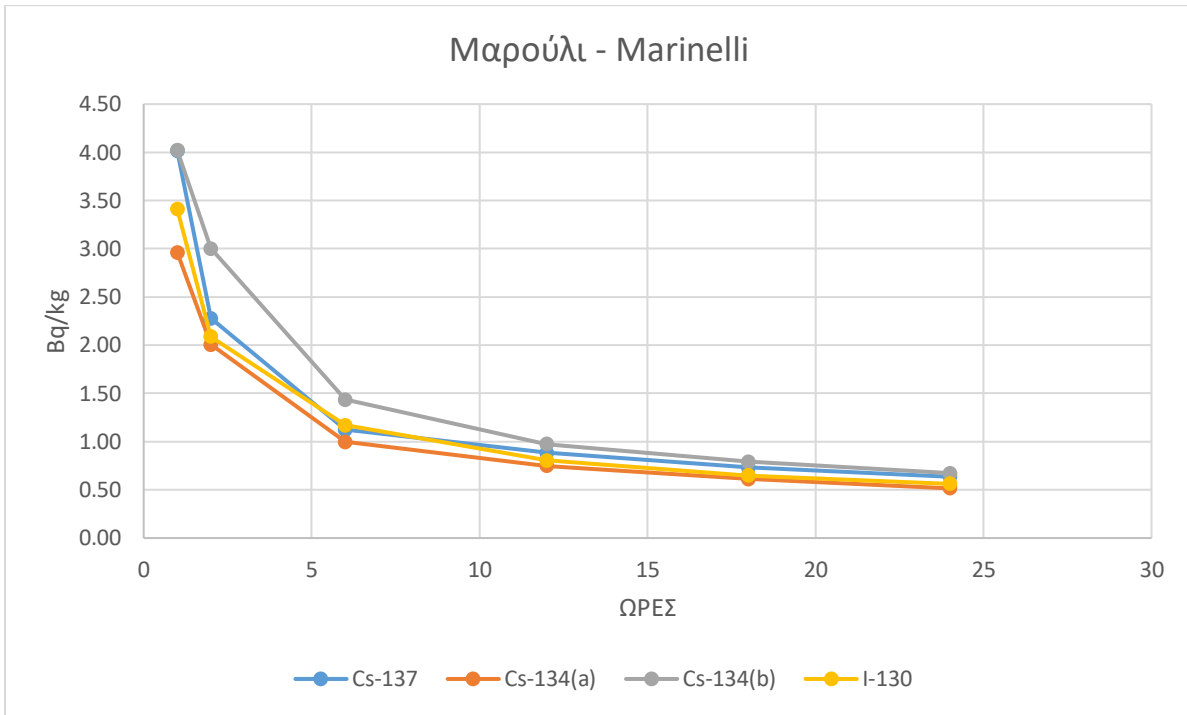
$$\ln(\text{eff}) = 1.826 - 1.0042 \cdot \ln(E) + 0.0179 \cdot (\ln(E))^2 \quad (14)$$

#### 4.8.1 Ανάλυση δείγματος ωμού μαρουλιού σε γεωμετρία Marinelli

Για τον υπολογισμό αυτό ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους με μοναδική διαφορά στις τιμές της απόδοσης που τώρα εκτιμήθηκαν για κάθε ενέργεια από τη σχέση 14.

**Πίνακας 73:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για μαρούλι

Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
1	4.02	2.96	4.02	3.41
2	2.28	2.00	3.00	2.09
6	1.12	1.00	1.44	1.17
12	0.88	0.75	0.97	0.80
18	0.73	0.61	0.79	0.65
24	0.64	0.51	0.67	0.56



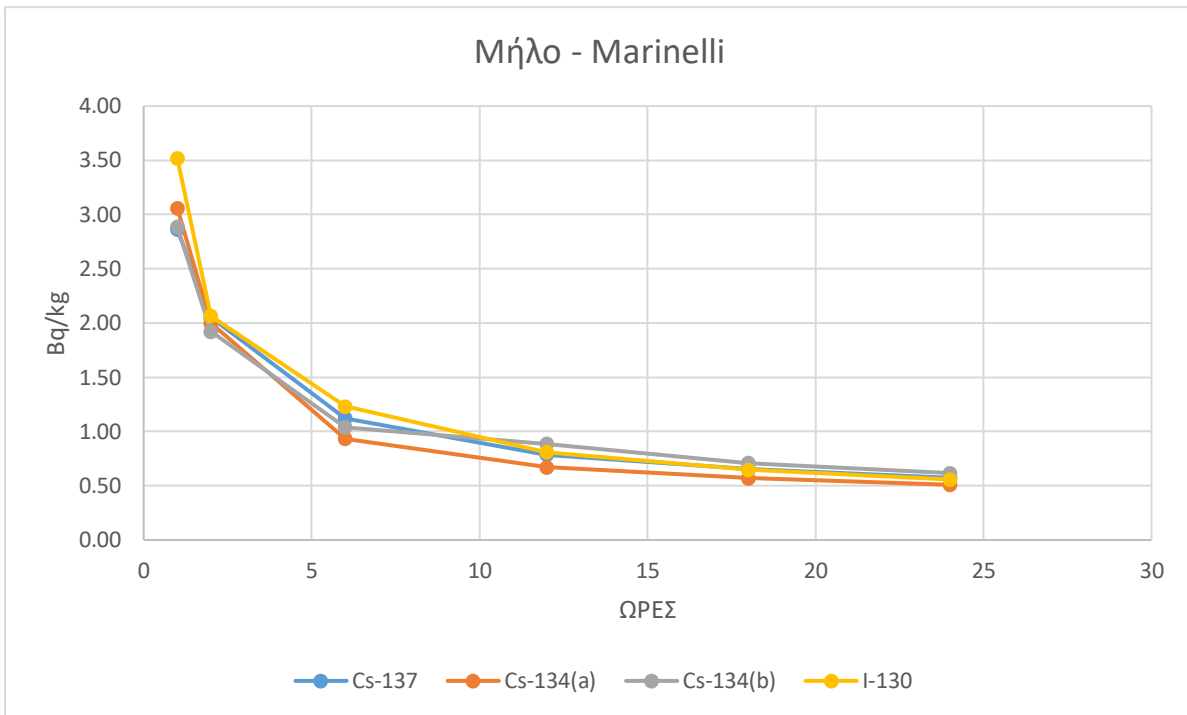
**Διάγραμμα 22:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για μαρούλι

#### 4.8.2 Ανάλυση δείγματος ωμού μήλου σε γεωμετρία Marinelli

Για τον υπολογισμό αυτό ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους με μοναδική διαφορά στις τιμές της απόδοσης που τώρα εκτιμήθηκαν για κάθε ενέργεια από τη σχέση 14.

**Πίνακας 74:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για μήλο

Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
1	2.86	3.06	2.89	3.52
2	2.05	2.00	1.92	2.07
6	1.12	0.93	1.04	1.23
12	0.79	0.67	0.89	0.81
18	0.66	0.57	0.71	0.65
24	0.57	0.51	0.62	0.56



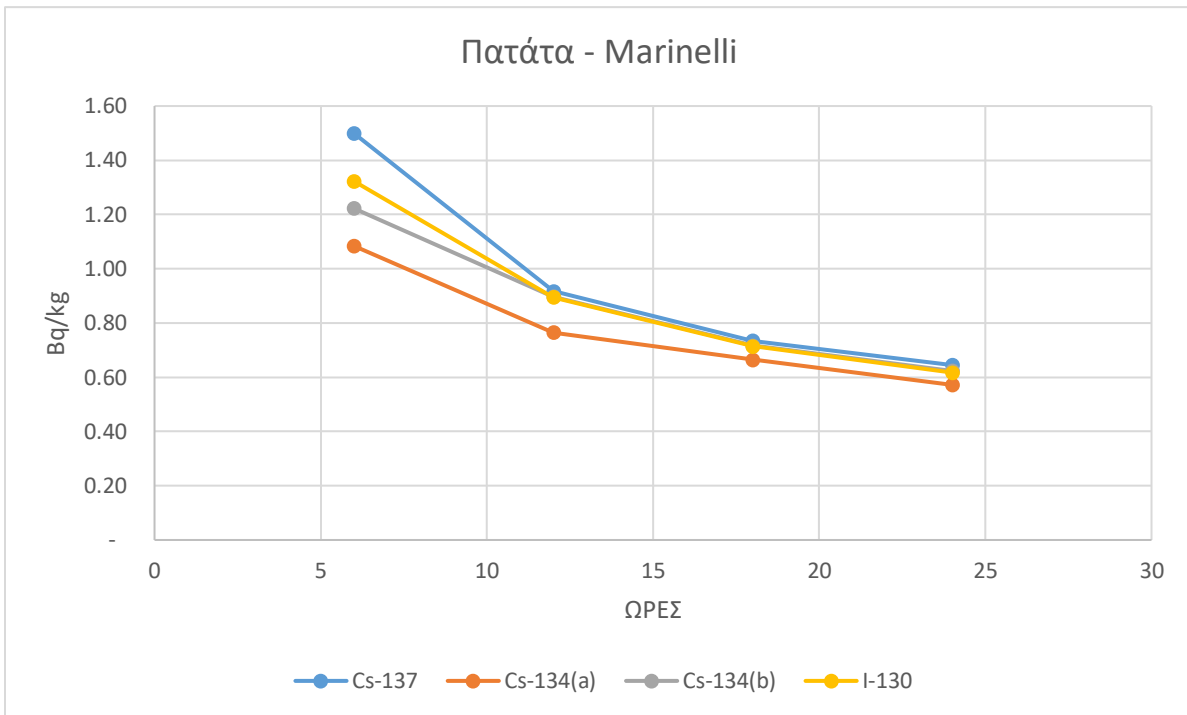
**Διάγραμμα 23:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για μήλο

#### 4.8.3 Ανάλυση δείγματος ωμής πατάτας σε γεωμετρία Marinelli

Για τον υπολογισμό αυτό ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους με μοναδική διαφορά στις τιμές της απόδοσης που τώρα εκτιμήθηκαν για κάθε ενέργεια από τη σχέση 14.

**Πίνακας 75:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για πατάτα

Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
6	1.50	1.08	1.22	1.32
12	0.92	0.76	0.90	0.89
18	0.73	0.66	0.72	0.71
24	0.64	0.57	0.62	0.62



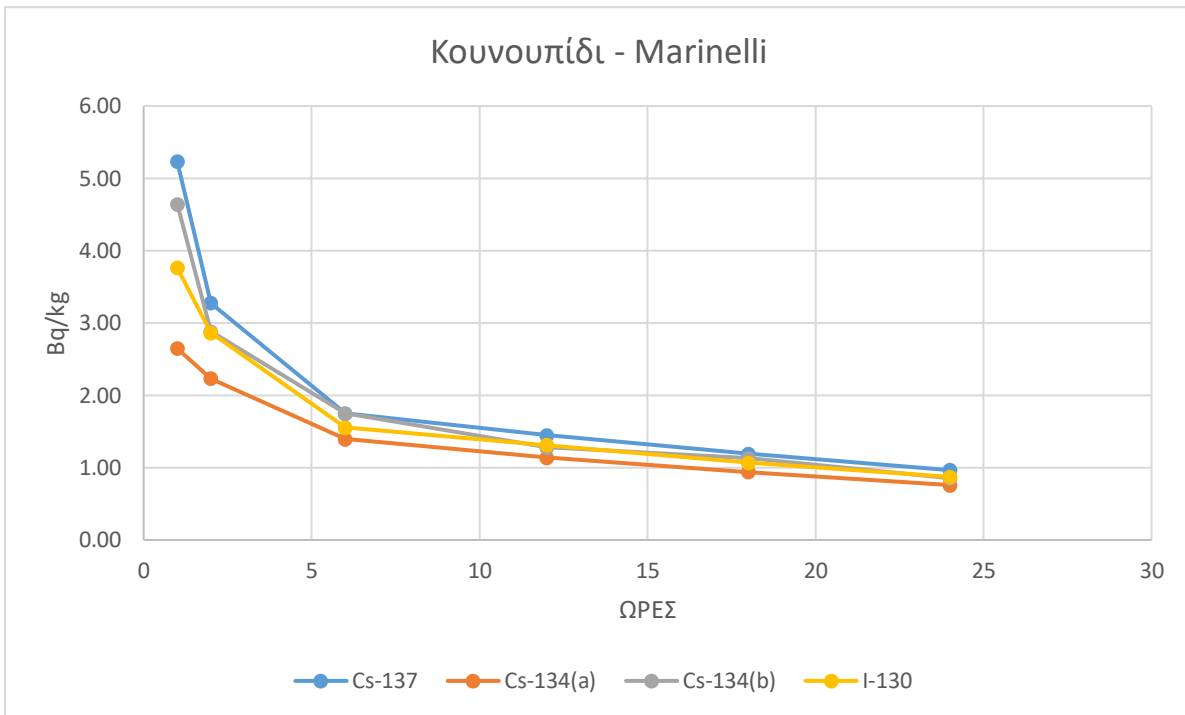
**Διάγραμμα 24:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg, για πατάτα.

#### 4.8.4 Ανάλυση δείγματος ωμού κουνουπιδιού σε γεωμετρία Marinelli

Για τον υπολογισμό αυτό ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους με μοναδική διαφορά στις τιμές της απόδοσης που τώρα εκτιμήθηκαν για κάθε ενέργεια από τη σχέση 14.

**Πίνακας 76:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για κουνουπίδι

Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
1	5.23	2.65	4.64	3.76
2	3.28	2.23	2.88	2.86
6	1.75	1.39	1.75	1.55
12	1.45	1.14	1.28	1.31
18	1.19	0.94	1.13	1.07
24	0.97	0.76	0.85	0.87



**Διάγραμμα 25:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για κουνουπίδι.

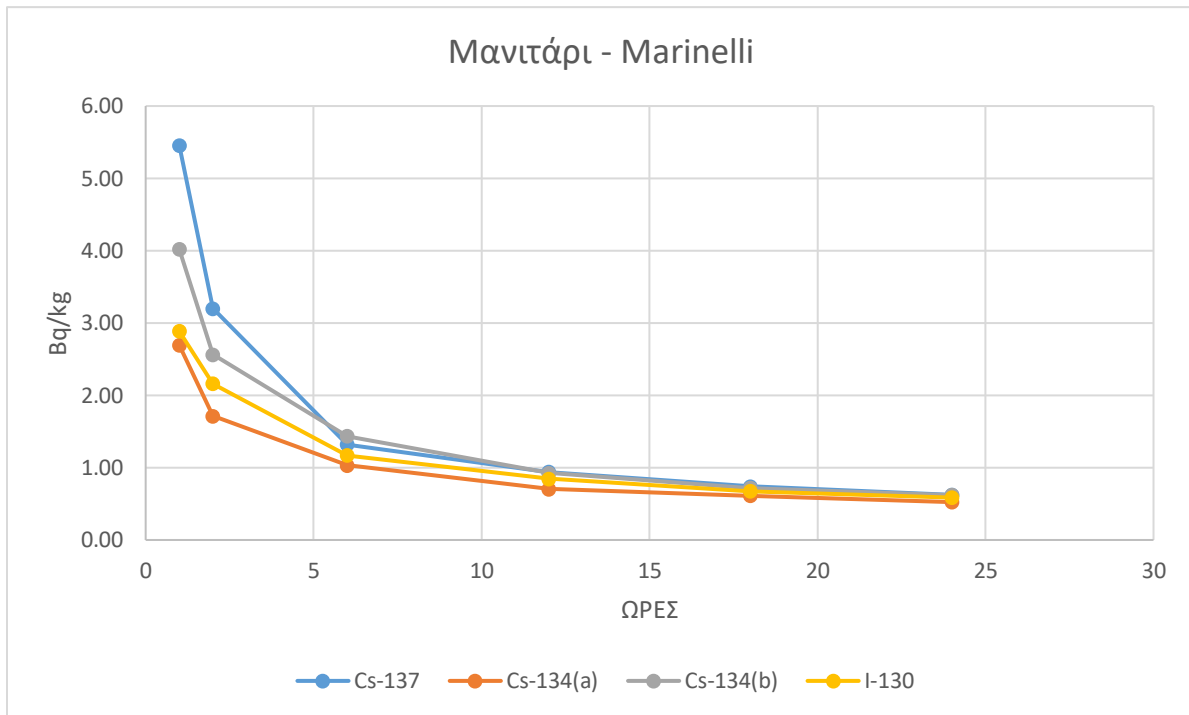
#### 4.8.5 Ανάλυση δείγματος ωμού μανιταριού σε γεωμετρία Marinelli

Για τον υπολογισμό αυτό ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους με μοναδική διαφορά στις τιμές της απόδοσης που τώρα εκτιμήθηκαν για κάθε ενέργεια από τη σχέση 14.

**Πίνακας 77:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για μανιτάρι

Ώρες	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
1	5.46	2.69	4.02	2.89
2	3.20	1.71	2.56	2.16
6	1.32	1.03	1.44	1.17
12	0.94	0.70	0.93	0.85
18	0.74	0.61	0.72	0.67
24	0.62	0.52	0.62	0.59





**Διάγραμμα 26:** Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg, για μανιτάρι.

#### 4.8.6 Παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι εν τέλει τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης (MDA), determination limit (LQ) και determination time που εκτιμώνται με την γεωμετρία Marinelli και την γεωμετρία 5 δεν διαφέρουν ιδιαίτερα μεταξύ τους, με το MDA που υπολογίζεται με στη γεωμετρία Marinelli να είναι ελαφρώς καλύτερο. Αυτό υποδεικνύει ότι δεν έχει νόημα για τις αναλύσεις που γίνονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ να χρησιμοποιείται η γεωμετρία Marinelli, με τις δυσκολίες και τα προβλήματα που αυτό συνεπάγεται, καθώς οι γεωμετρίες «5» και «8» παρέχουν πολύ καλά αποτελέσματα και ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα ανίχνευσης. Ένα σχόλιο που έχει σημασία να γίνει για τη γεωμετρία Marinelli είναι ότι, ενώ η ποσότητα του υλικού που περιέχει είναι πολύ μεγαλύτερη μίας απλής κυλινδρικής γεωμετρίας, εντούτοις, η κατανομή υλικού γύρω από τον ανιχνευτή – ανάλογα και με τον τύπο του ανιχνευτή – δεν οδηγεί σε πολύ υψηλότερη απόδοση φωτοκορυφής.

## 4.9 Γενικές παρατηρήσεις για την προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων τροφίμων

Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται μερικές γενικές παρατηρήσεις και συστάσεις που προέκυψαν κατά τη διαδικασία προετοιμασίας και ανάλυσης δειγμάτων τροφίμων.

Η προετοιμασία δειγμάτων τροφίμων, ακολουθώντας τη μεθοδολογία που αναφέρεται στη βιβλιογραφία διήρκησε κατά μέσο όρο 24 ώρες. Αυτό οφείλεται στην χρονοβόρα διαδικασία της αποξηράνσης των δειγμάτων, η οποία, αναλόγως με την ποσότητα δείγματος, μπορεί να διαρκέσει από 12 έως 24 ώρες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τρόφιμα όπως το μαρούλι και το μανιτάρι, τα οποία αποτελούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου από νερό, απαιτούν πολύ μεγάλη ποσότητα δείγματος, ούτως ώστε να προετοιμαστούν σε τυποποιημένες γεωμετρίες προς ανάλυση, ακόμη και στη περίπτωση της γεωμετρίας «8» που απαιτεί λιγότερη ποσότητα δείγματος. Για παράδειγμα, η μάζα του μανιταριού ανήλθε στα 998 g, ενώ η ξηρή του μάζα βρέθηκε μόλις 62 g, τα οποία μάλιστα δεν ήταν αρκετά για την επίτευξη της γεωμετρίας «5».

Επίσης, παρόλο που η εισαγωγή αλουμινόχαρτου προστατεύει το σκεύος κατά την διάρκεια της αποξηράνσης με τα τρόφιμα, κάνει πιο βέβαιη την αποφυγή cross-contamination και δεν χρειάζεται να πλυθεί εκτενώς για την επόμενη προετοιμασία δείγματος, δημιουργεί ένα βασικό πρόβλημα: συχνά προσκολλάται στο αποξηραμένο τρόφιμο. Κατά αυτόν τον τρόπο, δυσκολεύεται η αποκόλληση του δείγματος από το σκεύος και υπάρχει νέος κίνδυνος contamination του δείγματος από το αλουμινόχαρτο. Για αυτόν τον λόγο προτιμάται η χρήση αντικολλητικών φύλλων (λαδόκολλα).

Η ομογενοποίηση των ξηρών δειγμάτων αποτέλεσε μια επίσης χρονοβόρα και συχνά δύσκολη διαδικασία. Χρειάζονται τα κατάλληλα εργαλεία και αναμείκτες με μεγάλη ισχύ, καθώς τα αποξηραμένα κομμάτια μπορεί να είναι πολύ σκληρά και δύσκολο να ομογενοποιηθούν. Μάλιστα, στην περίπτωση του δείγματος του ξηρού μήλου, ήταν αναγκαία η χρήση του σπαστήρα – που συνήθως χρησιμοποιείται για δείγματα ορυκτών – για την πλήρη ομογενοποίηση του δείγματος. Αυτή η διαδικασία στη συνέχεια αποφεύχθηκε, ώστε να μην εισαχθεί στη μεθοδολογία περαιτέρω κίνδυνος cross-contamination.

Τα ωμά δείγματα απαιτούσαν επιπλέον πίεση κατά την εισαγωγή τους στα αντίστοιχα δοχεία, καθώς και κατά την διαδικασία της ομογενοποίησης, αφού τα περισσότερα διέθεταν μεγάλο ποσοστό νερού. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα εδάφια, είναι πολύ μεγάλης σημασίας η αποφυγή γεωμετρίας «2» στα ωμά δείγματα, καθώς παρατηρήθηκε ότι υπάρχει κίνδυνος ζύμωσης και εκκρίσεων υγρών που μπορούν να προκαλέσουν διαρροές από τα δοχεία.

Όσο αφορά το determination limit ( $L_D$ ), παρατηρείται ότι για όλα τα δείγματα λαμβάνει παραπλήσιες τιμές, κάτι που είναι φυσικό καθώς πρακτικά τα δείγματα δεν απέχουν πολύ

από δείγματα υποστρώματος, ενώ μάλιστα στα ωμά δείγματα οι τιμές εμφανίζονται οριακά χαμηλότερες από τα ξηρά, δηλαδή απαιτείται η ανίχνευση σχετικά λιγότερων γεγονότων (counts) ώστε να επιτευχθεί 10% στατιστική αβεβαιότητα. Αυτό θα μπορούσε ενδεχομένως να αποδοθεί στο γεγονός ότι η μάζα του υγρού δείγματος που είναι συνήθως υψηλότερη από αυτή του επεξεργασμένου θα μπορούσε σε κάποιο – μικρό – βαθμό να επηρεάζει το υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης, παρέχοντας καλύτερη θωράκιση στον ανιχνευτή. Πάντως, πιθανότερο είναι η οποία διαφορά να οφείλεται στην κύμανση του υποστρώματος αυτού καθ'αυτού και κατά συνέπεια να επιδρά στον  $L_Q$ .

Με σκοπό την επίτευξη μιας γρηγορότερης διαδικασίας, η οποία θα ήταν απαραίτητη σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ώστε να ληφθούν – έστω και όχι με τόσο υψηλή ακρίβεια – αποτελέσματα που θα οδηγήσουν σε αποφάσεις, παραλήφθηκε η διαδικασία της ξήρανσης, η οποία ήταν και η πιο χρονοβόρα, και αναλύθηκαν και ωμά δείγματα τροφίμων. Ιδιαίτερα για τα «ωμά» δείγματα προέκυψε το πρόβλημα χρήσης κατάλληλης γεωμετρίας βάσει ενός επιπλέον περιορισμού. Συγκεκριμένα, έγινε εμφανές πως – ανάλογα με το δείγμα – πρέπει να αποφεύγεται η χρήση γεωμετρίας «2», δηλαδή το πλήρες γέμισμα του δοχείου, καθώς υπάρχει πιθανότητα να διαρρεύσουν από το δοχείο υγρά που εκκρίνονται κατά τη ζύμωση των τροφίμων.

#### 4.9.1 Επιλογή διαδικασίας προετοιμασίας τροφίμων

Η σημαντική διαφορά των επιπέδων ανίχνευσης (MDA) μεταξύ των δειγμάτων που πέρασαν από τη διαδικασία της ξήρανσης και αυτών που μελετήθηκαν «ωμά», η οποία ανέρχεται σε όλα τα πειράματα σε μία τάξη μεγέθους, είναι αξιοσημείωτη. Αυτό οφείλεται προφανώς στο γεγονός ότι στα ωμά δείγματα μελετήθηκε πολύ λιγότερη ξηρή μάζα συγκριτικά με τα αποξηραμένα, τα οποία σε αρκετές περιπτώσεις μελετήθηκαν ολόκληρα.

Παρατηρήθηκε ότι η 24ωρη ανάλυση των δειγμάτων που έχουν αποξηραθεί ήταν σε πολλές περιπτώσεις υπεραρκετή, καθώς είτε οι τιμές MDA είχαν φτάσει ήδη σε πολύ χαμηλά επίπεδα, είτε φαίνονταν να σταθεροποιούνται. Όπως, για παράδειγμα, στην περίπτωση του δείγματος μανιταριού όπου η τιμή MDA για το Cs-137 μετά από 12 ώρες ανερχόταν στα 0.09 Bq/kg ενώ στις 18 και 24 ώρες παρέμεινε σταθερή στα 0.07 Bq/kg. Τα αποξηραμένα δείγματα μπορούν να δώσουν ένα αξιόπιστο και χαμηλό αποτέλεσμα ακόμα και από την 1<sup>η</sup> με 2<sup>η</sup> ώρα ανάλυσης του δείγματος, ενώ από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι δεν υπάρχει κάποιος ιδιαίτερος λόγος για ανάλυση άνω των 8 ωρών καθώς τα αντίστοιχα επίπεδα MDA προκύπτουν ήδη αρκετά χαμηλά για να εξαχθεί αξιόπιστο συμπέρασμα.

Για τα «ωμά» δείγματα, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις προέκυψαν τιμές MDA σχεδόν μια τάξη ανώτερες από αυτές των «ξηρών» δειγμάτων. Μάλιστα, τις πρώτες ώρες της φασματοσκοπικής ανάλυσης, οι τιμές MDA των «ωμών» δειγμάτων ήταν τόσο υψηλές που δεν μπορούσαν να αχθούν συμπεράσματα από την διαδικασία αυτή. Βέβαια, έπειτα από φασματοσκοπική ανάλυση 24 ωρών, ακόμα και τα «ωμά» δείγματα έδειχναν μία σχετικά χαμηλή τιμή MDA, η οποία συνήθως αντιστοιχούσε στα επίπεδα των «ξηρών» δειγμάτων

μετά την ανάλυση όμως μόνον μίας ώρας. Φάνηκε λοιπόν πως ήταν απαραίτητη η ανάλυση 6-8 ωρών ώστε να επιτευχθεί οριακά  $MDA < 1 \text{ Bq/kg}$ , κάτι το οποίο επετεύχθη για όλα τα αποξηραμένα δείγματα από την πρώτη ώρα ανάλυσης.

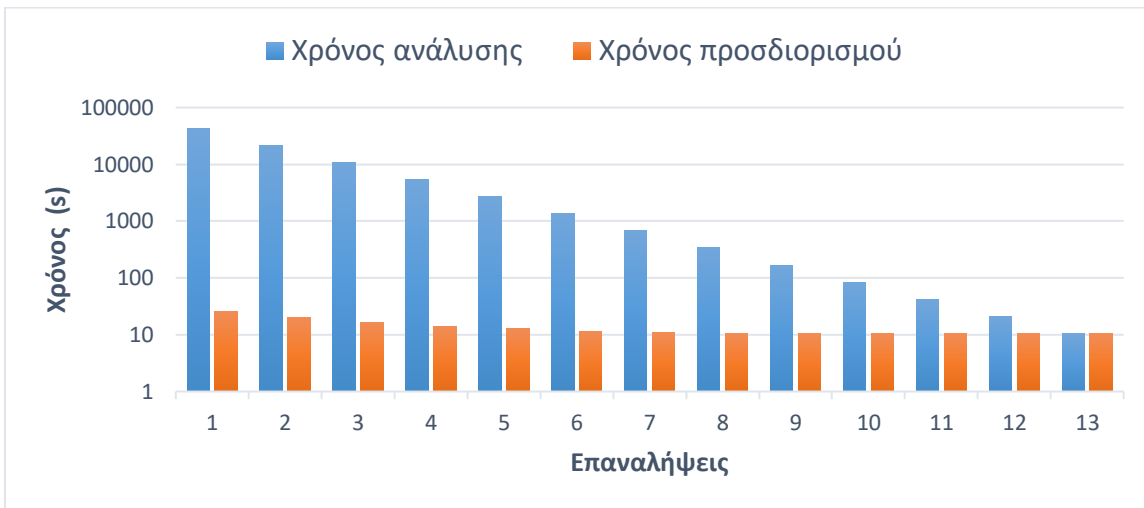
Συμπερασματικά, μόνο σε περίπτωση που η ανάλυση αποσκοπεί στην επίτευξη υψηλών επιπέδων ανίχνευσης, οπότε το επίπεδο της ραδιενέργειας που ενδιαφέρει να ανιχνευθεί είναι υψηλό έχει νόημα η ανάλυση «ωμών» δειγμάτων. Στην περίπτωση αναζήτησης χαμηλότερων επιπέδων ανίχνευσης οφείλει να προηγείται της ανάλυσης η διαδικασία της ξήρανσης. Διαφορετικά, ο χρόνος ανάλυσης των «ωμών» δειγμάτων θα ξεπεράσει την συνολική διάρκεια της διαδικασίας αποξήρανσης και φασματοσκοπικής ανάλυσης για να επιτευχθούν αντίστοιχα χαμηλές τιμές MDA. Για την μείωση της διάρκειας της διαδικασίας ανάλυσης και την παράλληλη επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων, ίσως προτιμότερη να ήταν η μείωση του χρόνου αποξήρανσης. Μάλιστα, το βέλτιστο διάστημα αποξήρανσης θα μπορούσε να αποτελέσει το αντικείμενο μελλοντικής διερεύνησης.

Σε αυτό το σημείο της ΔΕ αξίζει να σημειωθεί ότι για όλους τους υπολογισμούς του χρόνου προσδιορισμού (determination time) που προηγήθηκαν, έχει θεωρηθεί ότι το υπόστρωμα (και κατά συνέπεια το  $L_Q$ ) είναι σταθερό και ίσο με εκείνο της μέτρησης του δείγματος. Όμως, η υπόθεση αυτή απέχει της πραγματικότητας, καθώς στη πράξη το υπόστρωμα αυξάνει κατά τη διάρκεια της μέτρησης κι ως εκ τούτου ο υπολογισμός του χρόνου προσδιορισμού (συναρτήσει του  $L_Q$  κι άρα συναρτήσει του υποστρώματος της μέτρησης) επηρεάζεται από τον χρόνο μέτρησης. Ενδιαφέρον αποκτά λοιπόν ο υπολογισμός του χρόνου προσδιορισμού βάσει τιμής υποστρώματος ανάλογης του χρόνου αυτού. Για τον σκοπό αυτό, επιχειρήθηκε η εκτίμηση του χρόνου προσδιορισμού, λαμβάνοντας ως υπόστρωμα, όχι αυτό που συλλέχθηκε πραγματικά σε ένα φάσμα, αλλά αυτό που επρόκειτο να συλλεχθεί αν το φάσμα είχε μικρότερη διάρκεια, θεωρώντας ότι υπάρχει αναλογία στο υπόστρωμα και στη διάρκεια δειγματοληψίας, κάτι που δεν απέχει πολύ της πραγματικότητας. Προς την κατεύθυνση αυτή εφαρμόσθηκε μία επαναληπτική διαδικασία η οποία συνίσταται στα βήματα:

1. Για το υπόψη φάσμα ορισμένης χρονικής διάρκειας  $T$  (π.χ. 6 ώρες) βρίσκεται το υπόστρωμα  $B$  (π.χ. 300)
2. Για φάσμα διάρκειας  $T/n$  (π.χ.  $6/2=3$  ώρες) εκτιμάται το υπόστρωμα  $B/n$  ( $B/2=150$ )
3. Για το υπόστρωμα αυτό βρίσκεται το  $L_Q$  και στη συνέχεια το determination time.
4. Γίνεται σύγκριση του determination time με τον χρόνο  $T/n=3$  ώρες
5. Αν το determination time είναι μικρότερο του  $T/n$  η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

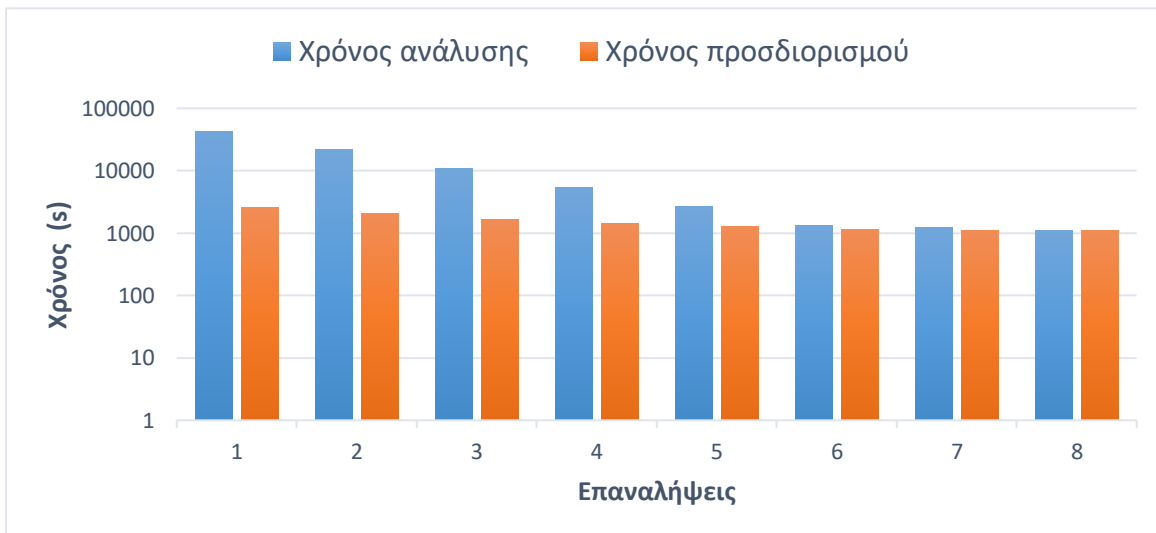
Η διαδικασία αυτή εφαρμόσθηκε για το  $Cs-137$ , για τη περίπτωση του δείγματος αποξηραμένου μαρουλιού μετά από πλύση. Έπειτα από μερικές επαναλήψεις, προέκυψε ότι στη περίπτωση που η συγκέντρωση του  $Cs-137$  ήταν ίση με  $1000 \text{ Bq/kg}$  (guideline level), ο απαραίτητος χρόνος μέτρησης για την επίτευξη αβεβαιότητας 10% συγκλίνει περί τα 10 s (Εικόνα 23). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν τοποθετηθεί το δείγμα αυτό στον υπόψη

ανιχνευτή για ανάλυση, μετά από 10 δευτερόλεπτα η αβεβαιότητα που θα έχει επιτευχθεί θα είναι 10%.



**Εικόνα 23:** Υπολογισμός determination time με ανάλογη μείωση υποστρώματος για Cs-137 σε λογαριθμική κλίμακα, activity 1000 Bq/kg

Αντίστοιχοι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν και στην περίπτωση που η αναμενόμενη ραδιενέργεια του δείγματος δεν είναι  $1000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  αλλά  $10 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Στην περίπτωση αυτή ο απαραίτητος χρόνος μέτρησης για την επίτευξη αβεβαιότητας 10% εκτιμήθηκε περί τα 1083s (Εικόνα 24).



**Εικόνα 24:** Υπολογισμός determination time με ανάλογη μείωση υποστρώματος για Cs-137 σε λογαριθμική κλίμακα, activity 10 Bq/kg.

## 5. Δειγματοληψία και ανάλυση φίλτρων αέρα

Για τη μελέτη της διασποράς των ραδιενεργών ισοτόπων έπειτα από ένα πυρηνικό ατύχημα είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της συγκέντρωσής τους στον αέρα. Αυτό συνήθως γίνεται μέσω δειγματοληψίας ατμοσφαιρικού αερόλυματος πάνω σε ειδικά φίλτρα, με χρήση δειγματοληπτών αέρα (αντλίες) υψηλής παροχής. Τα φίλτρα αυτά στη συνέχεια αναλύονται με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας με στόχο τον προσδιορισμό των ραδιενεργών ισοτόπων που υπάρχουν στο αερόλυμα. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για το σκοπό αυτό διατίθενται:

- ένας μεγάλος δειγματολήπτης αέρα, μοντέλο DH-50810H High-Volume Air-Sampler της εταιρίας F&J Specialties, που μπορεί να λειτουργεί για ημέρες και να συλλέγει αερόλυμα από μερικές χιλιάδες  $m^3$  σε ορθογώνια φίλτρα 8"×10". Ανάλογα από το πρωτόκολλο δειγματοληψίας και ανάλυσης του δείγματος, ο δειγματολήπτης αυτός μπορεί να επιτύχει εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα ανίχνευσης ραδιενεργών ισοτόπων στον αέρα, της τάξης των λίγων  $\mu Bq/m^3$ .
- μία σειρά από μικροί δειγματολήπτες, μοντέλο TFIA-2 της εταιρίας Starplex, που μπορούν να συλλέγουν αερόλυμα από μερικές δεκάδες  $m^3$  σε φίλτρα Φ4". Η διάρκεια δειγματοληψίας για αυτούς τους δειγματολήπτες δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 1-2 ώρες. Λόγω του πολύ μικρότερου όγκου αέρα που συλλέγουν αυτοί οι δειγματολήπτες, τα επίπεδα ανίχνευσης που επιτυγχάνονται δεν είναι πολύ χαμηλά, αποτελούν όμως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο σε περίπτωση ραδιολογικής ή πυρηνικού ατυχήματος με διασπορά ισοτόπων στο περιβάλλον.

Στο πλαίσιο λοιπόν της απόκρισης του ΕΠΤ-ΕΜΠ σε περίπτωση ατυχήματος, μετά το πέρας των πειραμάτων για την προετοιμασία και ανάλυση τροφίμων και τη μελέτη των αποτελεσμάτων τους, ακολούθησαν πειράματα δειγματοληψίας και ανάλυσης φίλτρων αέρα. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων αυτών χρησιμοποιήθηκε φορητή αντλία αέρα TFIA-2 της Starplex<sup>5</sup>. Όλες οι δειγματοληψίες έγιναν στο δώμα του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ και χρησιμοποιήθηκαν glass-fiber φίλτρα κυκλικής διατομής 4". Τα φίλτρα, μετά τη δειγματοληψία αναλύονταν στον ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ απόδοσης 33.8%, ο οποίος είναι βαθμονομημένος για την ανάλυση γεωμετρίας φίλτρου 4" τοποθετημένου επί του ανιχνευτή ως έχει, πάνω σε φύλλο από plexiglass πάχους 1mm– πρόκειται για την τυποποιημένη γεωμετρία «4» του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

<sup>5</sup> Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει γίνει ενδελεχής μελέτη με χρήση της αντλίας υψηλής παροχής DH-50810H και έχουν βρεθεί βέλτιστα σενάρια δειγματοληψίας και ανάλυσης, καθώς και επίπεδα ανίχνευσης ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



**Εικόνα 25:** Αριστερά: Φορητός δειγματολήπτης αέρα του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας. Δεξιά: Φίλτρο αέρα  $\varnothing 4''$ , προσαρμοσμένο στην αντλία. Κάτω: Ένδειξη παροχής αέρα σε  $\text{m}^3/\text{min}$ .

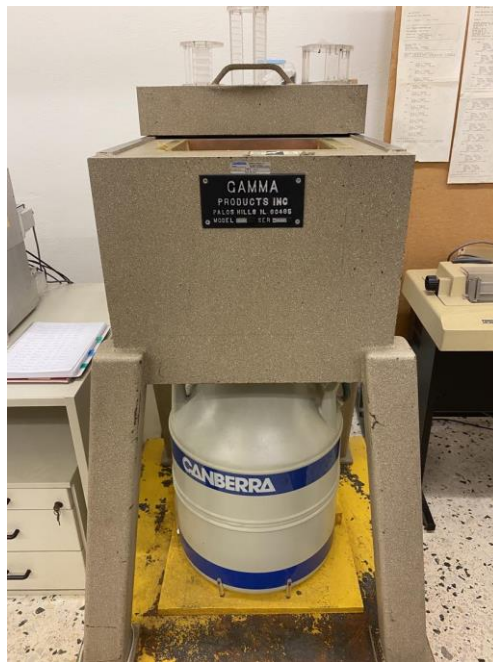
Για κάθε πείραμα που πραγματοποιήθηκε, η δειγματοληψία είχε συγκεκριμένη κάθε φορά διάρκεια, ενώ μεταξύ της δειγματοληψίας και της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του φίλτρου, μεσολαβούσε κατάλληλο χρονικό διάστημα αναμονής (delay), το οποίο είχε πρότερα καθοριστεί κατά το σχεδιασμό του πειράματος.

Το χρονικό διάστημα αναμονής εισήχθη με σκοπό να μειωθεί το υπόστρωμα της μέτρησης, εν προκειμένω τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου, τα οποία συσσωρεύονται πάνω στο φίλτρο κατά τη δειγματοληψία, και ως εκ τούτου συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό στο υπόστρωμα κατά την ανάλυση. Με την εφαρμογή χρόνου καθυστέρησης η συγκέντρωσή τους ελαττώνεται (καθώς τα ισότοπα διασπώνται) προτού αναλυθεί το δείγμα. Τα κύρια

ισότοπα που συντελούν στο υπόστρωμα της μέτρησης είναι τα βραχύβια θυγατρικά του Ραδονίου, Pb-214 με χρόνο ημιζωής 27min και Bi-214 με χρόνο ημιζωής 20min. Η μείωση του υποστρώματος οδηγεί άμεσα σε χαμηλότερες τιμές MDA και καλύτερη βεβαιότητα μετρήσεων.

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, από τις ενδείξεις του ροόμετρου πλωτήρα της αντλίας και με χρήση και της καμπύλης βαθμονόμησης της παροχής της αντλίας, εκτιμάτο – αν και με όχι πολύ μεγάλη ακρίβεια – για κάθε πείραμα η παροχή και εν τέλει συνολικός όγκος του αέρα που έχει διέλθει μέσα από το φίλτρο, ώστε στη συνέχεια να εισαχθεί στους υπολογισμούς.

Στην *Εικόνα 24* που ακολουθεί διακρίνεται ο ανιχνευτής High Purity Germanium (HPGe) του ΕΠΤ-ΕΜΠ με σχετική απόδοση 33.8% που χρησιμοποιήθηκε κατά τις αναλύσεις.



**Εικόνα 26:** Ανιχνευτής HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ με σχετική απόδοση 33.8%

### 5.1.1 Πειράματα δειγματοληψίας και ανάλυσης φίλτρων αέρα

Συνολικά έγιναν δειγματοληψίες επτά (7) φίλτρων αέρα και κάθε φίλτρο αναλύθηκε με μία σειρά σεναρίων. Στον *Πίνακα 78* παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα διαφορετικά πρωτόκολλα δειγματοληψίας που εφαρμόστηκαν στα πειράματα αυτά και ο συνολικός όγκος αέρα κάθε δειγματοληψίας.



Στη συνέχεια της παραγράφου περιγράφεται κάθε ένα σενάριο δειγματοληψίας με λεπτομέρειες και παρατίθενται πίνακες με την ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια που επιτυγχάνεται σε κάθε περίπτωση.

**Πίνακας 78:** Σενάρια δειγματοληψίας, αναμονής και συνολικός όγκος αέρα

Φίλτρο	Χρόνος Δειγματοληψίας (min)	Αναμονή (delay) μέχρι την λήψη φάσματος (min)	Συνολικός όγκος αέρα (m <sup>3</sup> )
1	60	0	69
2	60	60	69
3	60	0	48
4	60	30	42
5	60	120	42
6	30	0	21
7	10	0	9

#### 5.1.1.1 Φίλτρο 1

Στο πρώτο πείραμα η δειγματοληψία διήρκησε 60min και δεν υπήρξε χρόνος αναμονής, δηλαδή η ανάλυση του δείγματος ξεκίνησε αμέσως μετά το πέρας της δειγματοληψίας. Στην πράξη, σε κάθε δειγματοληψία υπήρχε μία αναπόφευκτη καθυστέρηση – κάτι λιγότερο από 3 λεπτά – για να αφαιρεθεί το φίλτρο από την αντλία και να τοποθετηθεί στον ανιχνευτή, προκειμένου να αρχίσει η μέτρηση. Κατά τη φασματοσκοπική ανάλυση συλλέχθηκαν τέσσερα φάσματα: (α) διάρκειας 10 λεπτών, (β) 30 λεπτών, (γ) 1 ώρας και (δ) 2 ωρών. Για κάθε φάσμα εκτιμήθηκε το επίπεδο ανίχνευσης (MDA).

**Πίνακας 79:** MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m<sup>3</sup> στο φίλτρο 1

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
10	0.029	0.067	0.026	0.032
30	0.019	0.036	0.016	0.021
60	0.011	0.024	0.010	0.013
120	0.007	0.014	0.006	0.008

### 5.1.1.2 Φίλτρο 2

Αντίστοιχα, στο δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκαν ακριβώς τα ίδια βήματα, αλλά προστέθηκε και μία ώρα αναμονής (delay) ανάμεσα στο πέρας της δειγματοληψίας και την έναρξη της φασματοσκοπικής ανάλυσης. Ο όγκος αέρα ήταν και πάλι 69 m<sup>3</sup> αέρα.

Συλλέχθηκαν δύο φάσματα μετά το πέρας της 1<sup>ης</sup> και της 2<sup>ης</sup> ώρας από τη τοποθέτηση του δείγματος στον ανιχνευτή.

**Πίνακας 80:** MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m<sup>3</sup> στο φίλτρο 2

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
60	0.007	0.011	0.006	0.009
120	0.004	0.007	0.004	0.006

### 5.1.1.3 Φίλτρο 3

Στο τρίτο πείραμα, η δειγματοληψία διήρκησε 1 ώρα και δεν υπήρξε αναμονή. Ο συνολικός όγκος που συλλέχθηκε από την αντλία ανήλθε στα 48 m<sup>3</sup> αέρα.

Σε αυτήν την περίπτωση η συλλογή των φασμάτων δεν ξεκίνησε την ίδια χρονική στιγμή, αλλά τα φάσματα ελήφθησαν διαδοχικά. Το πρώτο φάσμα συλλέχθηκε για τα πρώτα 10 λεπτά, το δεύτερο για τα επόμενα 20, στην συνέχεια το τρίτο για τα επόμενα 30 λεπτά και τέλος το τέταρτο φάσμα για την επόμενη ώρα.

**Πίνακας 81:** MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m<sup>3</sup> στο φίλτρο 3

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
0 έως 10	0.036	0.055	0.019	0.039
10 έως 30	0.020	0.035	0.011	0.019
30 έως 60	0.015	0.023	0.012	0.017
60 έως 120	0.005	0.011	0.005	0.009

#### 5.1.1.4 Φίλτρο 4

Σε αυτό το πείραμα επιλέχθηκε δειγματοληψία διάρκειας μίας ώρας. Ο συνολικός όγκος αέρα ανήλθε στα 42 m<sup>3</sup>. Η αναμονή ήταν 30 λεπτά. Συλλέχθηκε φάσμα μετά τα πρώτα 30 λεπτά, 1 ώρα και 2 ώρες από τη τοποθέτηση του δείγματος στον ανιχνευτή.

**Πίνακας 82:** MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m<sup>3</sup> στο φίλτρο 4

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
30	0.023	0.037	0.021	0.026
60	0.014	0.024	0.012	0.018
120	0.008	0.014	0.007	0.010

#### 5.1.1.5 Φίλτρο 5

Στο πέμπτο πείραμα η δειγματοληψία διήρκησε 1 ώρα και συλλέχθηκε όγκος αέρα 42 m<sup>3</sup>. Η αναμονή ήταν 2 ώρες και συλλέχθηκαν δύο φάσματα, μετά το πέρας της 2<sup>ης</sup> και της 4<sup>ης</sup> ώρας.

**Πίνακας 83:** MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m<sup>3</sup> στο φίλτρο 5

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
120	0.0053	0.0074	0.0070	0.0096
240	0.0036	0.0041	0.0042	0.0063

#### 5.1.1.6 Φίλτρο 6

Στο πείραμα αυτό, μειώθηκε ο χρόνος δειγματοληψίας σε 30 λεπτά και δεν υπήρξε καμία αναμονή, πέραν των τριών λεπτών που χρειάστηκαν για την προετοιμασία και την μεταφορά του δείγματος. Ο συνολικός όγκος δειγματοληψίας ανήλθε στα 21 m<sup>3</sup> αέρα. Συλλέχθηκαν τρία φάσματα στα 10, 30 και 60 λεπτά.

**Πίνακας 84:** MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m<sup>3</sup> στο φίλτρο 6

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
10	0.096	0.183	0.094	0.112
30	0.054	0.088	0.046	0.055
60	0.034	0.054	0.030	0.037

#### 5.1.1.7 Φίλτρο 7

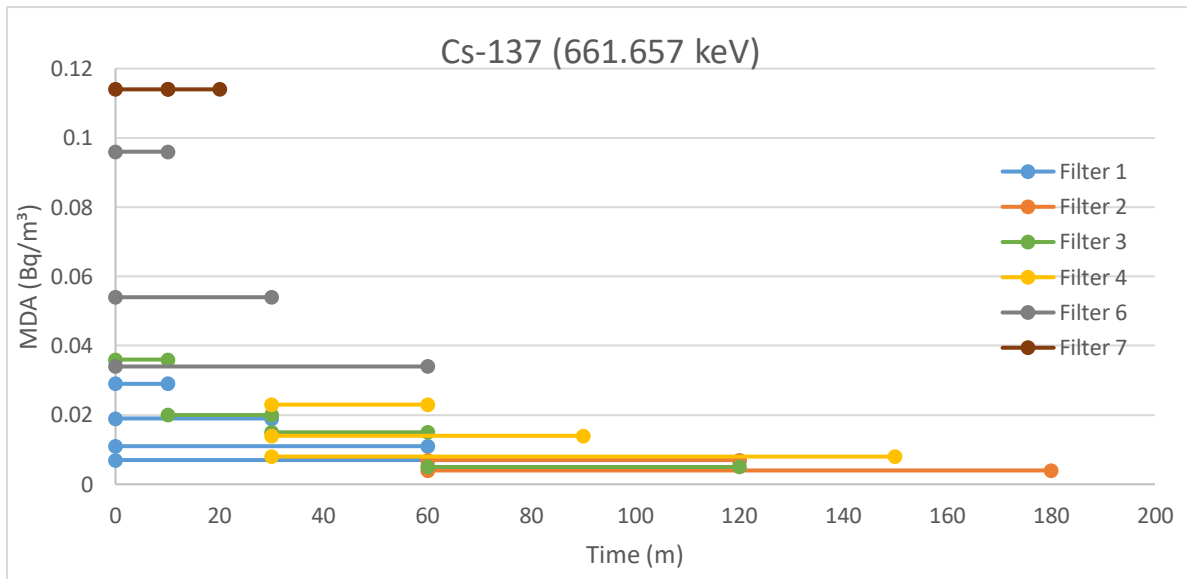
Στο τελευταίο πείραμα δοκιμάστηκε η ταχύτερη διαδικασία της δειγματοληψίας 10 λεπτών και η άμεση ανάλυση χωρίς αναμονή. Ελήφθησαν δύο φάσματα διάρκειας 10 λεπτών: (α) τα πρώτα δέκα λεπτά και (β) τα επόμενα 10 λεπτά (στην ουσία για το δεύτερο φάσμα υπάρχει αναμονή 10 λεπτών). Στην περίπτωση αυτή ο όγκος αέρα ήταν μόλις 9m<sup>3</sup>. Ένα τέτοιο σενάριο θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο σε περίπτωση έκτακτου γεγονότος, όπου το ζητούμενο είναι να υπάρχει άμεσα εικόνα της κατάστασης.

**Πίνακας 85:** MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m<sup>3</sup> στο φίλτρο 7

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134(a)	Cs-134(b)	I-131
0 έως 10	0.114	0.167	0.021	0.158
10 έως 20	0.114	0.221	0.116	0.127

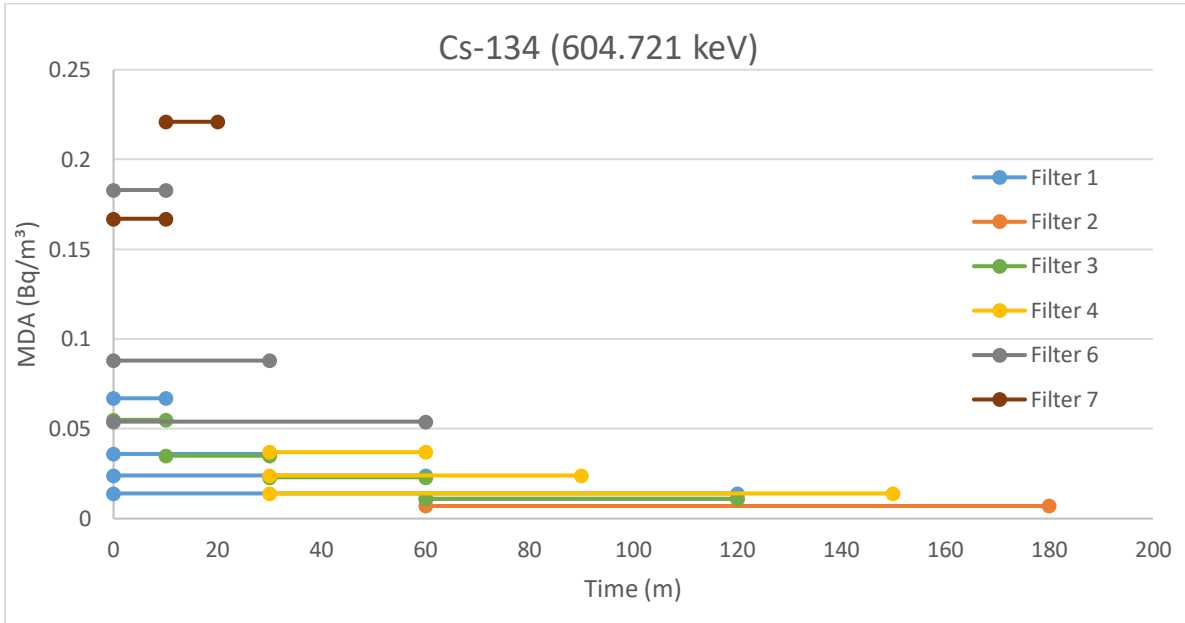
### 5.1.2 Διαγράμματα ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας MDA

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα του MDA ανά ισότοπο για κάθε ένα σενάριο, δηλαδή τελικά συναρτήσει του χρόνου ανάλυσης-συλλογής φάσματος, με σκοπό την σύγκριση των διαφορετικών σεναρίων δειγματοληψίας-ανάλυσης κάθε πειράματος. Τα αποτελέσματα για το φίλτρο 5 παρουσιάζονται ξεχωριστά λόγω της μεγάλης διάρκειας φασματοσκοπικής ανάλυσης που εφαρμόστηκε, συγκριτικά με τα υπόλοιπα φίλτρα. Για όλα τα φίλτρα, θεωρείται χρονική στιγμή μηδέν το πέρας κάθε δειγματοληψίας. Τα διαγράμματα που αφορά το I-131, καθώς και το ξεχωριστό διάγραμμα του φίλτρου 5 βρίσκονται στο *Παράρτημα IV*. Στο Διάγραμμα 28 παρουσιάζεται η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια Cs-137 σε φίλτρα αέρα.

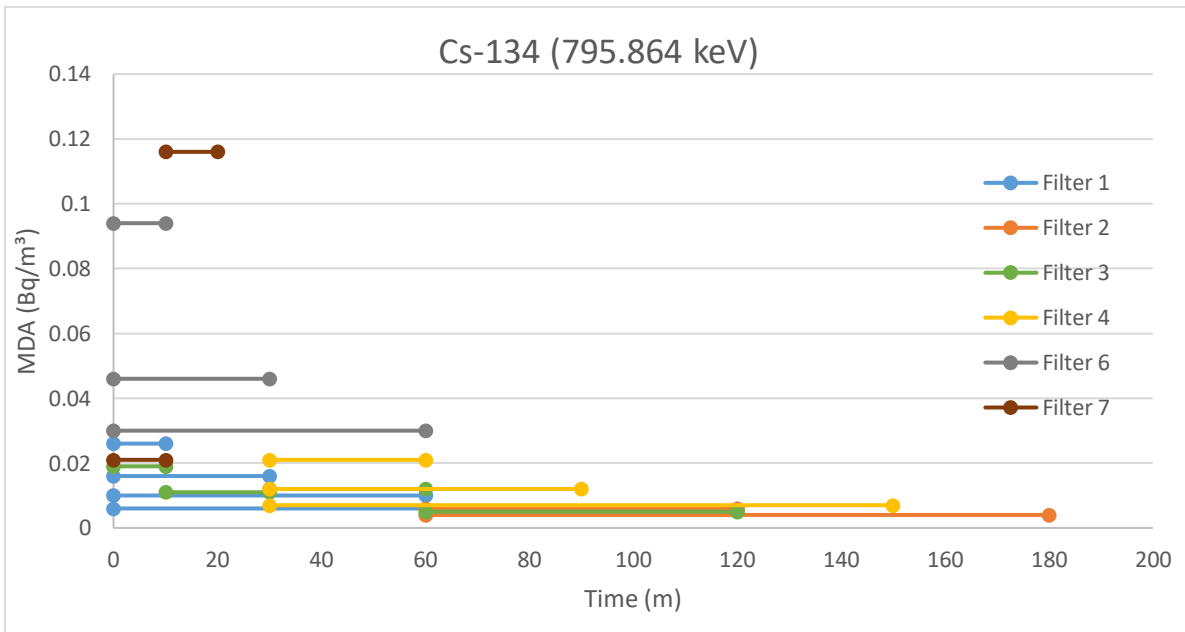


**Διάγραμμα 27:** Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια Cs-137 σε φίλτρα αέρα

Όμοια, στο Διάγραμμα 29 και 30 παρουσιάζεται η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια του Cs-134 στο φίλτρα αέρα, όπως εκτιμάται από τις δύο σημαντικότερες φωτοκορυφές του.



**Διάγραμμα 29:** Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια Cs-134a σε φίλτρα αέρα



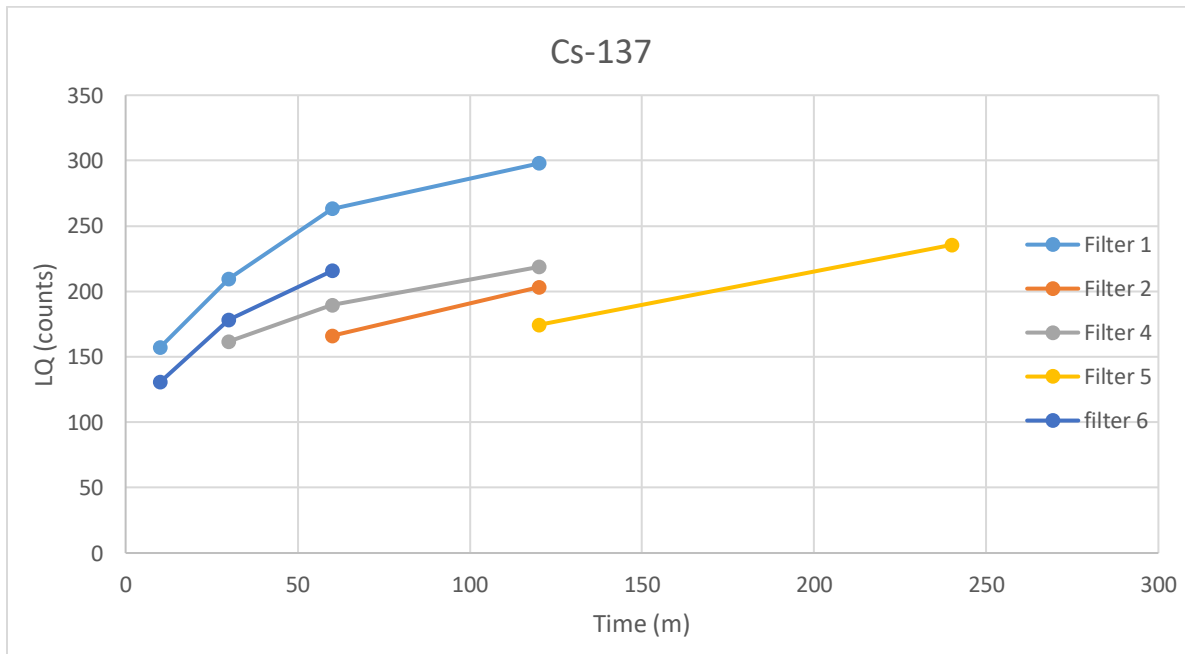
**Διάγραμμα 30:** Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια Cs-134b σε φίλτρα αέρα

### 5.1.3 Determination limit – determination time

Ομοίως, με την ανάλυση των δειγμάτων τροφίμων, και για την περίπτωση των φίλτρων υπολογίστηκαν τα μεγέθη determination limit και determination time, τα οποία παρουσιάζονται ενδεικτικά για το Cs-137 στους πίνακες που ακολουθούν. Λόγω της ιδιαιτερότητας των σεναρίων της φασματοσκοπικής ανάλυσης, τα σχετικά διαγράμματα για το φίλτρο 3 και το φίλτρο 7 παρουσιάζονται ανεξάρτητα.

**Πίνακας 86:** Determination Limit  $L_Q$  (10%) Cs-137 σε counts, φίλτρα αέρα.

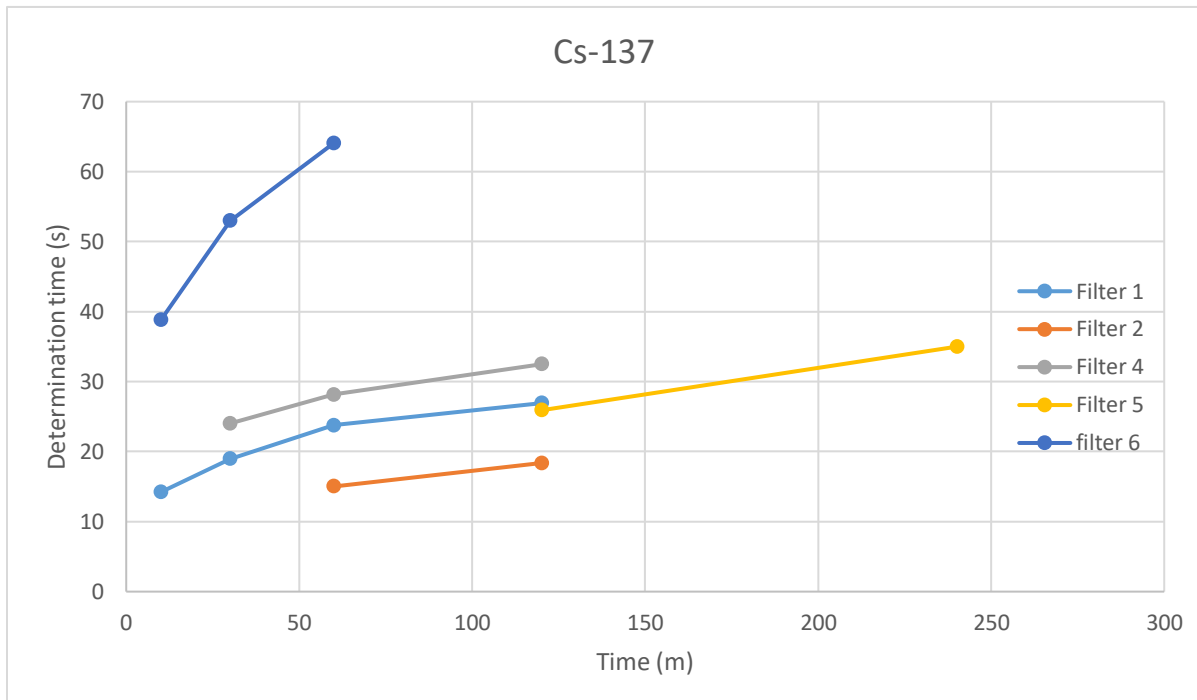
Διάρκεια ανάλυσης (min)	Φίλτρο 1	Φίλτρο2	Φίλτρο 4	Φίλτρο 5	Φίλτρο 6
10	157	-	-	-	131
30	210	-	162	-	178
60	263	166	190	-	216
120	298	203	219	174	-
240	-	-	-	236	-



**Διάγραμμα 31:** Determination limit  $L_Q$  (10%) Cs-137 σε counts, φίλτρα αέρα.

**Πίνακας 87:** Determination time(s) - Cs-137 για φίλτρα αέρα.

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Φίλτρο 1	Φίλτρο2	Φίλτρο 4	Φίλτρο 5	Φίλτρο 6
10	14	-	-	-	39
30	19	-	24	-	53
60	24	15	28	-	64
120	27	18	32	26	-
240	-	-	-	35	-



**Διάγραμμα 28:** Determination time (s) – Cs-137 για φίλτρα αέρα

Αντίστοιχα, υπολογίστηκαν τα μεγέθη determination limit και determination time και για το Cs-134, όπως παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν.



**Πίνακας 88:** Determination limit LQ (10%) Cs-134(a) σε counts για φίλτρα αέρα.

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Φίλτρο 1	Φίλτρο2	Φίλτρο 4	Φίλτρο 5	Φίλτρο 6
10	168	-	-	-	146
30	235	-	146	-	207
60	285	200	194	-	237
120	310	227	221	168	-
240	-	-	-	218	-

**Πίνακας 89:** Determination time(s) - Cs-134(a) για φίλτρα αέρα.

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Φίλτρο 1	Φίλτρο2	Φίλτρο 4	Φίλτρο 5	Φίλτρο 6
10	12	-	-	-	35
30	17	-	18	-	50
60	21	15	23	-	57
120	23	17	27	20	-
240	-	-	-	26	-

**Πίνακας 90:** Determination limit LQ (10%) Cs-134(b) σε counts για φίλτρα αέρα.

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Φίλτρο 1	Φίλτρο2	Φίλτρο 4	Φίλτρο 5	Φίλτρο 6
10	119	-	-	-	139
30	145	-	126	-	175
60	192	166	171	-	184
120	232	196	175	161	-
240	-	-	-	196	-

**Πίνακας 91:** Determination time(s) - Cs-134(b) για φίλτρα αέρα.

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Φίλτρο 1	Φίλτρο2	Φίλτρο 4	Φίλτρο 5	Φίλτρο 6
10	9	-	-	-	33
30	11	-	15	-	42
60	14	12	21	-	44
120	17	14	21	19	-
240	-	-	-	23	-

Τα σχετικά διαγράμματα του Cs-134, καθώς και του ιωδίου I-131 βρίσκονται στα Παραρτήματα V και VI αντίστοιχα.

Τέλος, στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα φίλτρα 3 και 7.

**Πίνακας 92:** Determination limit  $L_Q$  (10%) σε counts για το φίλτρο 3.

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134 (604.721 keV)	Cs-134 (795.864 keV)
0 έως 10	147	123	119
10 έως 30	162	180	133
30 έως 60	152	190	151
60 έως 120	152	155	145

**Πίνακας 93:** Determination time (s) για το φίλτρο 3.

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134 (604.721 keV)	Cs-134 (795.864 keV)
0 έως 10	19	13	12
10 έως 30	21	19	14
30 έως 60	20	20	16
60 έως 120	20	16	15

**Πίνακας 94:** Determination Limit  $L_Q$  (10%) σε counts για το φίλτρο 7.

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134 (604.721 keV)	Cs-134 (795.864 keV)
0 έως 10	109	116	100
10 έως 20	117	123	126

**Πίνακας 95:** Determination Time (s) για το φίλτρο 7.

Διάρκεια ανάλυσης (min)	Cs-137	Cs-134 (604.721 keV)	Cs-134 (795.864 keV)
0 έως 10	60	52	44
10 έως 20	64	55	56

Τα σχετικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων βρίσκονται στα Παραρτήματα V και VI.

#### 5.1.4 Παρατηρήσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας αέρα με την αντλία TFIA-2 της Starplex σε φίλτρα 4" και της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των φίλτρων σε ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Για όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η ίδια αντλία και ο ίδιος τύπος φίλτρου. Δοκιμάστηκαν μία σειρά από επτά (7) σενάρια που διαφοροποιούνται στη διάρκεια δειγματοληψίας, αναμονής και φασματοσκοπικής ανάλυσης. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων, εκτιμήθηκαν τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης των ισοτόπων ενδιαφέροντος, για κάθε ένα σενάριο δειγματοληψίας-αναμονής-ανάλυσης, κάτι που σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης επιτρέπει την επιλογή του κατάλληλου σεναρίου, ανάλογα με τα επίπεδα ραδιενέργειας που αναμένεται να υπάρχουν στον αέρα. Τα αποτελέσματα αυτά επιπλέον, δίνουν εκ των προτέρων, κατά τη φάση σχεδιασμού των δειγματοληψιών, πληροφορία αναφορικά με τα επίπεδα ανίχνευσης που μπορούν να επιτευχθούν.

Ως πολύ καλά σενάρια, υπό την έννοια της σχετικά ταχείας και με χαμηλά επίπεδα ανίχνευσης των ισοτόπων ενδιαφέροντος, φαίνεται να είναι τα σενάρια με τα οποία συλλέχθηκαν τα φίλτρα 1 και 3, όπου η δειγματοληψία διήρκεσε μία ώρα και από τα πρώτα 20 λεπτά της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης φαίνεται να επιτυγχάνονται επίπεδα ανίχνευσης της τάξης των 0.020 Bq/m<sup>3</sup>.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την εφαρμογή του σεναρίου του φίλτρου 7 παρατηρείται ότι τα κατώτερα όρια ανίχνευσης και για τις δύο φωτοκορυφές του Cs-134 (604.721 keV και 795.864 keV) φαίνεται να αυξάνουν με τη πάροδο του χρόνου, κάτι που είναι αντίθετο από τα αναμενόμενα. Στο σενάριο αυτό η διάρκεια δειγματοληψίας είναι πολύ μικρή – μόλις 10 λεπτά και δεν προβλέπεται χρόνος αναμονής. Στην περίπτωση αυτή φαίνεται τα επίπεδα ανίχνευσης να επηρεάζονται σημαντικά τόσο από τα θυγατρικά του ραδονίου που συλλέγονται πάνω στο φίλτρο όσο και από την κύμανση του υποστρώματος κατά την ανάλυση. Απεναντίας, κατά τη φασματοσκοπική ανάλυση του φίλτρου 1, στο οποίο η δειγματοληψία διήρκεσε 1 ώρα, μια πολύ χαμηλή τιμή MDA για όλα τα ραδιοϊσότοπα επιτυγχάνεται μόλις στα πρώτα 10 λεπτά.

Όσον αφορά τα determination limit και determination time – δύο μεγέθη τα οποία όπως έχει επισημανθεί έχουν μειωμένη αξία σε σχέση με το MDA, γενικώς παρατηρείται μια ομοιομορφία μεταξύ των διαγραμμάτων και διαπιστώνονται τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση του Cs-134(b), το φίλτρο 6 παρουσιάζει υψηλότερο determination limit από το φίλτρο 1, κάτι το οποίο δεν προκύπτει στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Ιδιαίτερα όσον αφορά το μέγεθος determination time, θα μπορούσαν να γίνουν αντίστοιχες σκέψεις, υπολογισμοί και εκτιμήσεις με αυτές που έχουν γίνει για τα δείγματα τροφίμων.

## 6. Συμπεράσματα και προτάσεις για το μέλλον

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μία σύνοψη της Διπλωματικής Εργασίας, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα ευρήματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν, ενώ γίνονται προτάσεις για μελλοντική επέκταση της σχετικής έρευνας.

Στο πλαίσιο της ΔΕ έγινε μία προσπάθεια να μελετηθούν και να καταγραφούν μία σειρά από διαδικασίες οι οποίες θα πρέπει να εφαρμοσθούν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης μετά από πυρηνικό ατύχημα, όπου αναμένεται να υπάρξει επίπτωση στην Ελλάδα. Η διερεύνηση εστίασε σε δύο κατευθύνσεις: (α) μέτρηση της ραδιενέργειας δειγμάτων επιλεγμένων τροφίμων που θα πρέπει να αναλυθούν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, και (β) αναλύσεις φίλτρων αέρα με στόχο την ανίχνευση και την εκτίμηση της συγκέντρωσης τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στον αέρα. Τα ισότοπα που εξετάστηκαν, τόσο για τα τρόφιμα όσο και για τον αέρα ήταν Cs-137, Cs134, I-131.

Τόσο για τα δείγματα τροφίμων, όσο και για τα φίλτρα αέρα, δοκιμάστηκαν μία σειρά από σενάρια, που αφορούν, για τα μεν δείγματα τροφίμων τη διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων και την γ-φασματοσκοπική ανάλυσή τους, για τα δεν φίλτρα αέρα τη διάρκεια δειγματοληψίας, την αναμονή και τη διάρκεια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Σε κάθε περίπτωση εκτιμήθηκαν τα παρακάτω μεγέθη: (α) ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (MDA), (β) Determination Limit για επίπεδο αβεβαιότητας 10% και (γ) Determination time.

Αν και το τελευταίο μέγεθος δεν φαίνεται να έχει προφανή αξία, εντούτοις μπορεί να παρέχει αξιόλογη πληροφορία για το ποια πρέπει να είναι η διάρκεια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης για την επίτευξη συγκεκριμένου επιπέδου αβεβαιότητας, όταν τα αναμενόμενα επίπεδα ραδιενέργειας του δείγματος έχουν συγκεκριμένη τιμή (π.χ.  $1 \text{ kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$  για τα δείγματα τροφίμων), αλλά και ποια πρέπει να είναι στις περιπτώσεις που τα επίπεδα ραδιενέργειας έχουν άλλη τιμή.

### 6.1.1 Προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων τροφίμων

Η προετοιμασία των δειγμάτων τροφίμων χωρίστηκε κατά βάση σε δύο μεθοδολογίες, με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης κάθε μεθόδου στην ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (MDA) των υπό ανάλυση δειγμάτων, καθώς και την εξαγωγή της καταλληλότερης εξ αυτών, για την επίτευξη χαμηλότερων τιμών MDA για τα ραδιοϊσότοπα Cs-137 (661.657 keV), Cs-134 (604.721 keV, 795.864 keV) και I-131 (364.489 keV). Η πρώτη μεθοδολογία αφορούσε την αυστηρή εφαρμογή των οδηγιών της βιβλιογραφίας, όπου αρχικά τα τρόφιμα πλύθηκαν εκτενώς με νερό, έπειτα αφέθηκαν να ξηραθούν και στην συνέχεια ομογενοποιήθηκαν. Ακολούθως, τα ξηρά δείγματα τοποθετήθηκαν σε κατάλληλο δοχείο τυποποιημένης γεωμετρίας και πραγματοποιήθηκε η γ-φασματοσκοπική τους ανάλυση. Η δεύτερη μεθοδολογία αφορούσε την εφαρμογή σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης, όπου η ταχύτητα ανάλυσης και απόκτησης αποτελεσμάτων είναι μείζονος σημασίας, δηλαδή τα δείγματα, αφού πρώτα είχαν πλυθεί, ομογενοποιήθηκαν και αναλύθηκαν παραλείποντας το βήμα της ξήρασης. Εξαίρεση αποτέλεσαν τρόφιμα όπως το γάλα και το σιτάρι, τα οποία

δεν απαιτούσαν κάποια προεργασία πριν τη γ-φασματοσκοπική τους ανάλυση. Τα τρόφιμα σε όλες τις περιπτώσεις πλύθηκαν και τα μη βρώσιμα κομμάτια τους αφαιρέθηκαν, ώστε να προσομοιάσουν ρεαλιστικές συνθήκες κατανάλωσης από τον άνθρωπο. Επίσης, στις περιπτώσεις του μαρουλιού και του μήλου – τα οποία ήταν από τα πρώτα που αναλύθηκαν – επαναλήφθηκε η διαδικασία της προετοιμασίας κι ανάλυσης αποξηραμένων δειγμάτων, παραλείποντας όμως την διαδικασία της πλύσης, ούτως ώστε να διερευνηθεί η ενδεχόμενη επίδρασή της. Η σύγκριση μεταξύ των σχετικών αποτελεσμάτων ωστόσο δεν ανέδειξε κάποια διαφορά και για αυτόν τον λόγο στα υπόλοιπα δείγματα δεν διερευνήθηκε περαιτέρω.

Η προετοιμασία των δειγμάτων παρουσίασε ορισμένες δυσκολίες, όπως τη διαρροή υγρών που παράγονται κατά την διάρκεια της ζύμωσης των ωμών δειγμάτων, η μεγάλη διαφορά μεταξύ υγρής και ξηρής μάζας των τροφίμων λόγω της μεγάλης περιεκτικότητάς τους σε νερό (ιδιαίτερα για τα δείγματα μαρουλιού και μανιταριού).

Ως εκ τούτου, προτείνεται η αποφυγή σε κάθε περίπτωση της γεωμετρίας «2», δηλαδή το πλήρες γέμισμα του δοχείου, για τα ωμά δείγματα. Επίσης, είναι χρήσιμο στα πειράματα που σχετίζονται με τρόφιμα, τα οποία αποτελούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου από νερό, να λαμβάνεται μεγάλη μάζα δείγματος ώστε να επιτευχθεί τουλάχιστον η γεωμετρία 8. Από τα πειράματα μπορεί να ληφθεί ως συμπέρασμα, ότι πρέπει να ληφθούν δείγματα ξηρής μάζας άνω του ενός κιλού για την επίτευξη μιας ικανοποιητικής γεωμετρίας «8». Επιπλέον, η γεωμετρία Marinelli δεν φαίνεται να προσφέρει κάτι σημαντικό σε όρους επιπέδων ανίχνευσης, σε σχέση με τις τυποποιημένες γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Μία μικρή λεπτομέρεια που όμως έχει τη σημασία της, έχει να κάνει με τη χρήση αλουμινοχάρτου κατά τη διαδικασία της ξήρανσης. Παρόλο που αυτή βοηθάει στην αποφυγή cross-contamination, δημιουργεί προβλήματα στην ομογενοποίηση των δειγμάτων, καθώς κομμάτια του προσκολλώνται στο δείγμα. Για αυτόν τον λόγο συνιστάται η αποφυγή της χρήσης του κατά την αποξήρανση. Αντιθέτως, είναι προτιμότερο να τοποθετείται το τρόφιμο απευθείας πάνω στην επιφάνεια του σκεύους και έπειτα το σκεύος να καθαρίζεται επιμελώς για το επόμενο πείραμα ή να χρησιμοποιούνται αντικολλητικά φύλλα (λαδόκολλα).

Όπως αναφέρεται στο *Κεφάλαιο 4.9.1* ήταν αναμενόμενο ότι τα «ωμά» δείγματα, δηλαδή αυτά που δεν ξηράνθηκαν, θα εμφάνιζαν μεγάλη απόκλιση σε όρους επιπέδων ανίχνευσης σε σχέση με τα «ξηρά» δείγματα, όπως και αποδείχθηκε. Η διαδικασία ανάλυσης «ωμών» δειγμάτων έχει νόημα σε περίπτωση μεγάλης αναμενόμενης συγκέντρωσης ραδιενέργειας. Από όλα τα αποτελέσματα κατέστη φανερό – όπως ήταν αναμενόμενο – ότι με την αύξηση της διάρκειας γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης η τιμή του MDA μειωνόταν μέχρι να προσεγγίσει μία ελάχιστη τιμή. Για κάθε σενάριο εκτιμήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές.

### 6.1.2 Δειγματοληψίες και αναλύσεις φίλτρων αέρα

Όσον αφορά στις δειγματοληψίες αερολύματος χρησιμοποιήθηκε η αντλία Starplex και φίλτρα διαμέτρου 4" καθώς (α) στο ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει γίνει ενδελεχής μελέτη των δυνατοτήτων που παρέχει ο δειγματολήπτης DH-50810H High-Volume Air-Sampler της εταιρίας F&J Specialties με φίλτρα 8"x10" στα πλαίσια άλλων εργασιών και (β) έχει πολύ ενδιαφέρον να διαπιστωθεί τι μπορούν να προσφέρουν σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης – σε όρους επιπέδων ανίχνευσης – οι μικρότερης παροχής αντλίες TFIA-2 της Starplex, σε συνδυασμό με τα πολύ χαμηλότερου κόστους φίλτρα 4".

Από τα επτά σενάρια δειγματοληψίας και ανάλυσης που εξετάσθηκαν – σε κάθε σενάριο δοκιμάστηκαν περισσότερα σενάρια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης – διαπιστώθηκε ότι οι τιμές MDA είναι χαμηλότερες στις περιπτώσεις όπου εφαρμόστηκε μεγαλύτερη αναμονή μετά τη δειγματοληψία. Επίσης, η μεταβολή του MDA έπειτα από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα διαπιστώνεται ως μη σημαντική. Όπως αναφέρεται και στο *Κεφάλαιο 5.1.4* οι βέλτιστοι συνδυασμοί με γνώμονα την ταχύτητα και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι τα φίλτρα 1 και 3.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το χρονικό διάστημα αναμονής σε όλες τις περιπτώσεις παρουσίασε μεγάλη επίδραση στα αποτελέσματα, καθώς η τιμή MDA υπολογίστηκε σε αρκετά χαμηλότερα επίπεδα στις περιπτώσεις όπου εφαρμόστηκε διάστημα αναμονής. Επομένως, σε περίπτωση που σκοπός είναι η επίτευξη της χαμηλότερης τιμής MDA, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για το φίλτρο 2 κρίνεται καταλληλότερη, δηλαδή δειγματοληψία 60 λεπτών, delay 60 λεπτών και φασματοσκοπική ανάλυση αμέσως μετά. Οι υπόλοιπες μέθοδοι αποδείχθηκαν σχετικά χρονοβόρες και η μείωση της τιμής MDA που επιτύγχαναν ήταν τελικά ελάχιστη.

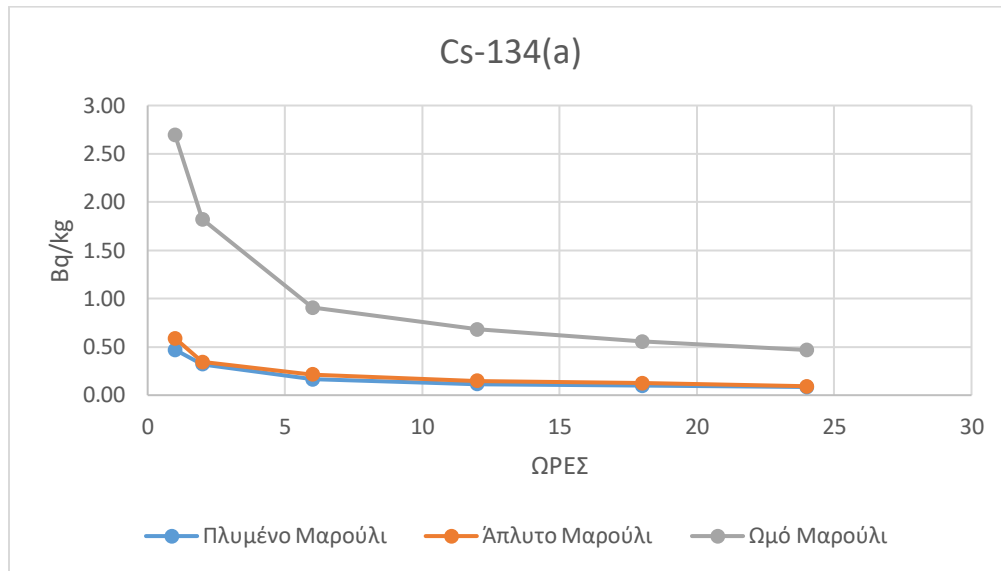
Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην περίπτωση του φίλτρου 7, όπου πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία 10 λεπτών και αμέσως μετά ανάλυση χωρίς καθυστέρηση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι τιμές MDA για το Cs-134, όπως υπολογίζονται από τις φωτοκορυφές ενέργειας 604.721 keV και 795.864 keV φαίνονται να έχουν αρχικά μια ανοδική τάση. Το φαινόμενο αυτό πιθανόν να οφείλεται στη συσσώρευση Bi-214, το οποίο παράγεται συνεχώς από την αλυσίδα διασπάσεων του Ραδονίου Rn-222. Το Rn-222 διασπάται σε Po-218 (χρόνου ημιζωής 3 λεπτά), έπειτα σε Pb-214 (χρόνου ημιζωής 27 λεπτά) και τελικά στο Bi-214 (χρόνου ημιζωής 20 λεπτά). Συσσώρευση Po-218, Pb-214 και Bi-214 υπήρχε σε όλα τα φίλτρα αέρα, καθώς τα ισότοπα αυτά βρίσκονται προσκολλημένα στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα, οπότε και συλλέγονται από το φίλτρο. Οι διασπάσεις του Po-218 και του Pb-214 που συλλέγονται στο φίλτρο κατά τη δειγματοληψία οδηγούν σε αύξηση της συγκέντρωσης του Bi-214. Ο ρυθμός, όμως, αυτών των διασπάσεων οδηγεί σε μια «υστέρηση» στη συσσώρευση του Bi-214, καθώς δεν αρκεί μικρό χρονικό διάστημα δειγματοληψίας (πχ. 10 λεπτών) ώστε να γίνει εμφανές το φαινόμενο αυτό. Η αύξηση λοιπόν του MDA σε αυτήν την περίπτωση πιθανότατα οφείλεται στο ότι τα φωτόνια του Bi-214, ενέργειας 609 keV, δημιουργούν φωτοκορυφή πολύ κοντά στα 604 keV, ενώ τα

φωτόνια του Bi-214, ενέργειας 1120 keV, ενδεχομένως να αυξάνουν το υπόστρωμα της φωτοκορυφής των 796 keV. Εν αντιθέσει, οι φωτοκορυφές των υπόλοιπων ισοτόπων ενδιαφέροντος (λ.χ. του I-131) δεν φαίνονται να επηρεάζονται με αντίστοιχο τρόπο, πιθανόν λόγω της σχετικής θέσης τους στο φάσμα. Συμπερασματικά, συνιστάται η αποφυγή τόσο μικρού χρόνου δειγματοληψίας χωρίς αναμονή.

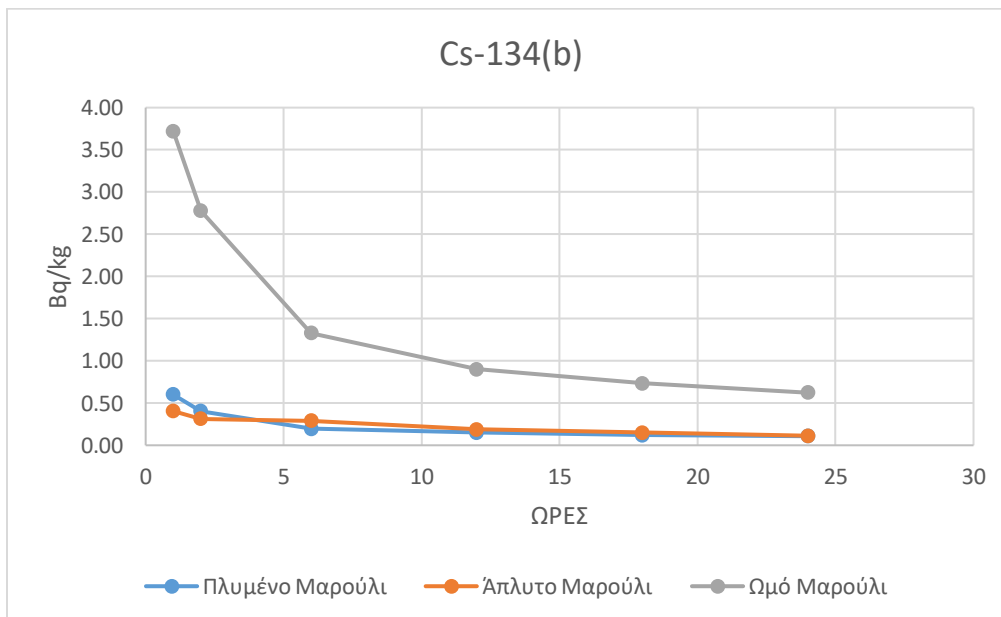
Η μελέτη που έγινε στο πλαίσιο της ΔΕ παρέχει χρήσιμα στοιχεία, αλλά και χρήσιμες συμβουλές για τις αναλύσεις που θα πρέπει να γίνονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ σε περίπτωση απόκρισης σε έκτακτη ανάγκη από πυρηνικό ή ραδιολογικό ατύχημα. Μελλοντικά, η μελέτη αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί σε άλλα τρόφιμα τα οποία ενδεχομένως θα πρέπει να αναλυθούν σε περίπτωση ανάγκης. Ένα άλλο πολύ ενδιαφέρον πεδίο θα ήταν η σύνταξη ολοκληρωμένου σχεδίου απόκρισης με συγκεκριμένες οδηγίες και βήματα τα οποία θα έπρεπε να ακολουθούνται σε περίπτωση ανάγκης. Στην περίπτωση αυτή στο σχέδιο θα έπρεπε να ενταχθούν όλα τα ανιχνευτικά συστήματα και οι δειγματολήπτες αέρα, αλλά και οι δυνατότητες επεξεργασίας δειγμάτων – συμπεριλαμβανομένου και του προσωπικού – κάτι που θα επέτρεπε την βέλτιστη απόκριση σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης αλλά και την βέλτιστη αξιοποίηση του εξοπλισμού.

## 7. Παραρτήματα

### 7.1.1 Παράρτημα Ι – Διαγράμματα MDA, Τρόφιμα

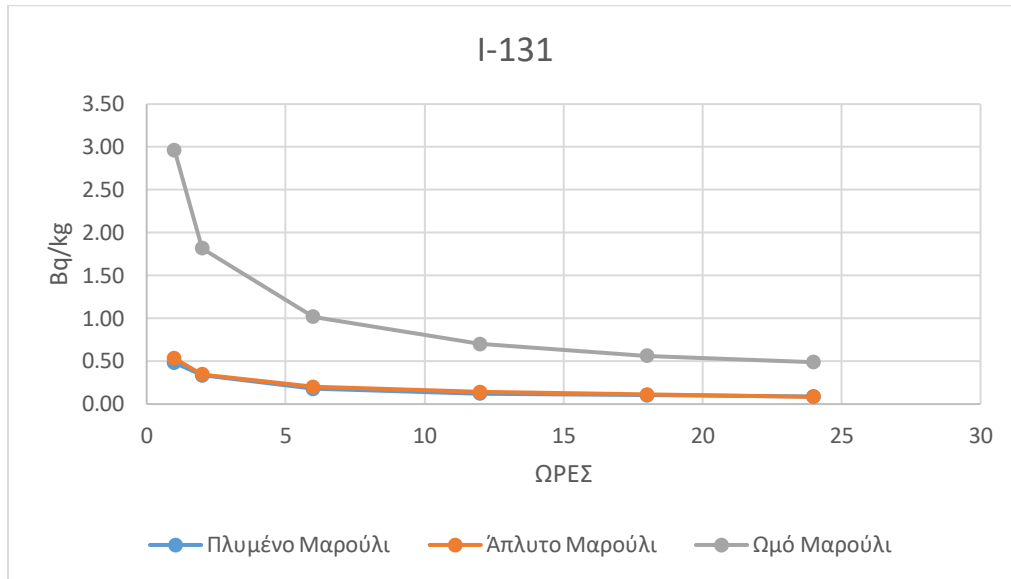


Διάγραμμα 29: MDA Cs-134(a), μαρούλι.



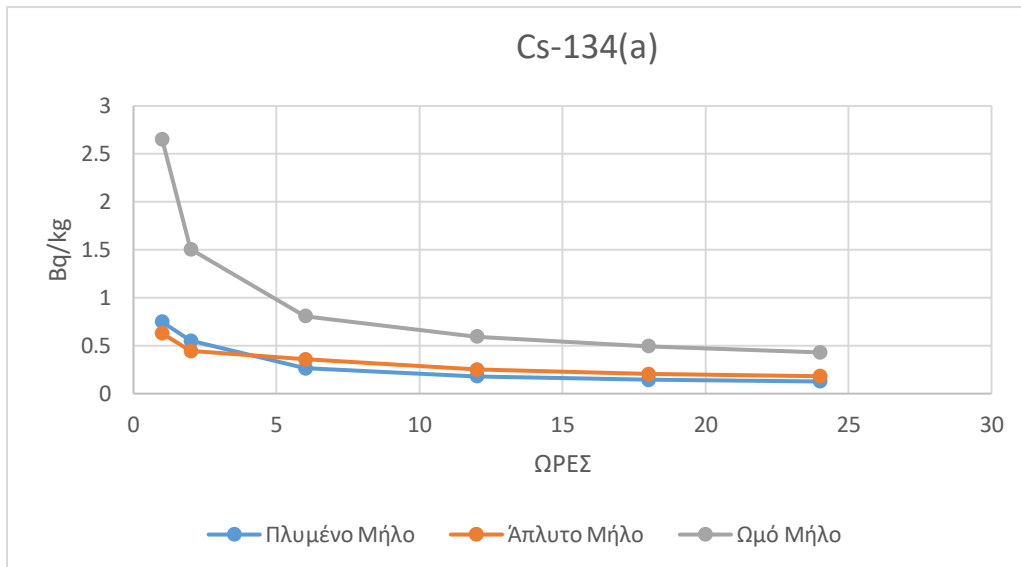
Διάγραμμα 30: MDA Cs-134(b), μαρούλι.

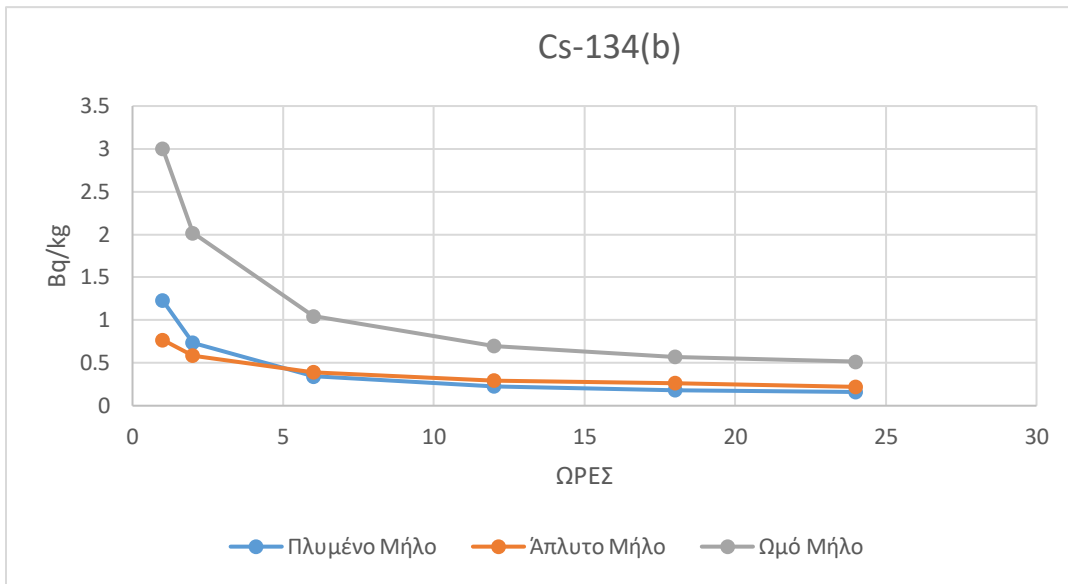




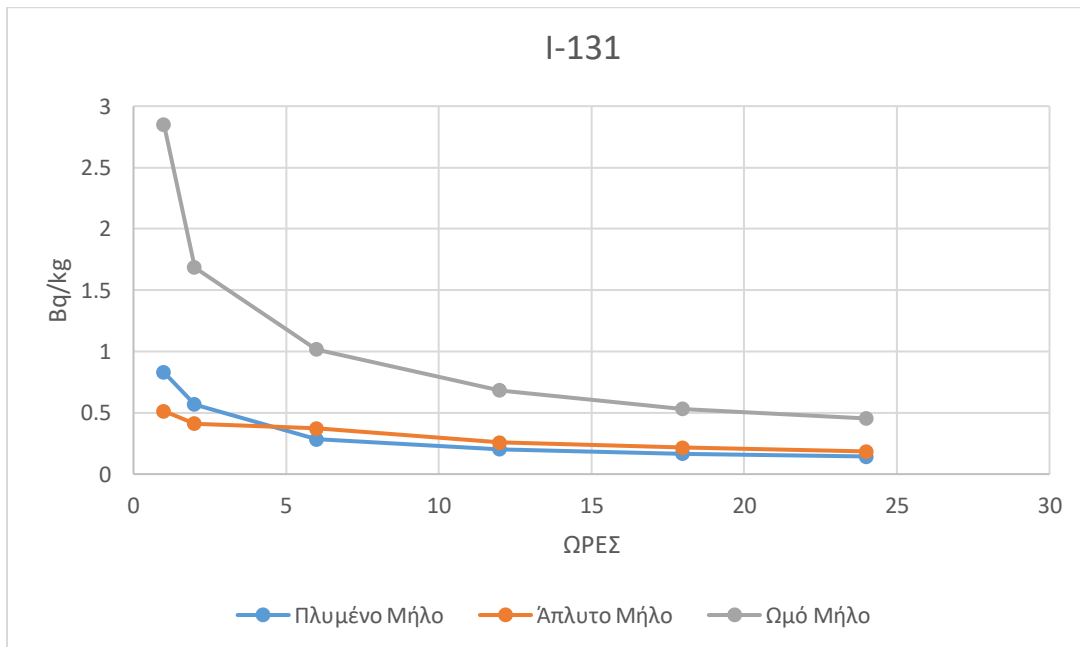
**Διάγραμμα 31: MDA I-30, μαρούλι.**

**Διάγραμμα 32: MDA Cs-134(a), μήλο.**

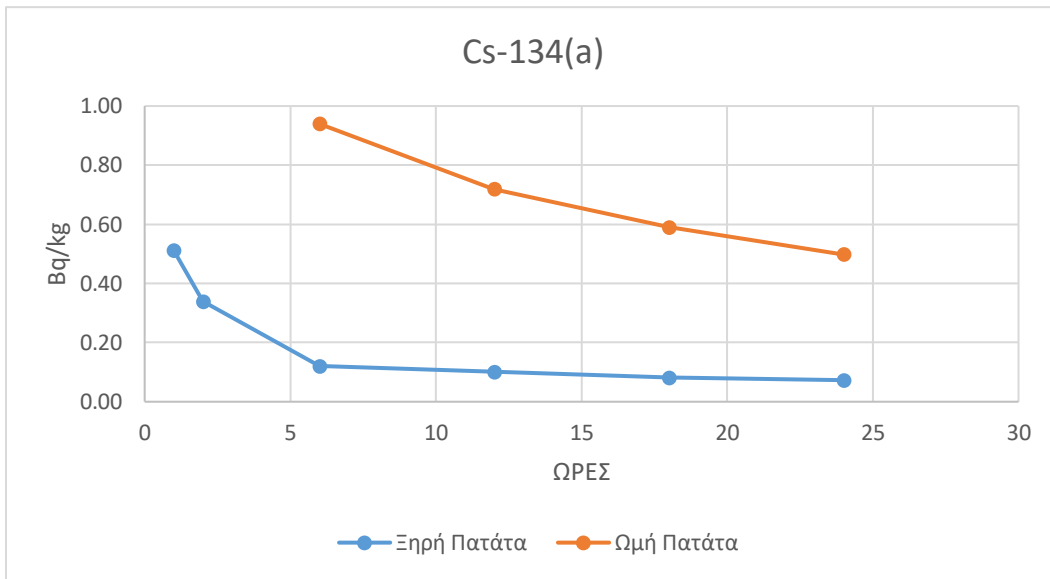




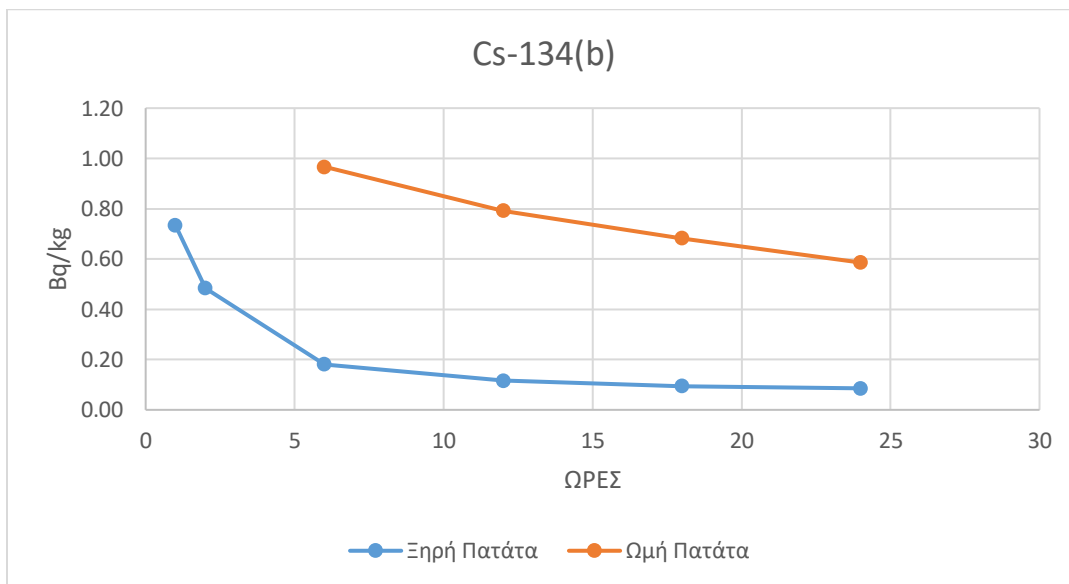
**Διάγραμμα 33: MDA Cs-134(b), μήλο.**



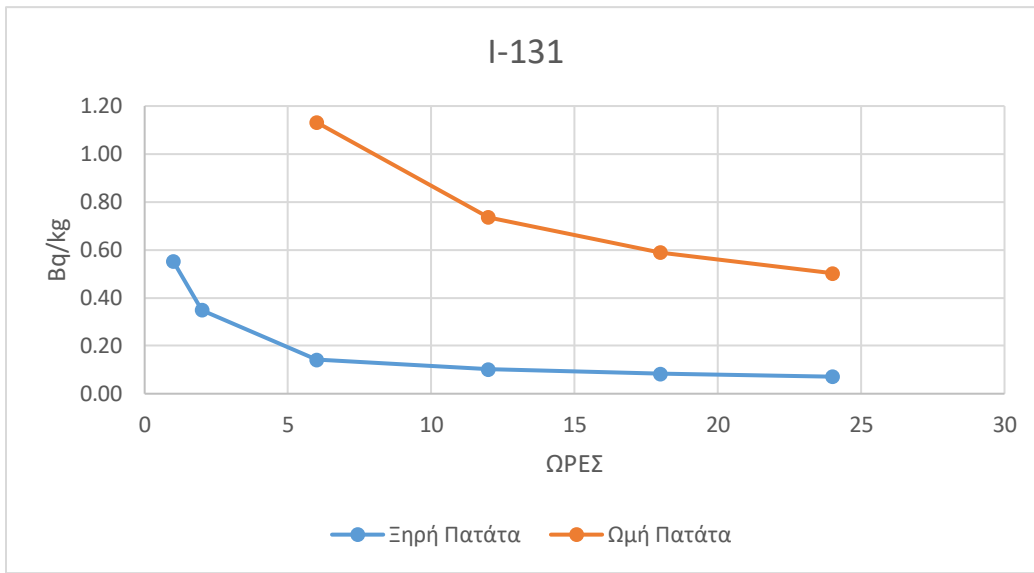
**Διάγραμμα 34: MDA I-131, μήλο.**



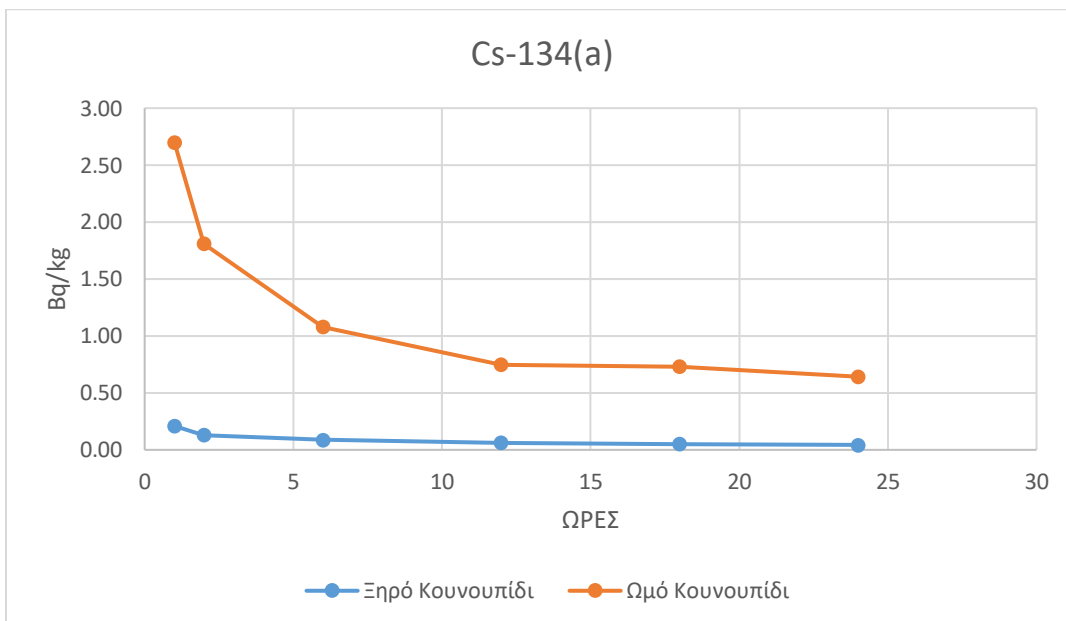
**Διάγραμμα 35: MDA Cs-134(a), πατάτα.**



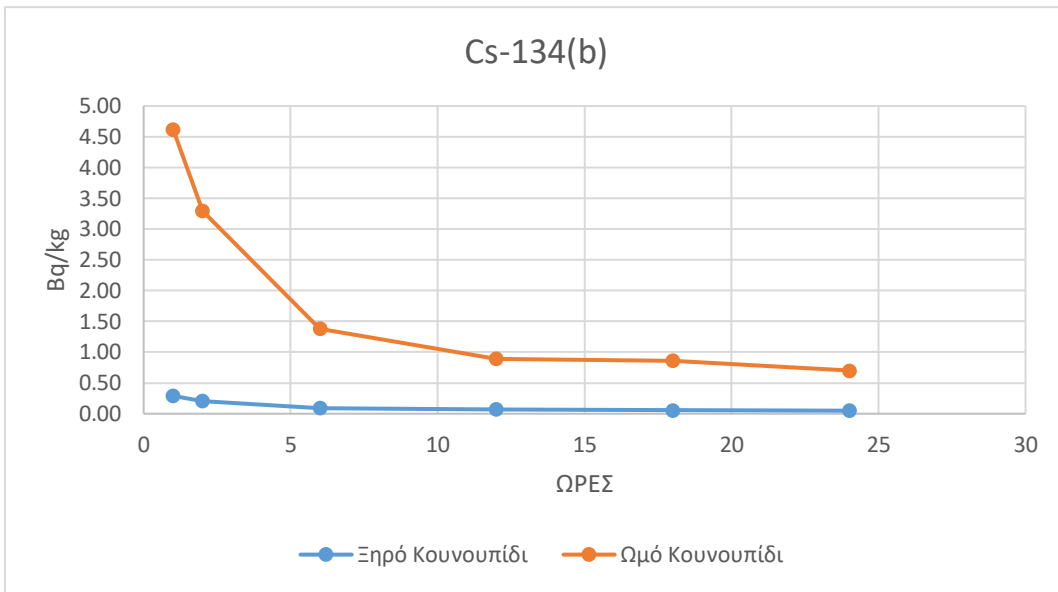
**Διάγραμμα 36: MDA Cs-134(b), πατάτα.**



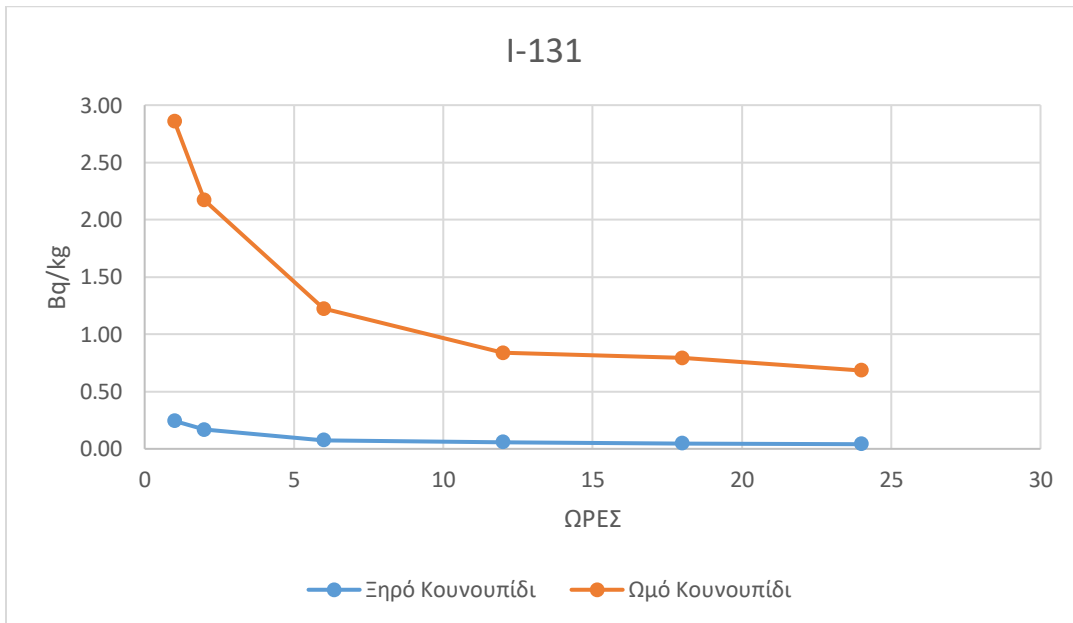
**Διάγραμμα 37: MDA I-131, πατάτα.**



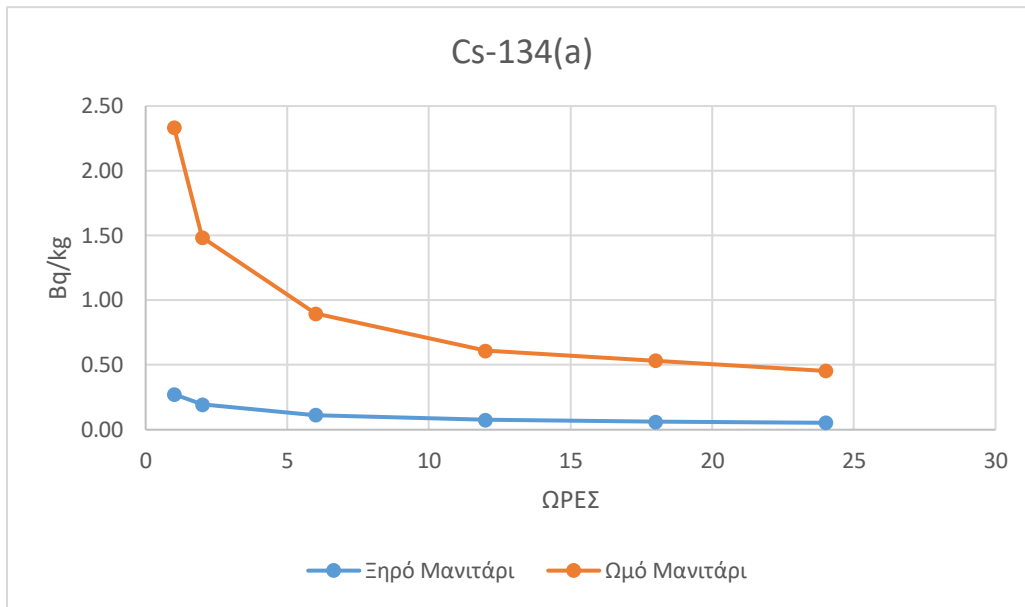
**Διάγραμμα 38: MDA Cs-134(a), κουνουπίδι.**



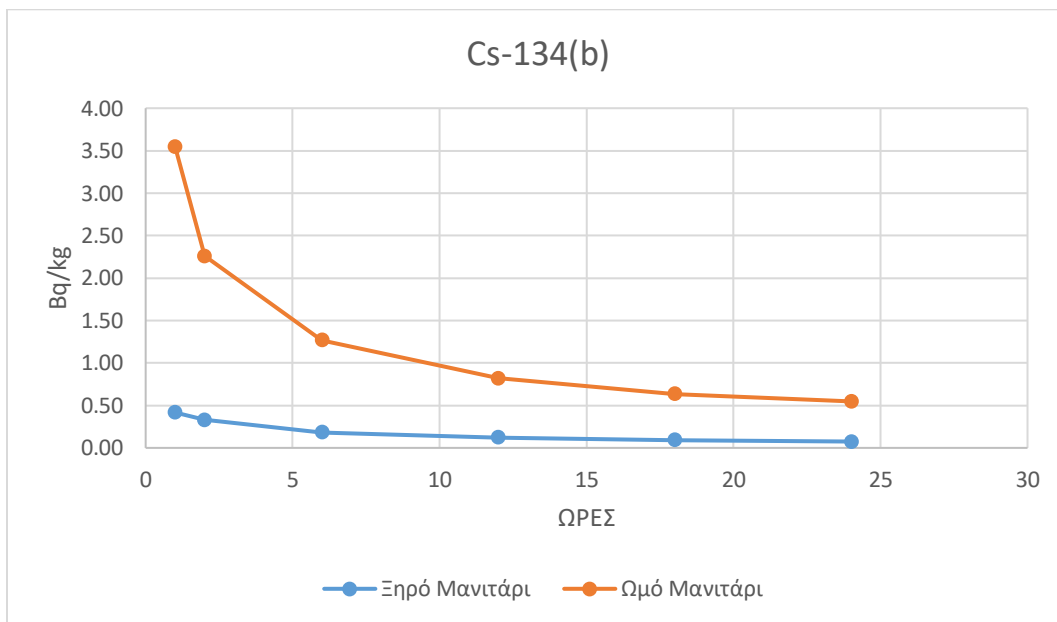
**Διάγραμμα 39: MDA Cs-134(b), κουνουπίδι.**



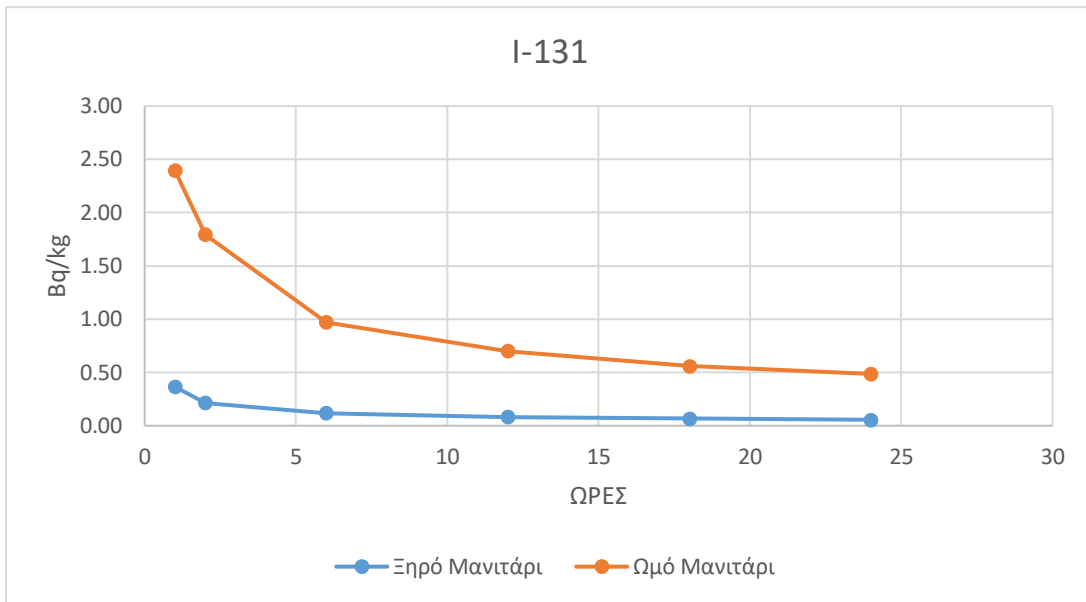
**Διάγραμμα 40: MDA I-131, κουνουπίδι.**



**Διάγραμμα 41: MDA Cs-134(a), μανιτάρι.**

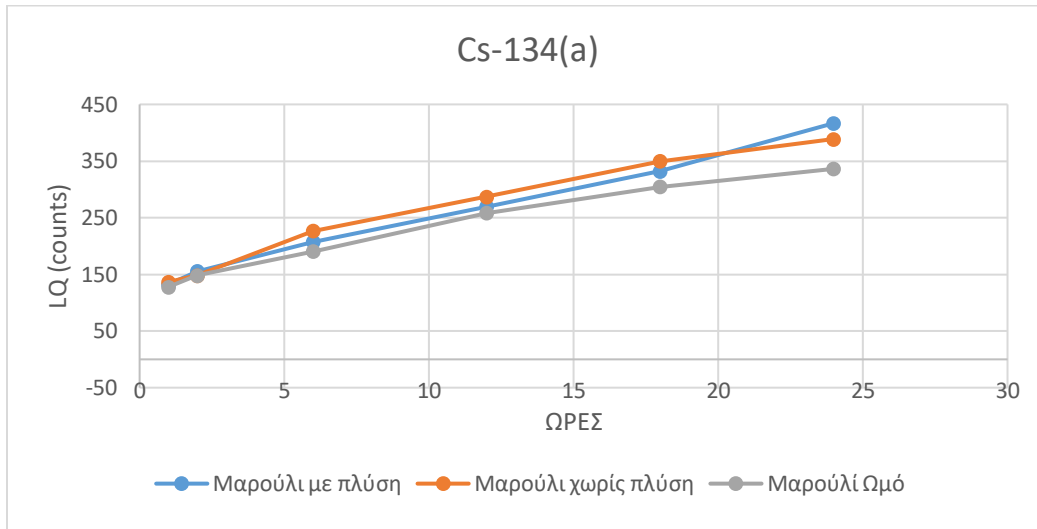


**Διάγραμμα 42: MDA Cs-134(b), μανιτάρι.**

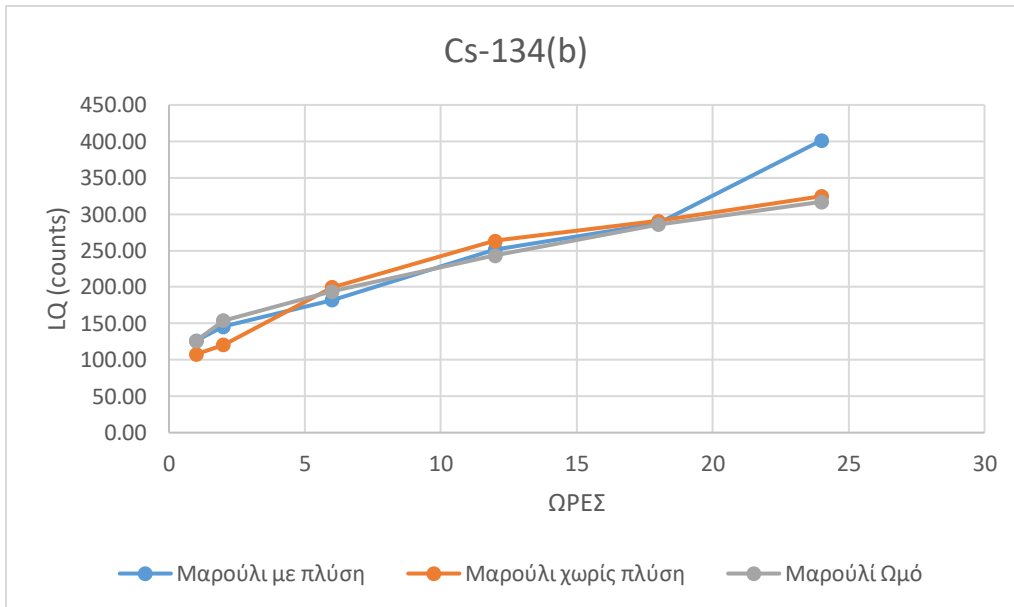


**Διάγραμμα 43: MDA I-131, μανιτάρι.**

7.1.2 Παράρτημα II – Διαγράμματα Determination Limit, Τρόφιμα

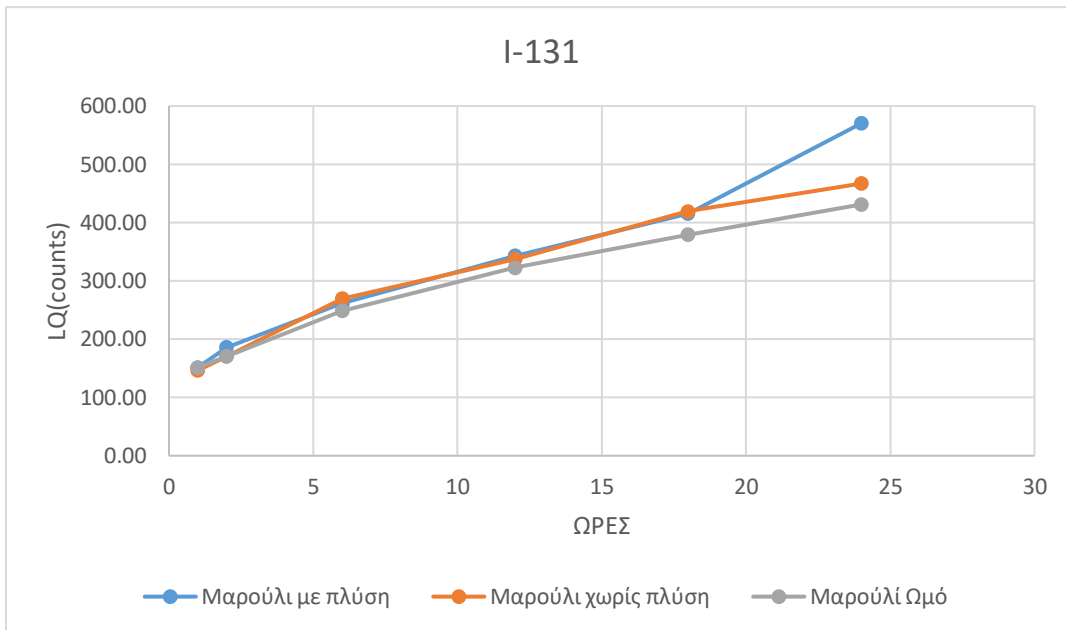


Διάγραμμα 44: LQ – Cs-134(a), μαρούλι.

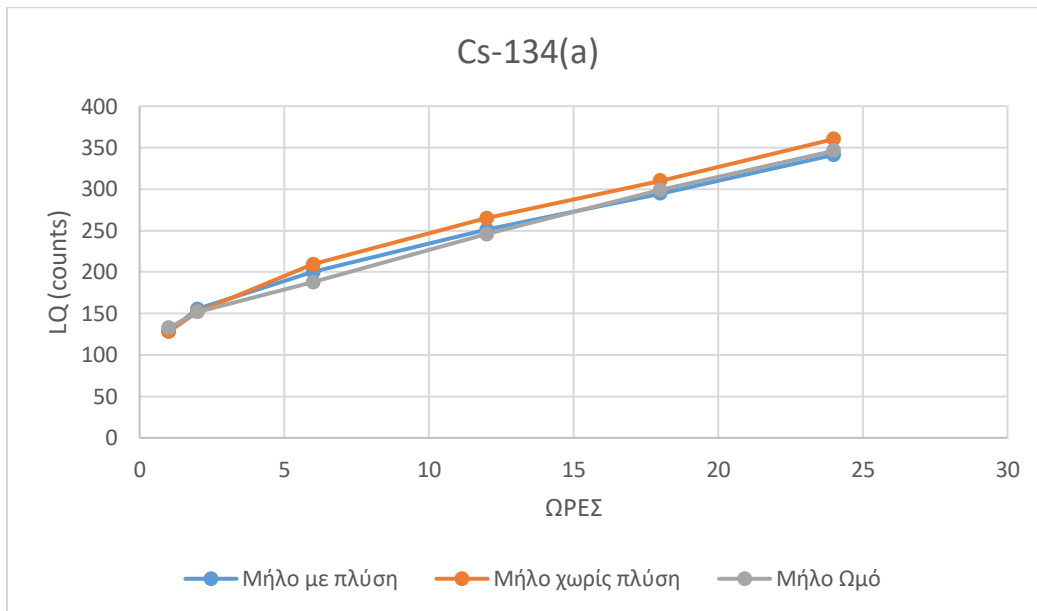


Διάγραμμα 45: LQ Cs-134(b), μαρούλι.



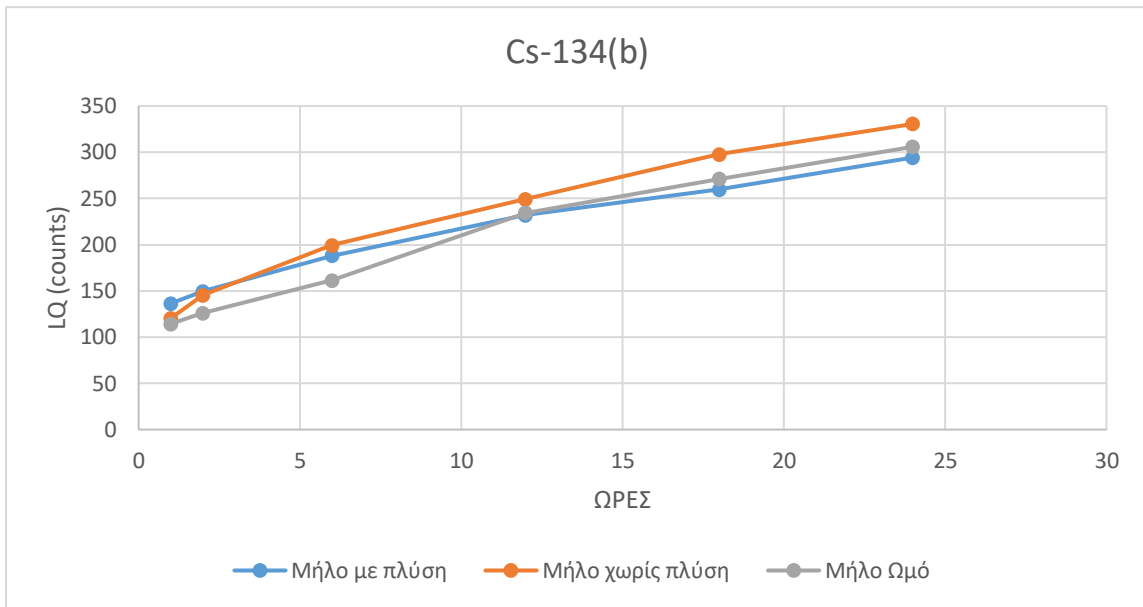


Διάγραμμα 46: LQ I-131, μαρούλι.

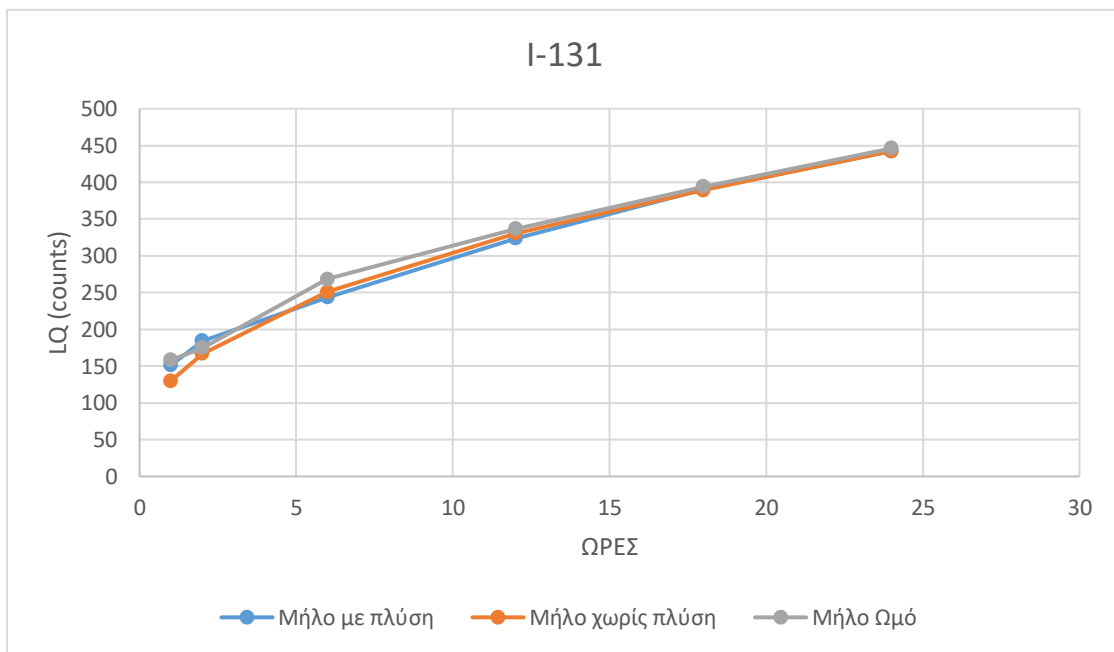


Διάγραμμα 47: LQ Cs-134(a), μήλο.

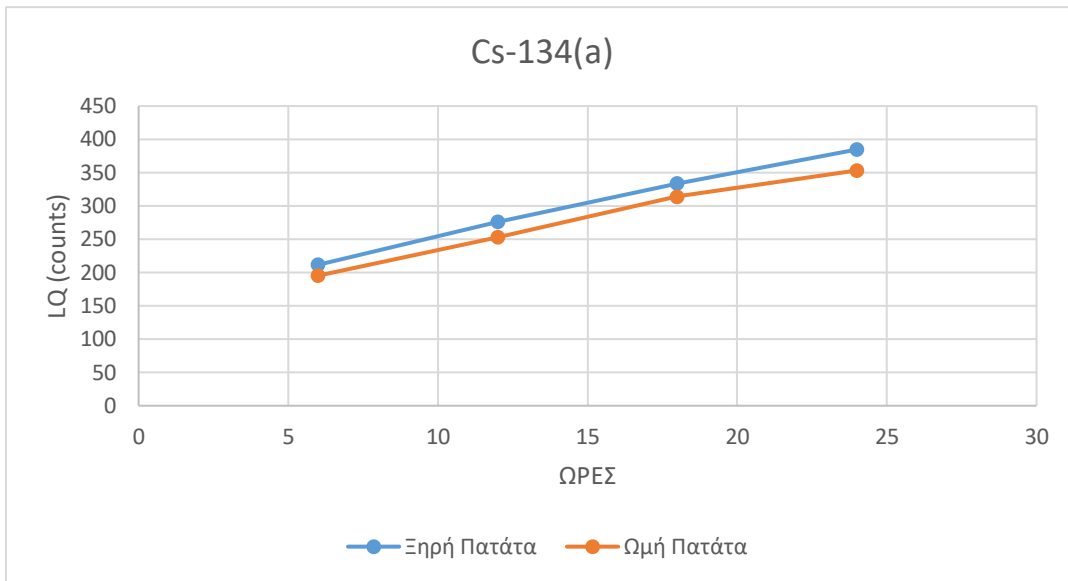




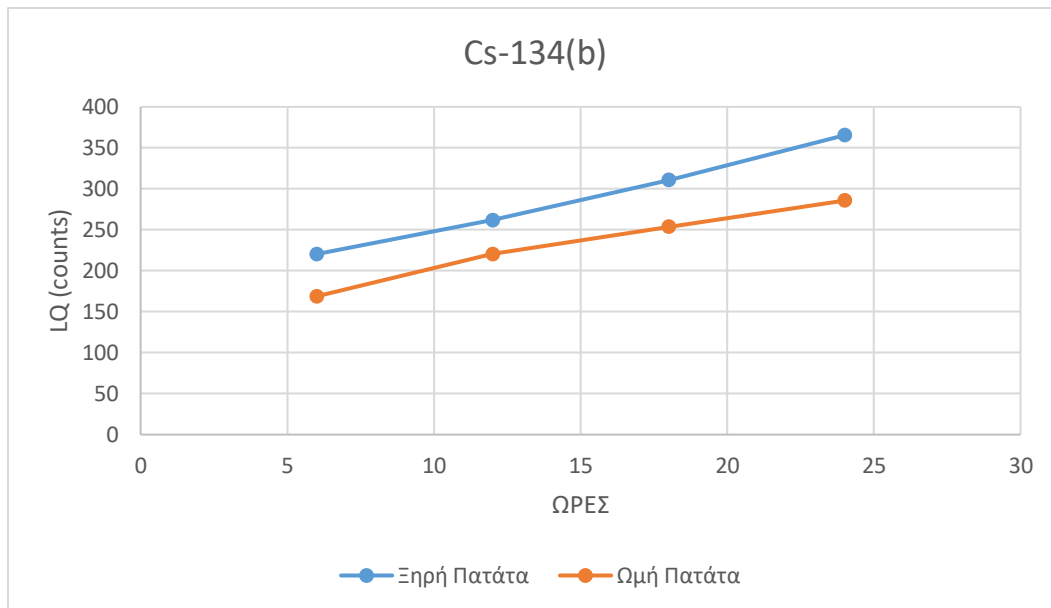
**Διάγραμμα 48: LQ Cs-134(b), μήλο.**



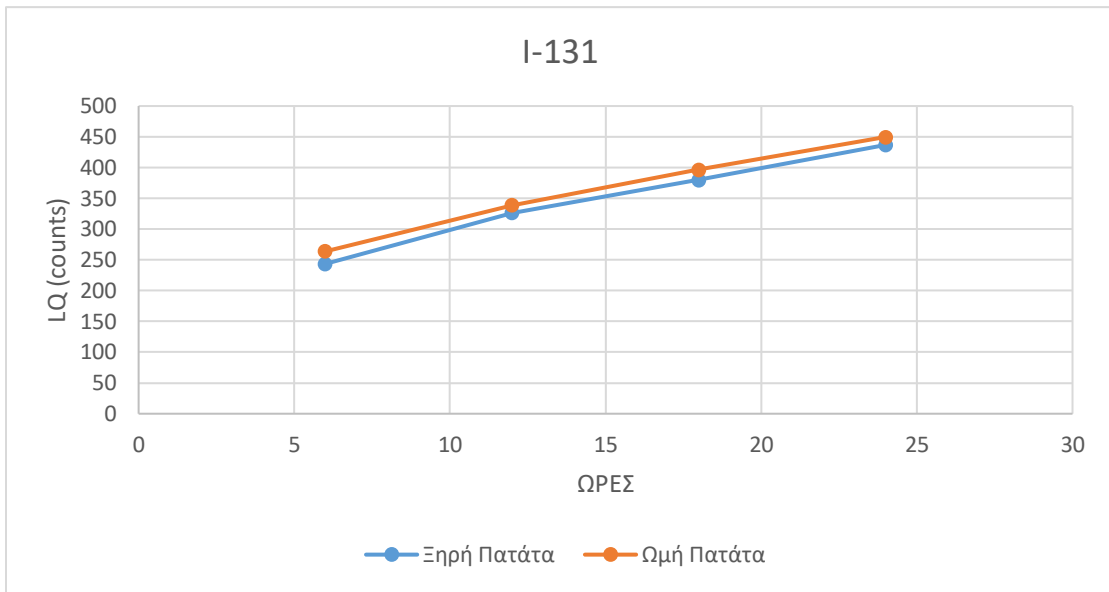
**Διάγραμμα 49: LQ I-131, μήλο.**



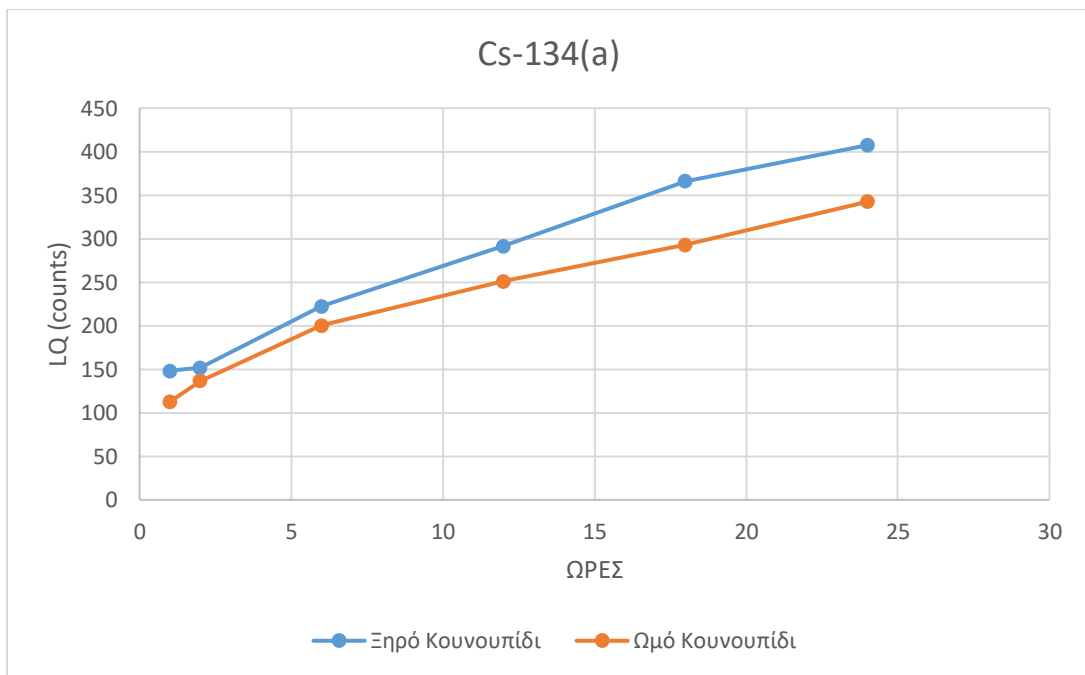
**Διάγραμμα 50: LQ - Cs-134(a), πατάτα.**



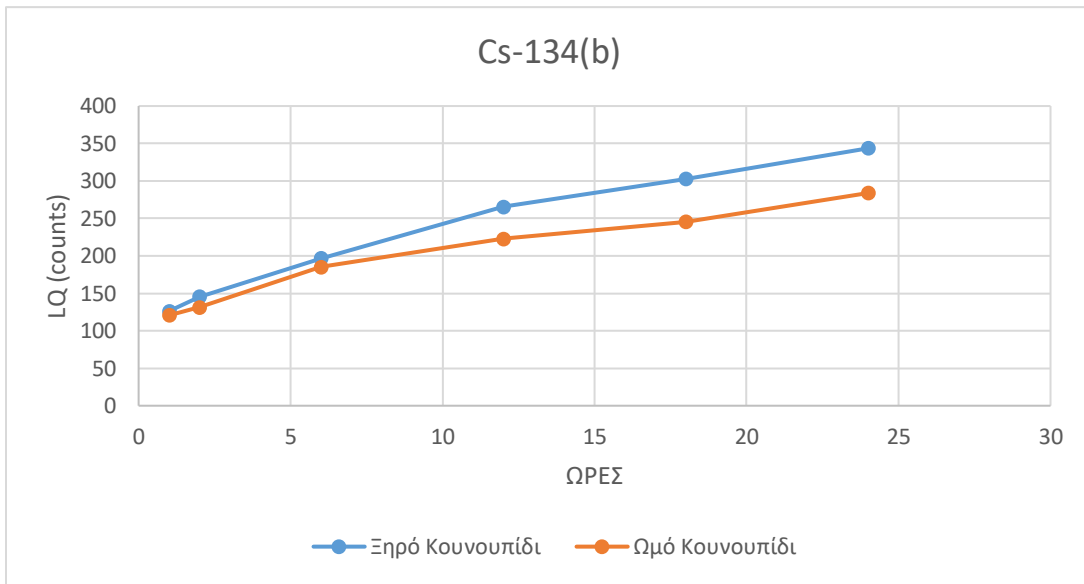
**Διάγραμμα 51: LQ Cs-134(b), πατάτα.**



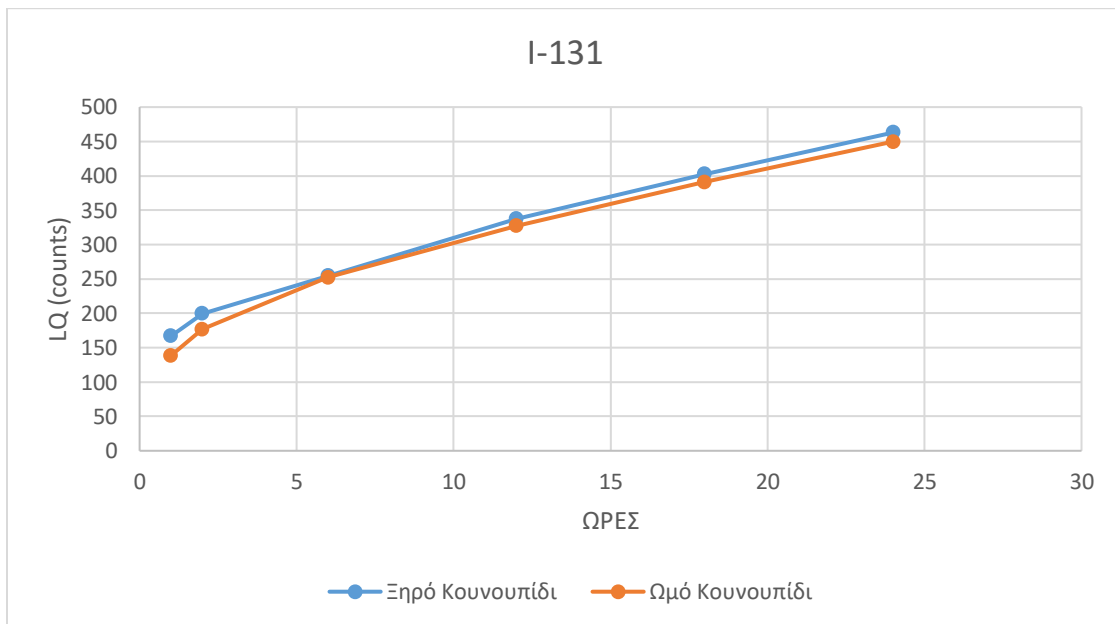
**Διάγραμμα 52: LQ I-131, πατάτα.**



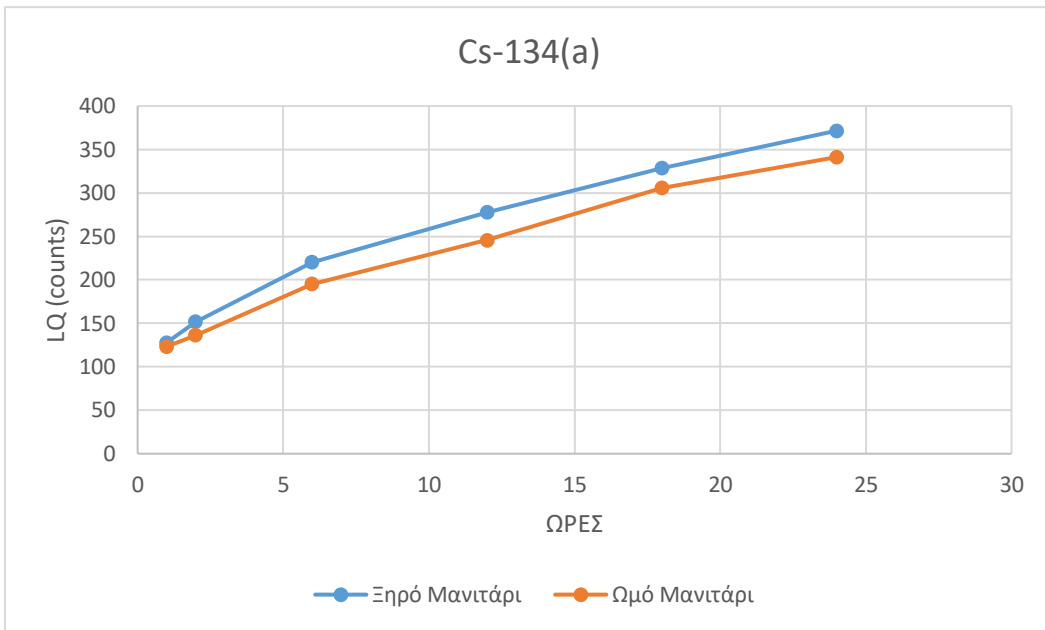
**Διάγραμμα 53: LQ Cs-134(a), κουνουπίδι.**



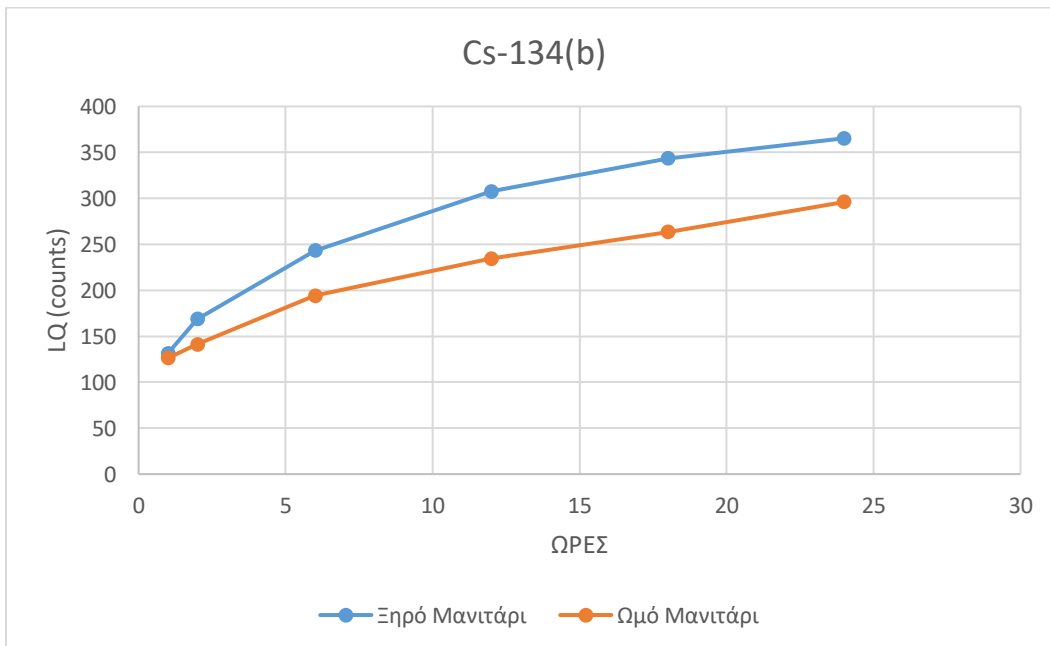
**Διάγραμμα 54: LQ Cs-134(b), κουνουπίδι.**



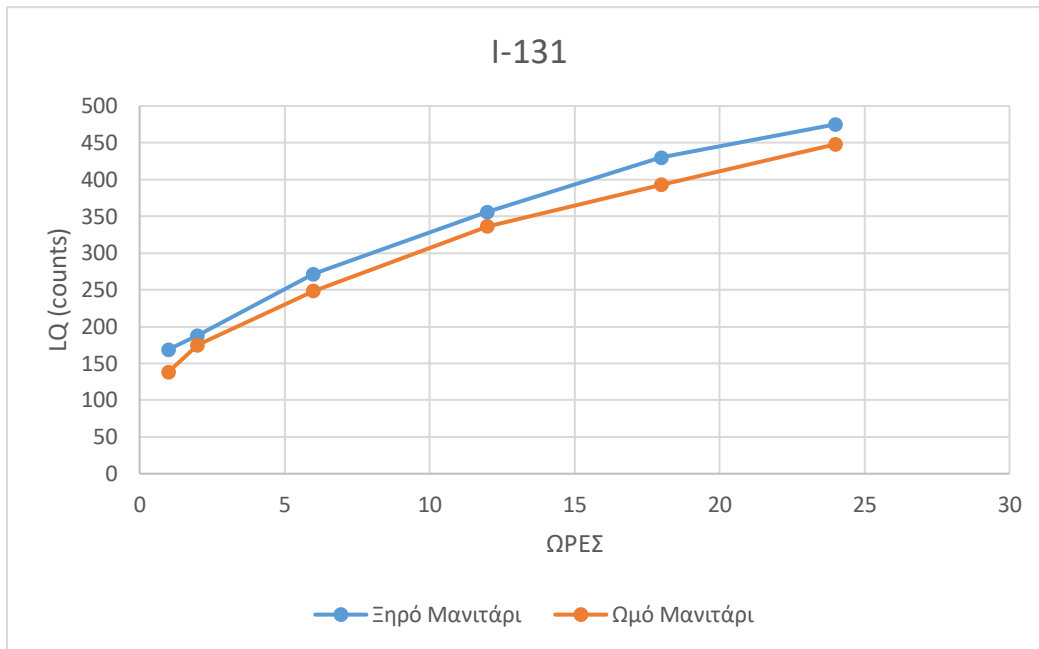
**Διάγραμμα 55: LQ I-131, κουνουπίδι.**



Διάγραμμα 56: LQ Cs-134(a), μανιτάρι.



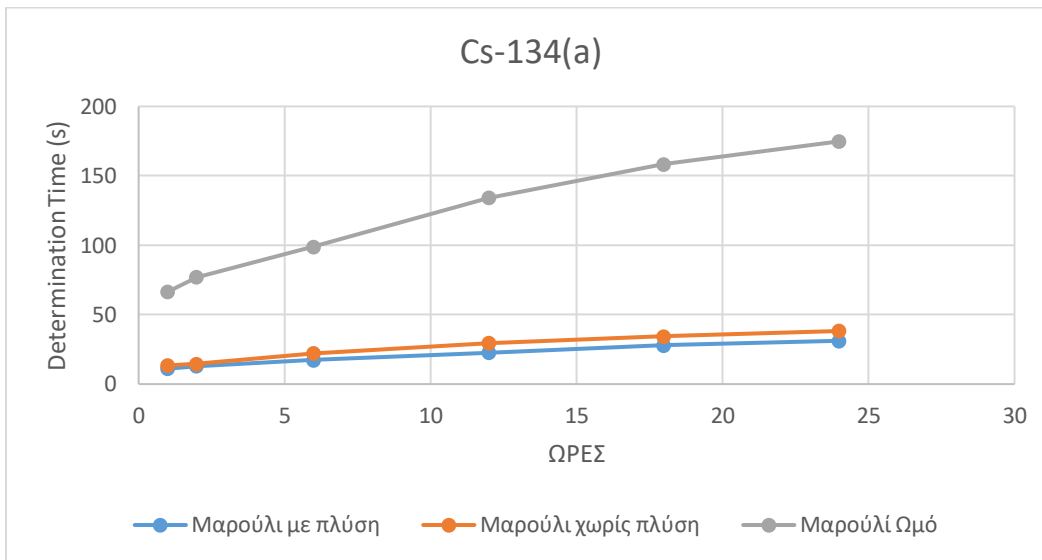
Διάγραμμα 57: LQ Cs-134(b), μανιτάρι.



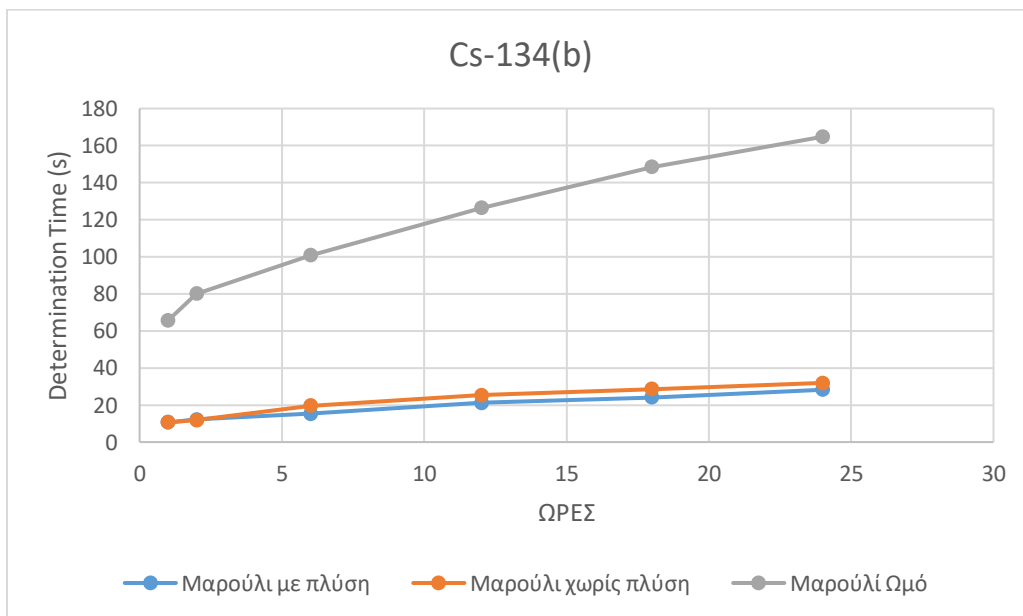
**Διάγραμμα 58: LQ I-131, μανιτάρι.**



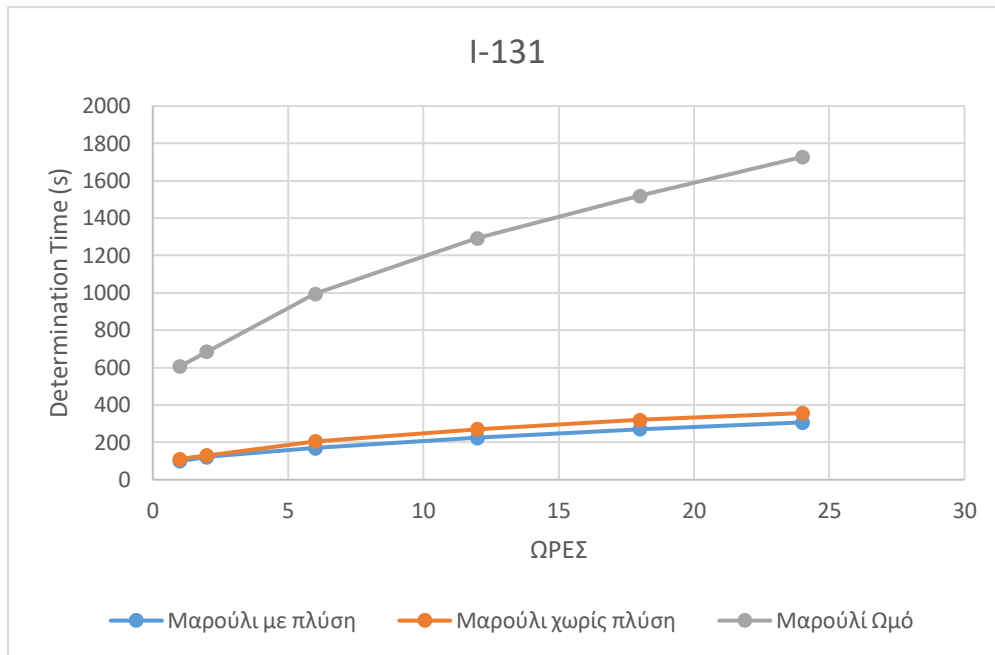
7.1.3 Παράρτημα III – Διαγράμματα Determination Time, Τρόφιμα



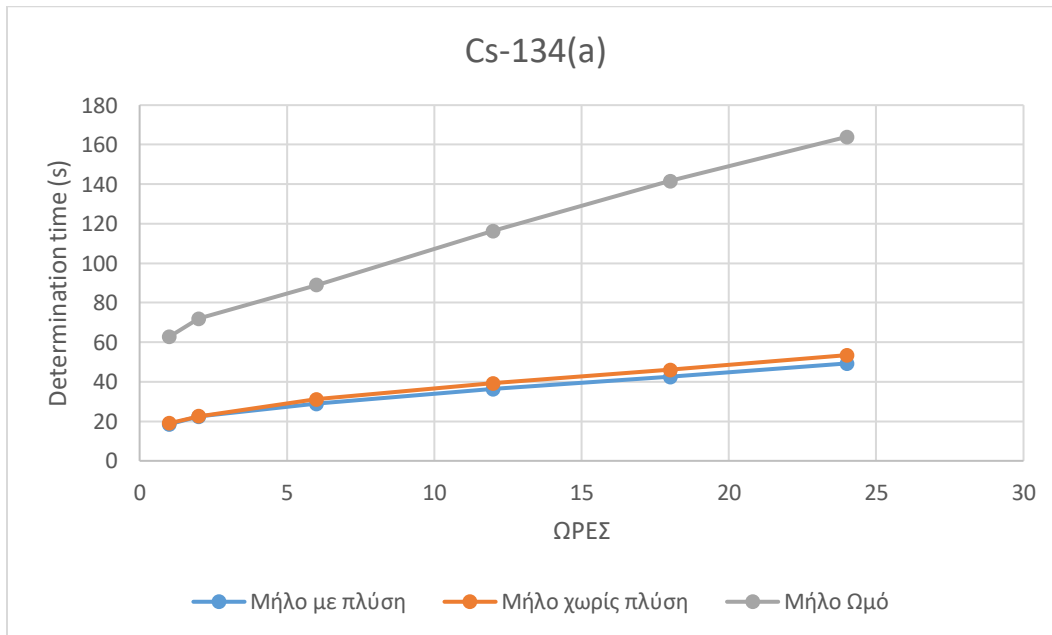
Διάγραμμα 59: Determination Time Cs-134(a), μαρούλι.



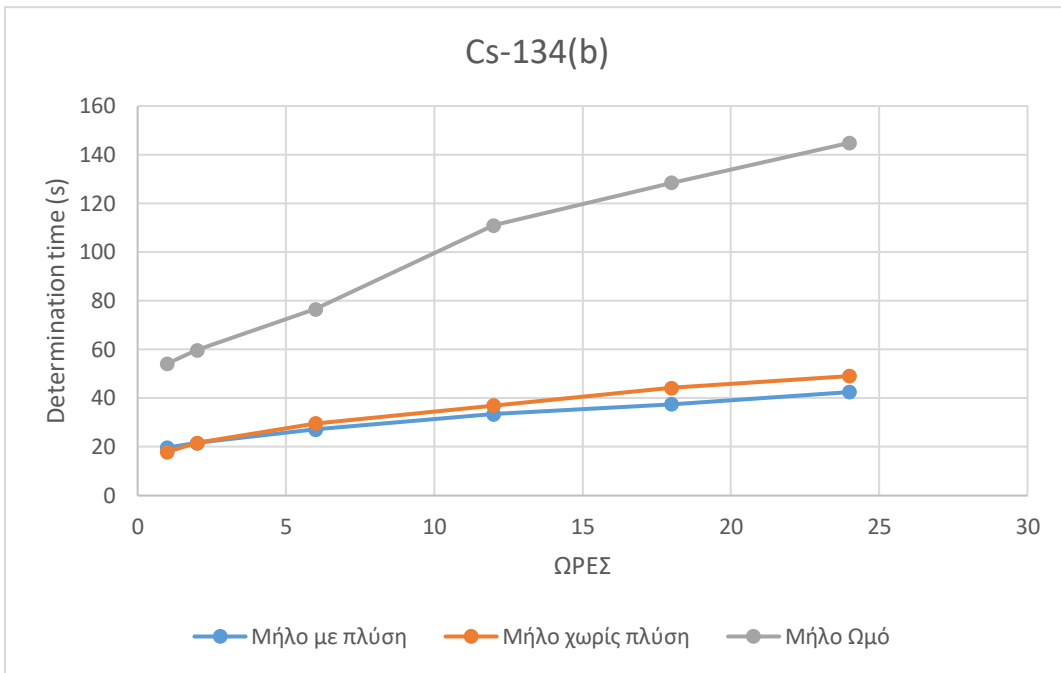
Διάγραμμα 60: Determination Time Cs-134(b), μαρούλι.



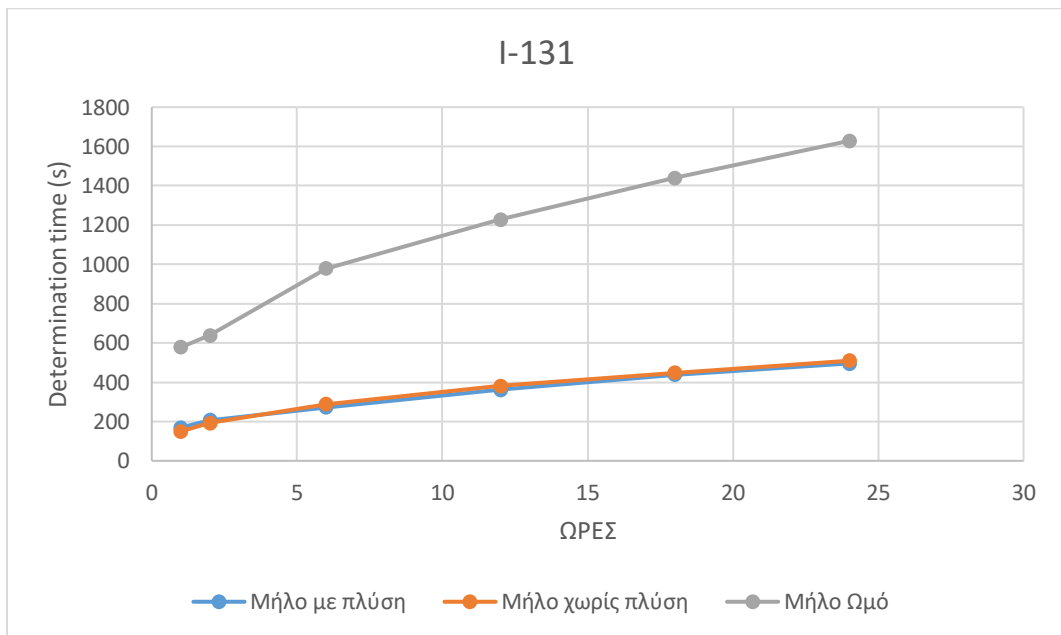
**Διάγραμμα 61: Determination Time I-131, μαρούλι.**



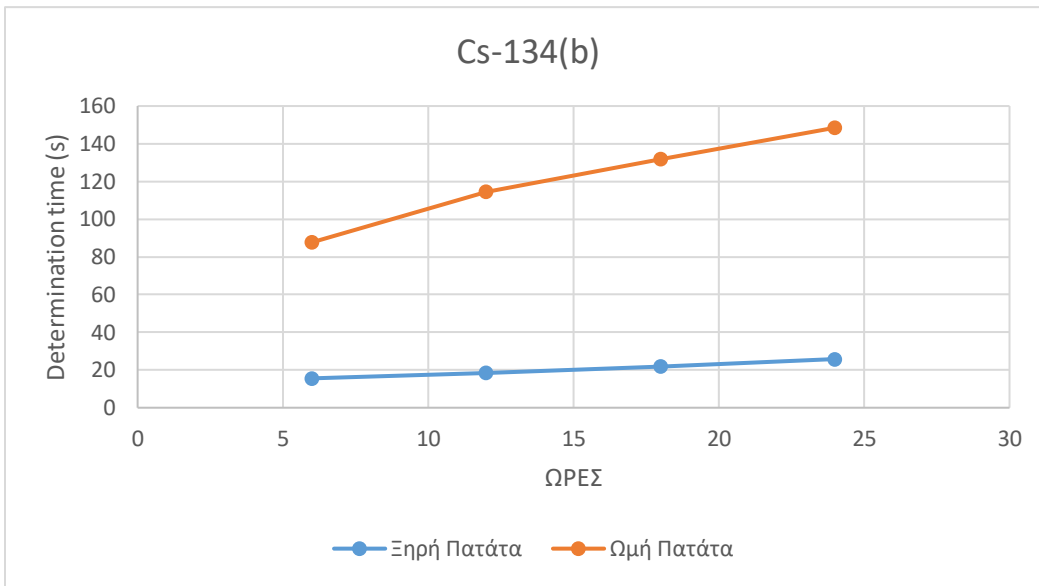
**Διάγραμμα 62: Determination Time Cs-134(a), μήλο.**



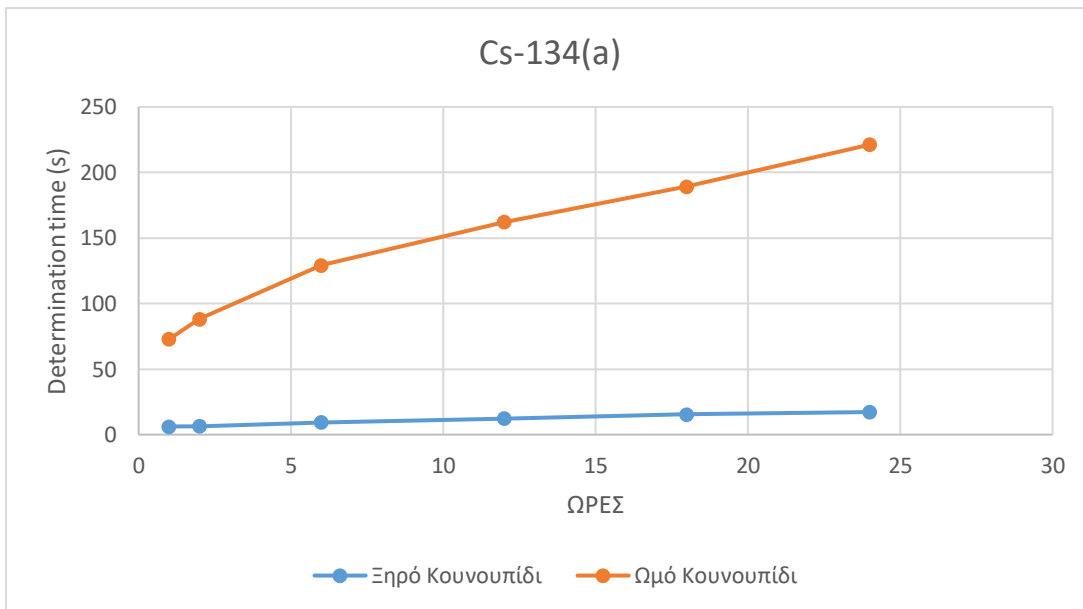
**Διάγραμμα 63: Determination Time Cs-134(b), μήλο.**



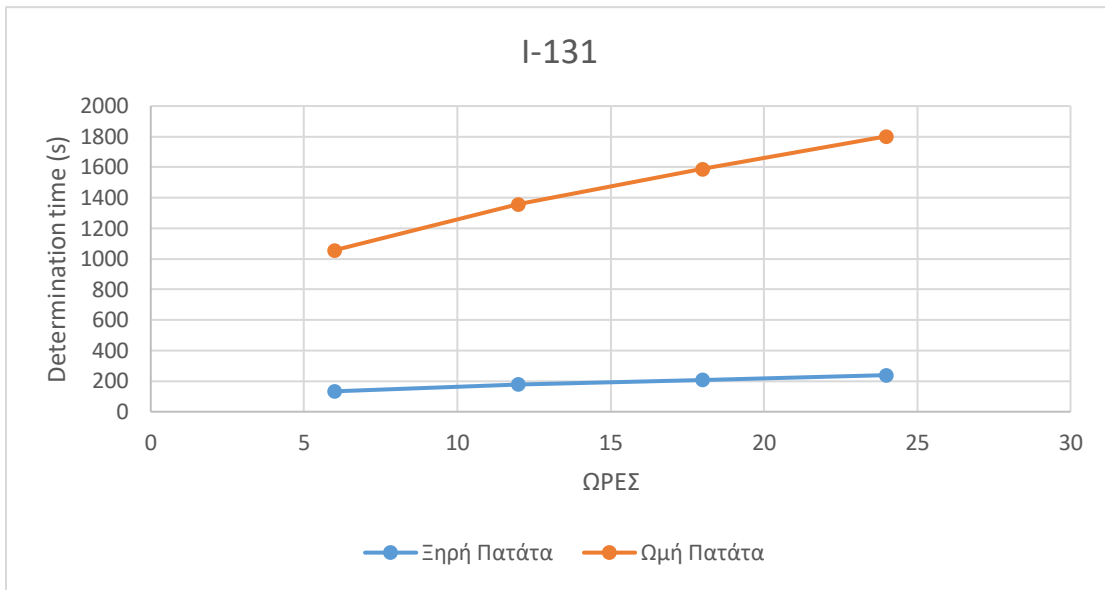
**Διάγραμμα 64: Determination Time I-131, μαρούλι.**



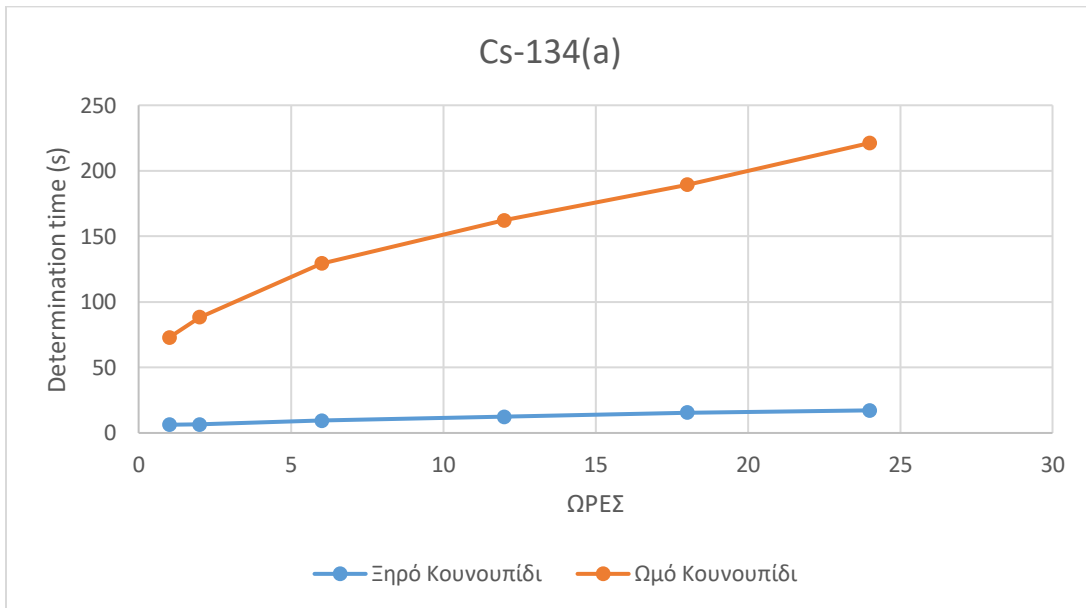
**Διάγραμμα 65: Determination Time Cs-134(b), πατάτα.**



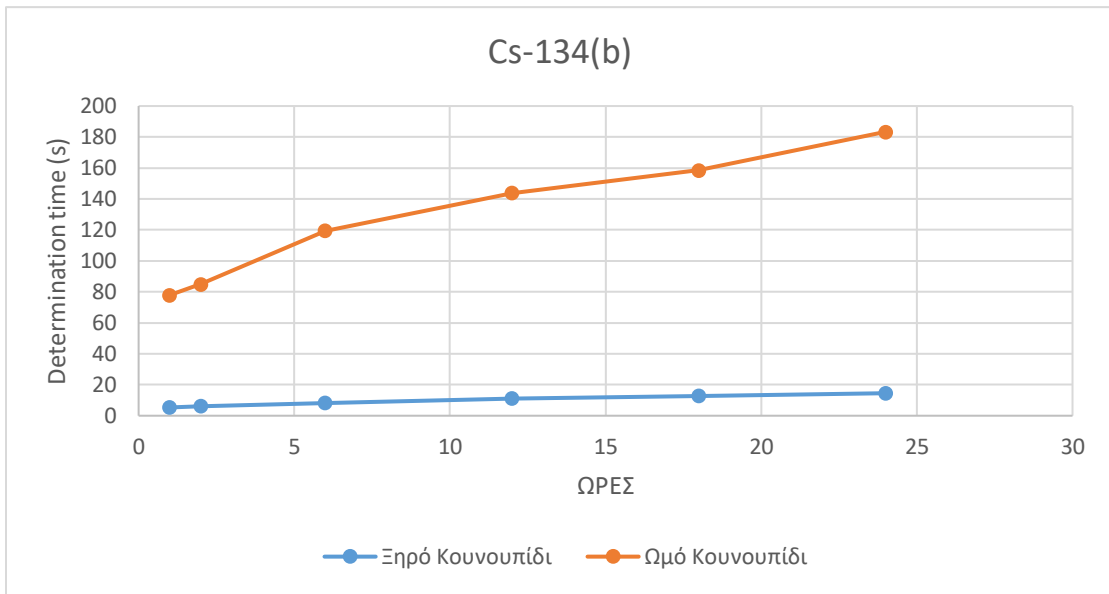
**Διάγραμμα 66: Determination Time Cs-134(a), πατάτα.**



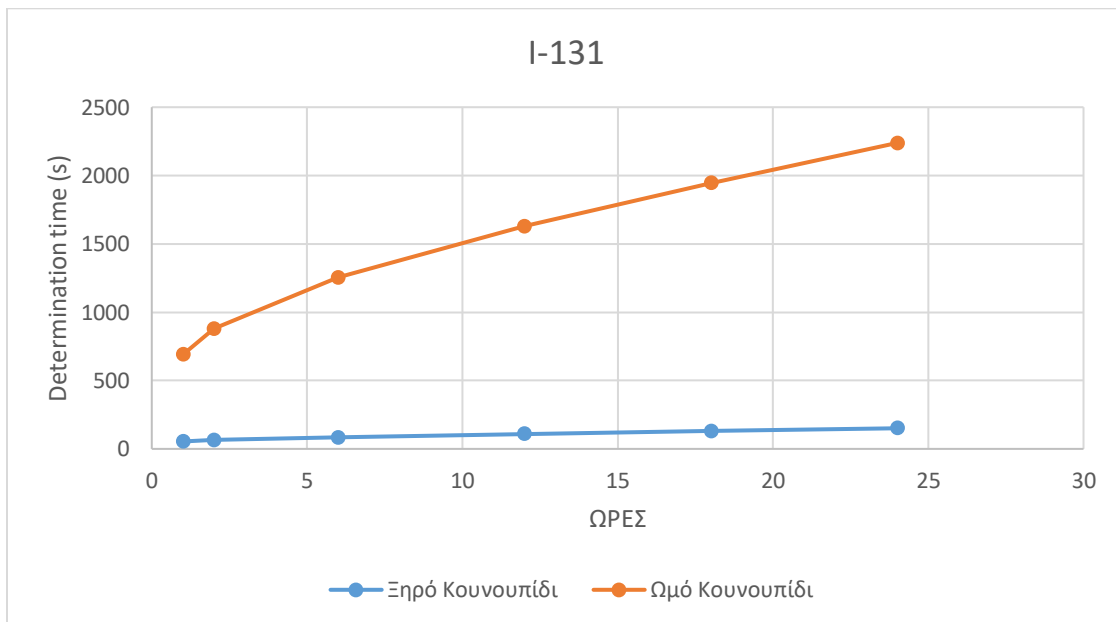
**Διάγραμμα 67: Determination Time I-131, πατάτα.**



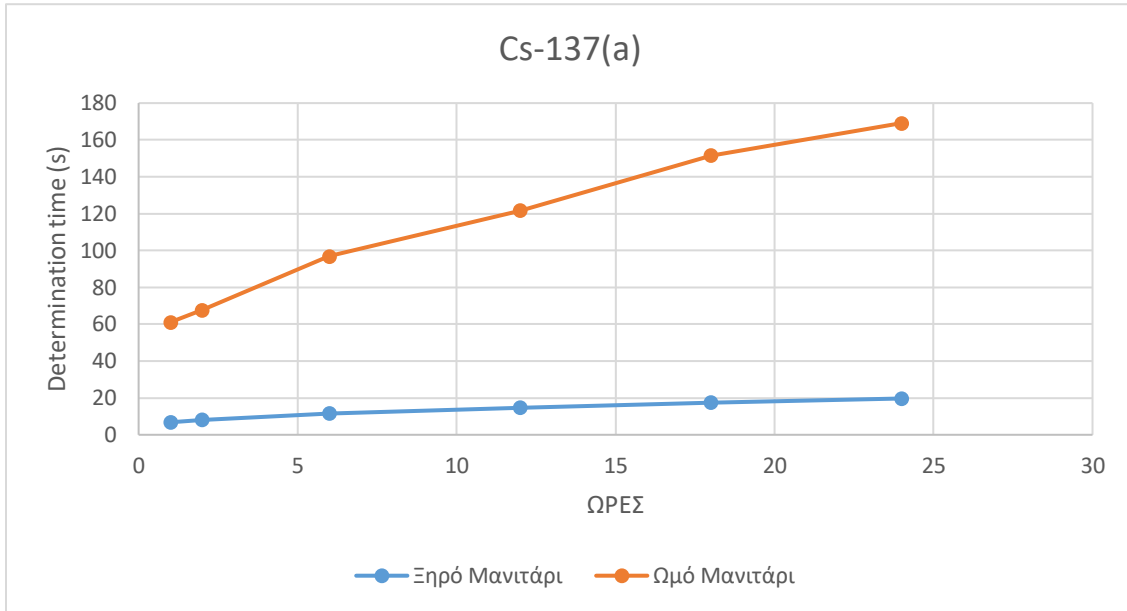
**Διάγραμμα 68: Determination Time Cs-134(a), κουνουπίδι.**



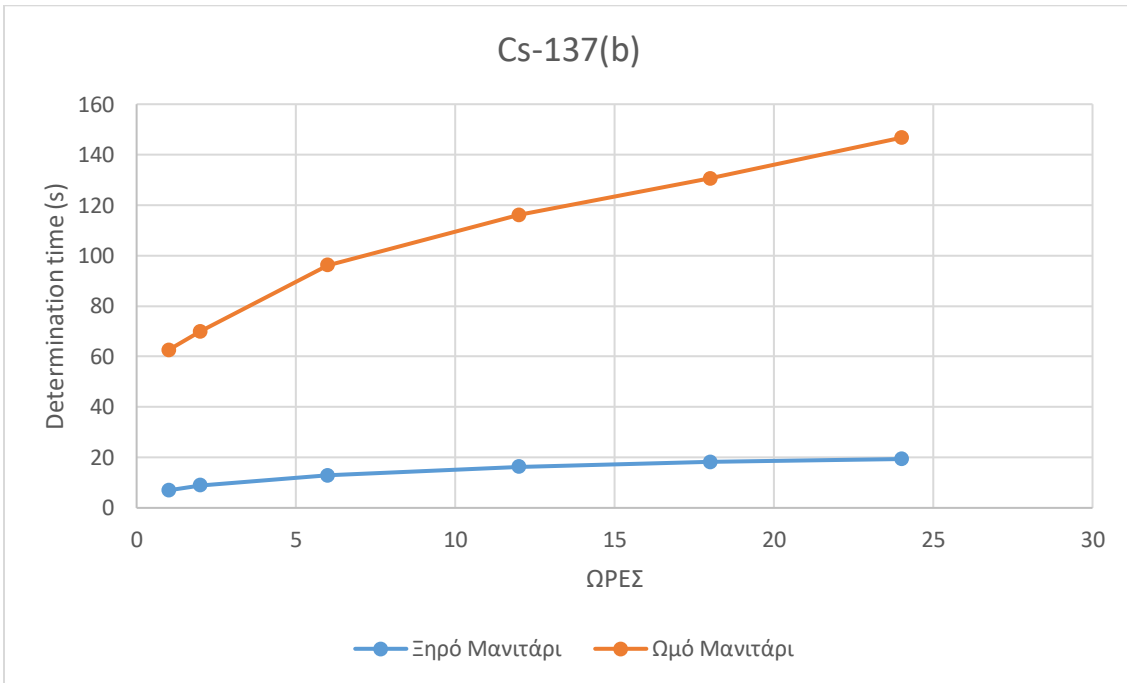
**Διάγραμμα 69: Determination Time Cs-134(b), κουνουπίδι.**



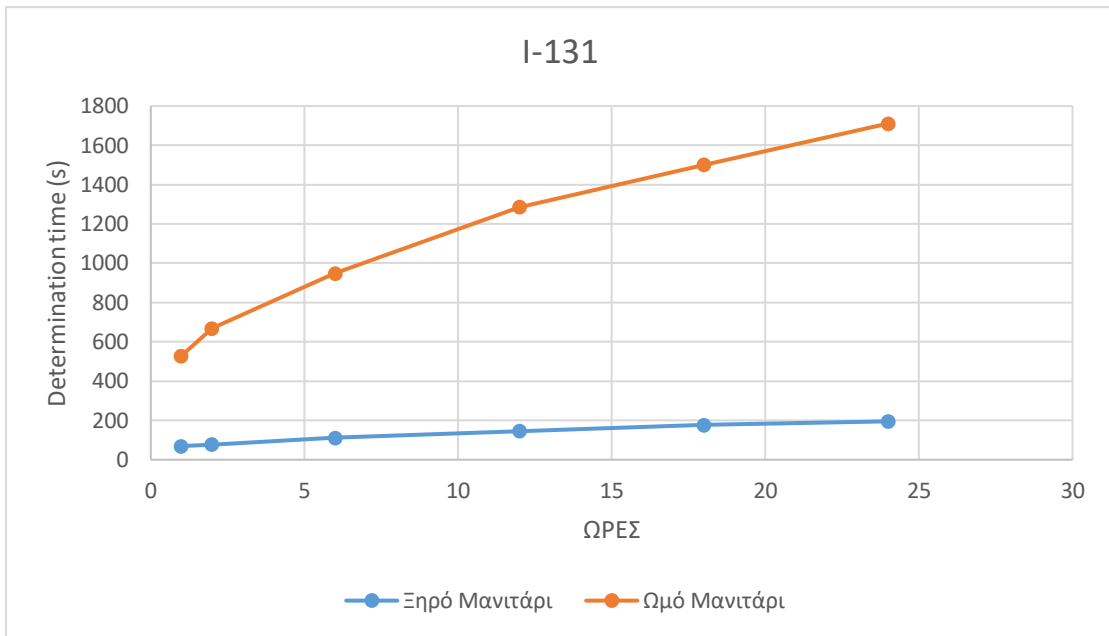
**Διάγραμμα 70: Determination Time I-131, κουνουπίδι.**



**Διάγραμμα 71: Determination Time Cs-134(a), μανιτάρι.**



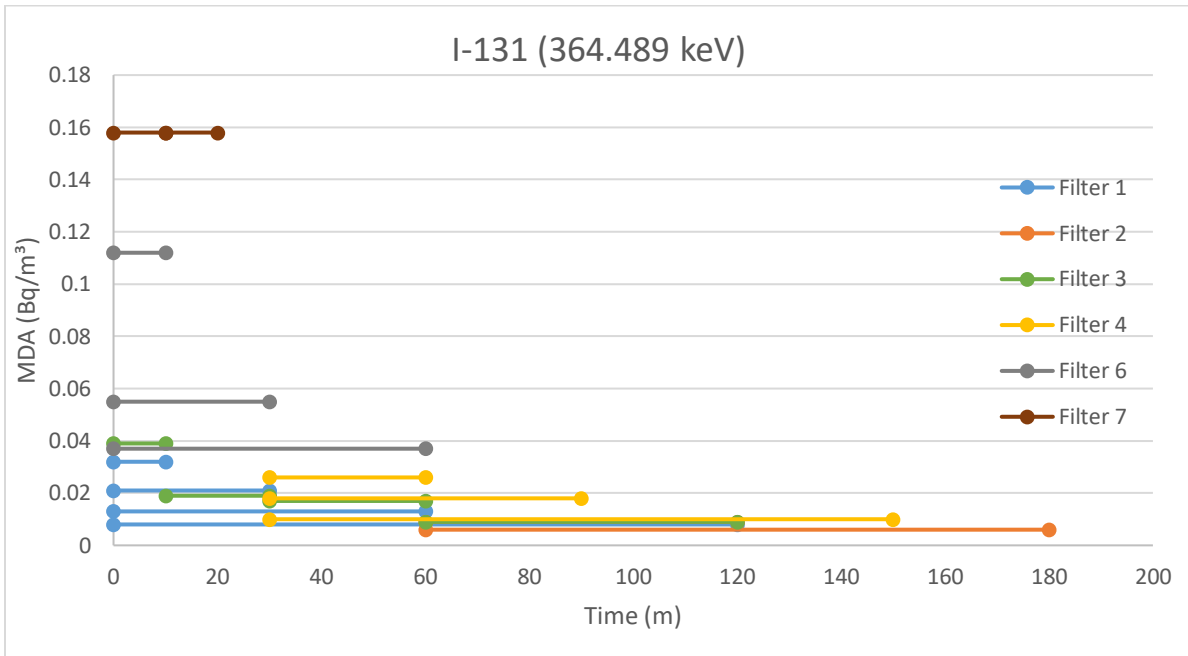
**Διάγραμμα 72: Determination Time Cs-134(b), μανιτάρι.**



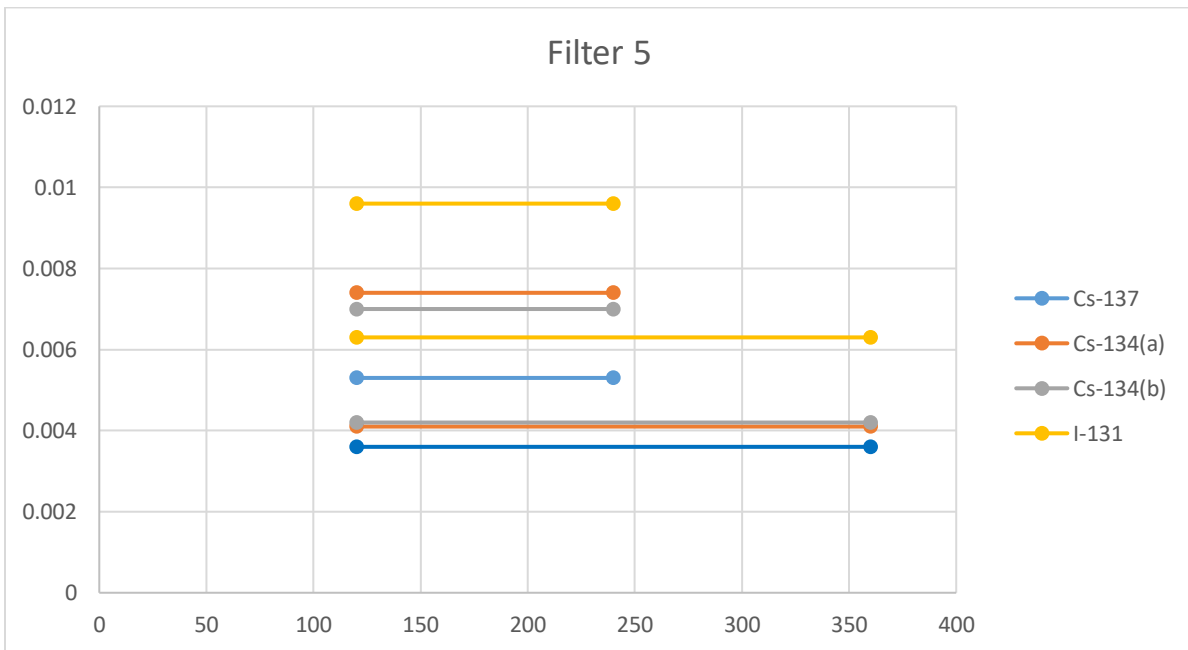
**Διάγραμμα 73: Determination Time I-131, μανιτάρι.**



7.1.1 Παράρτημα IV – Διαγράμματα MDA, Φίλτρα αέρα



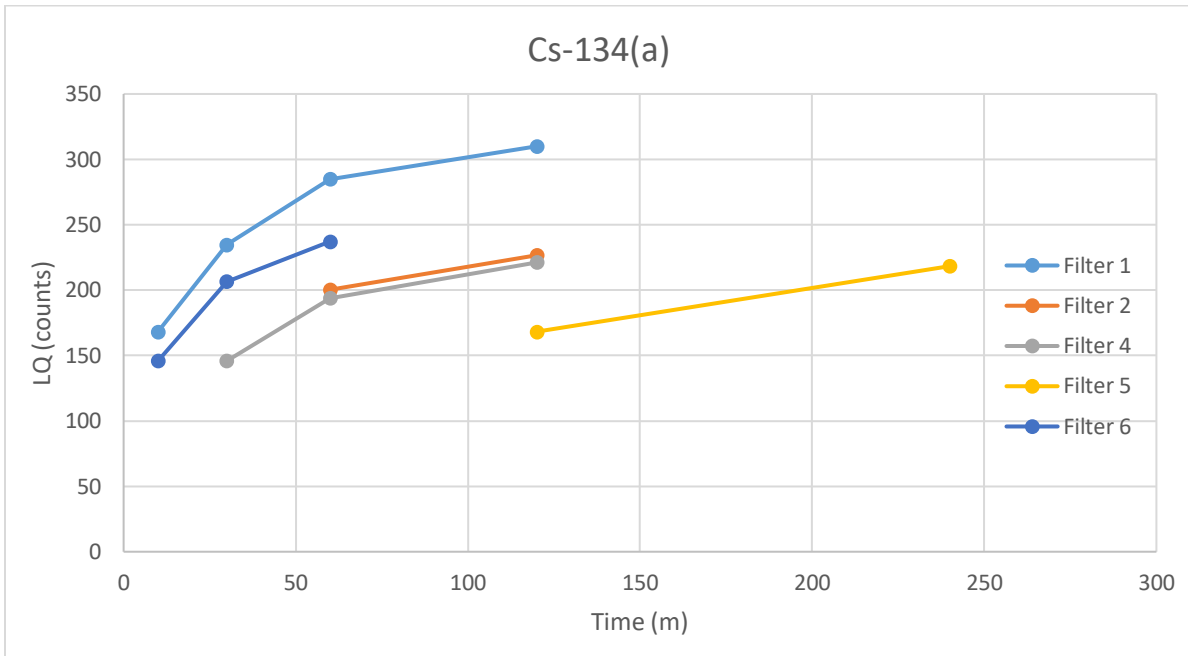
Διάγραμμα 74: MDA I-131, φίλτρα αέρα.



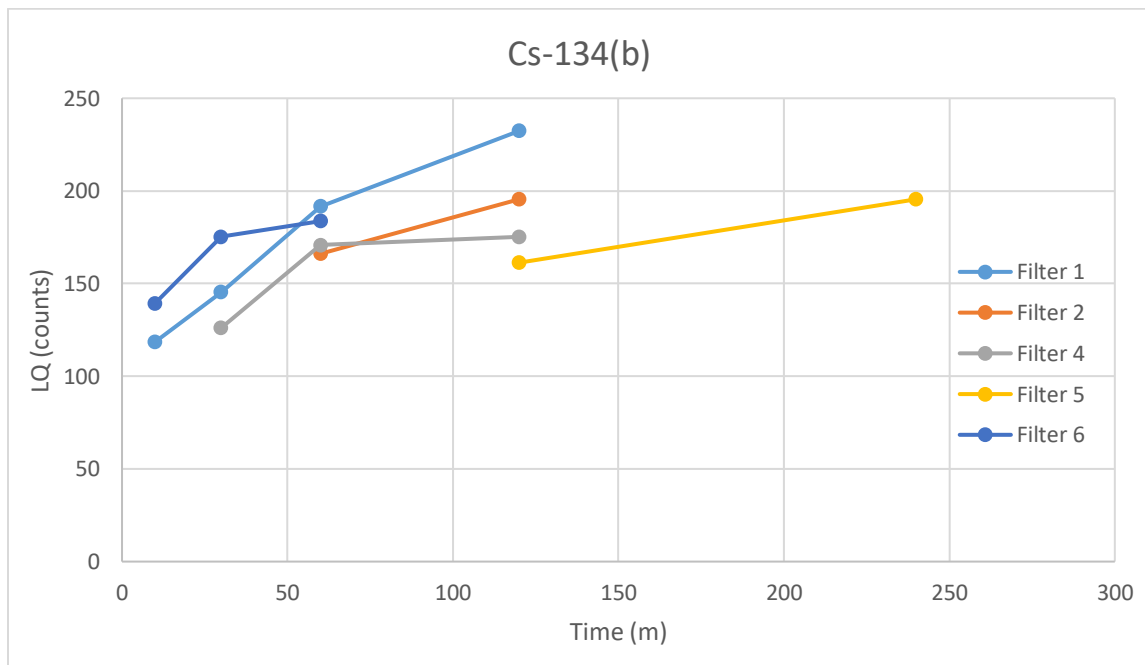
Διάγραμμα 75: MDA ραδιοϊσοτόπων, φίλτρο 5.



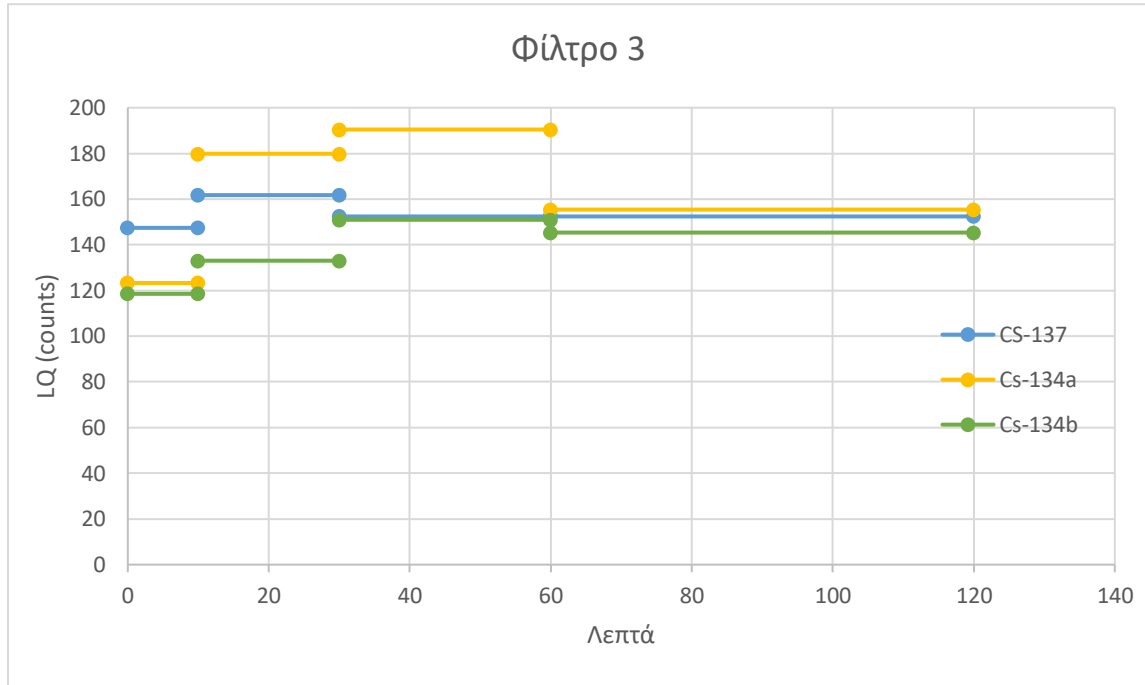
7.1.2 Παράρτημα V – Διαγράμματα Determination Limit, Φίλτρα αέρα



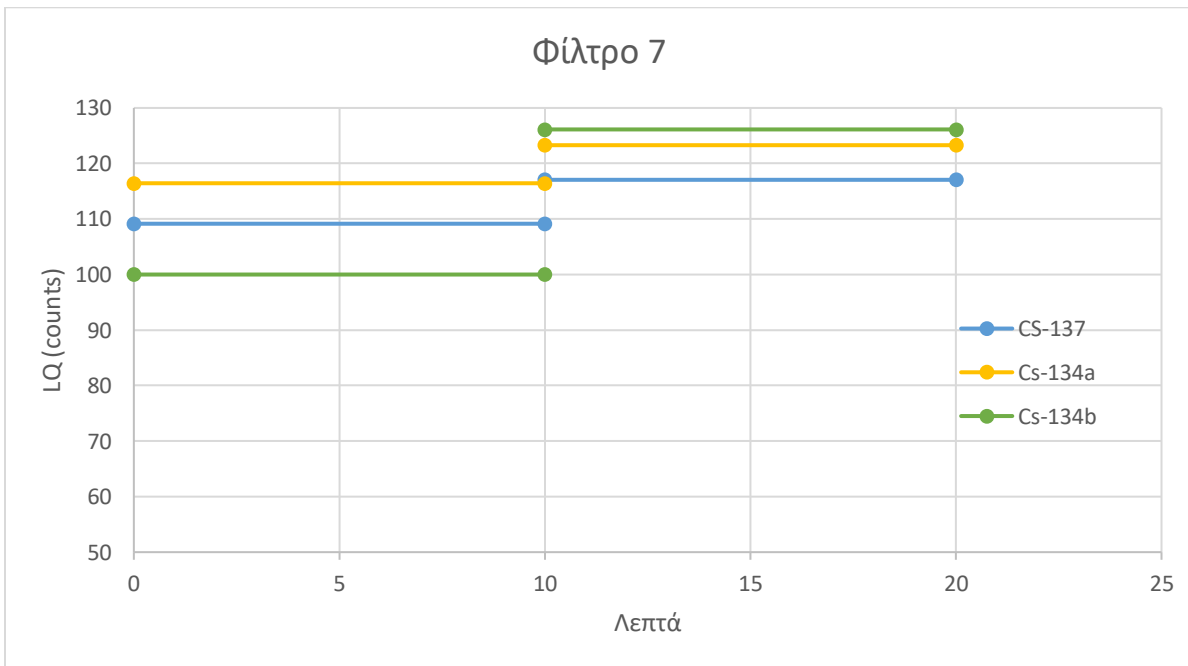
Διάγραμμα 76: LQ – Cs134(a), φίλτρα αέρα.



Διάγραμμα 77: LQ – Cs-134(b), φίλτρα αέρα.

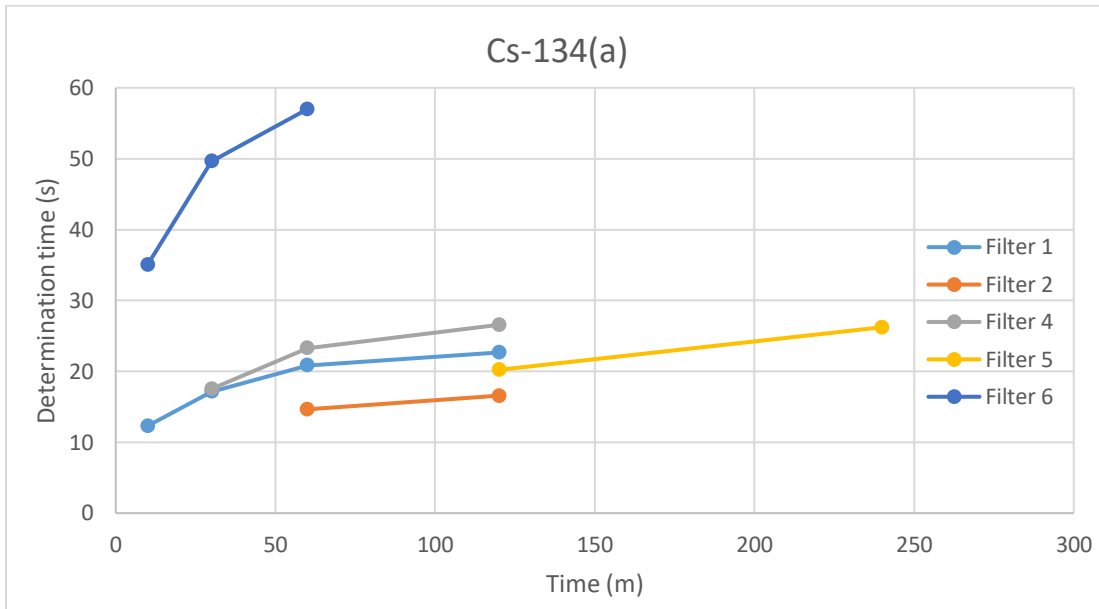


**Διάγραμμα 78: LQ ραδιοϊσοτόπων, φίλτρο 3.**

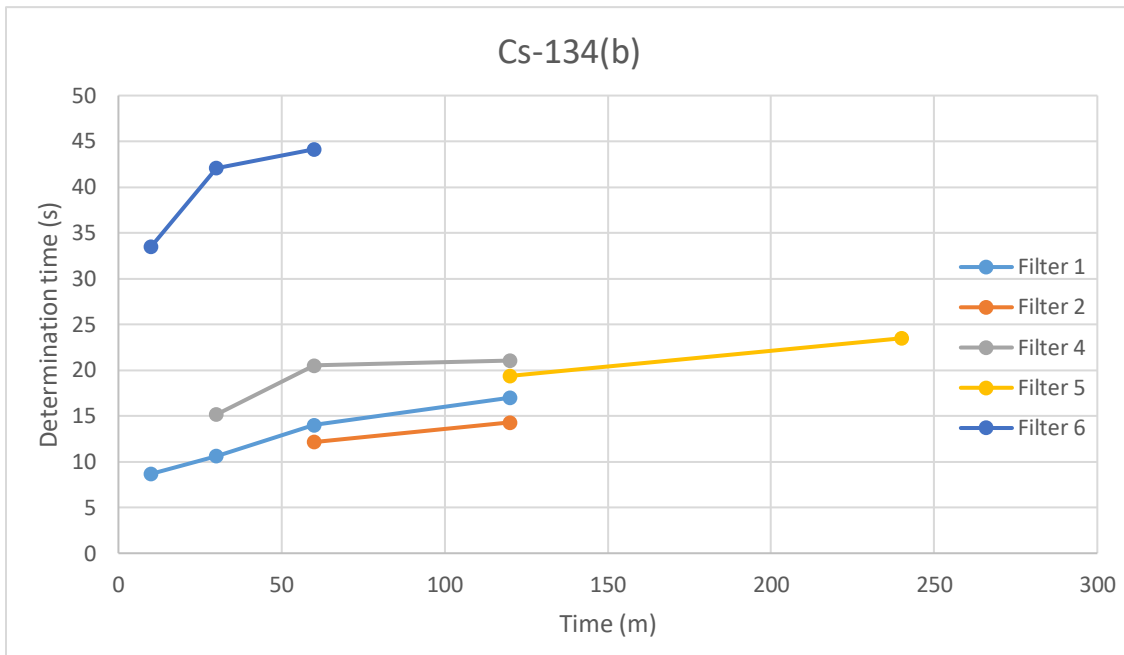


**Διάγραμμα 79: LQ ραδιοϊσοτόπων, φίλτρο 7.**

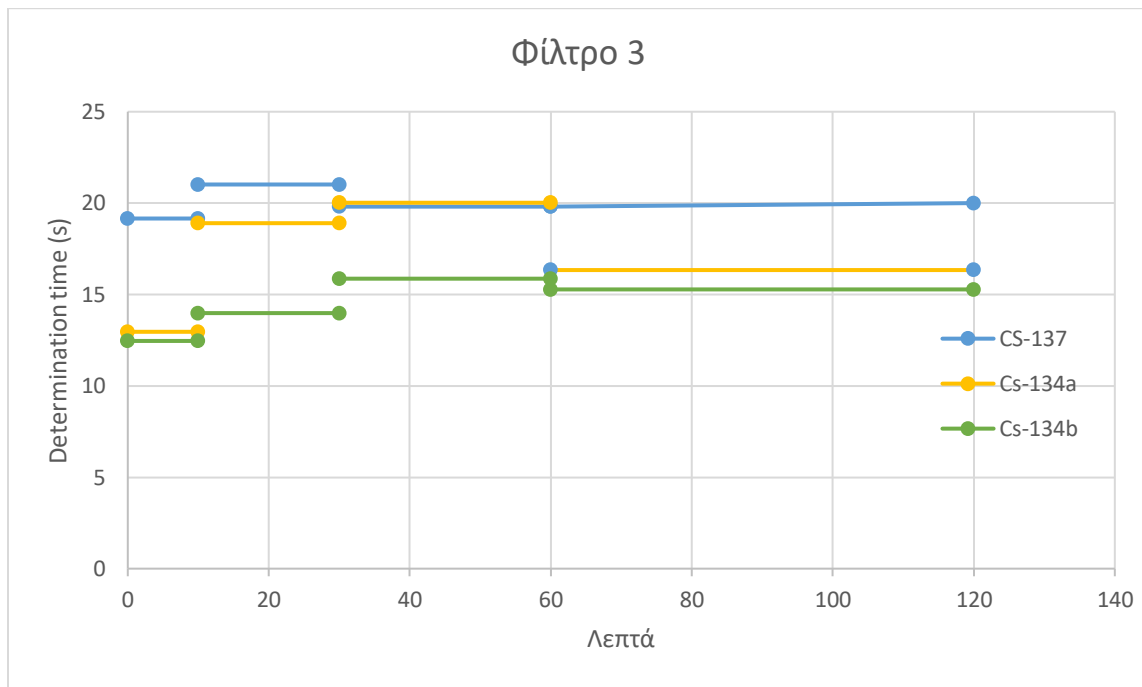
7.1.3 Παράρτημα VI – Διαγράμματα Determination Time, Φίλτρα αέρα



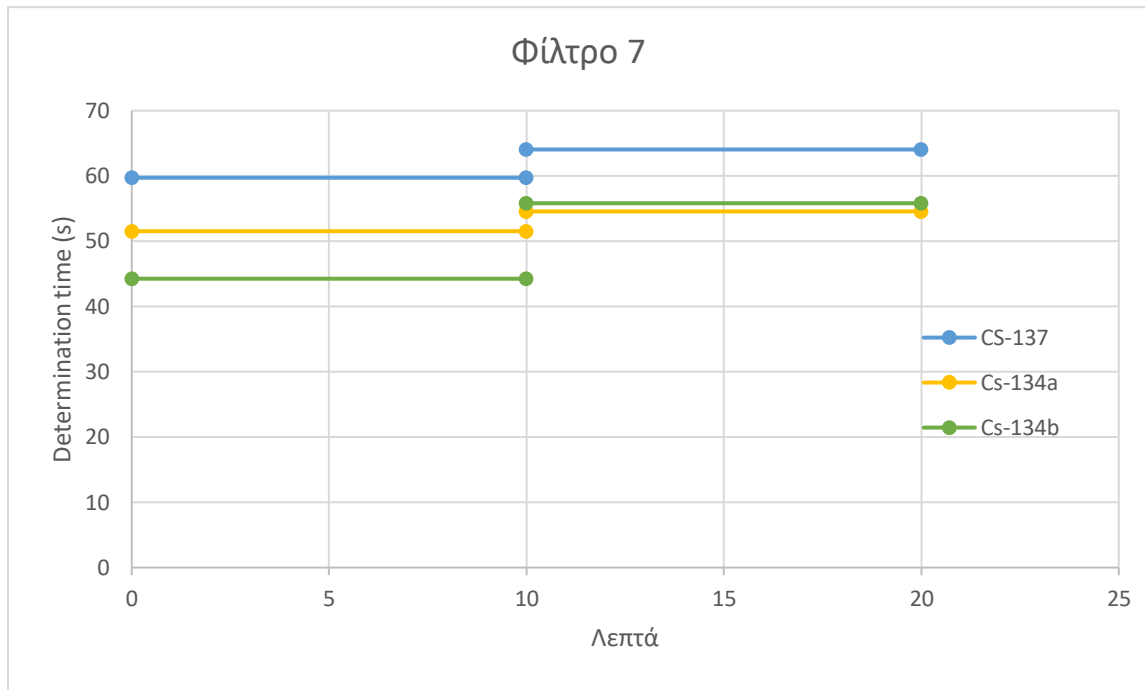
Διάγραμμα 80: Determination Time (s) – Cs-134(a), φίλτρα αέρα.



**Διάγραμμα 81: Determination Time (s) – Cs-134(b), φίλτρα αέρα.**



**Διάγραμμα 82: Determination Time (s) – Ραδιοϊσοτόπων, φίλτρο 3.**



**Διάγραμμα 83: Determination Time (s) – Ραδιοϊσοτόπων, φίλτρο 7.**

## 8. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κατηγορίες σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης [5].	15
Πίνακας 2: Δειγματοληψίες «πρώτης ομάδας τροφίμων» κατά τη φάση της έκτακτης ανάγκης.	26
Πίνακας 3: Δειγματοληψίες κατά τη φάση της έκτακτης ανάγκης και κατά τη φάση της αποκατάστασης.	27
Πίνακας 4: Κατανομή των εργαστηρίων μετρήσεων κατά Περιφέρειες.	28
Πίνακας 5: Guideline Levels για τρόφιμα	41
Πίνακας 6: Guideline Levels για αέρα	42
Πίνακας 7: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης (MDA) Cs-137 σε μαρούλι (σε Bq/kg).	47
Πίνακας 8: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(a) σε Bq/kg, μαρούλι.	48
Πίνακας 9: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(b) σε Bq/kg, μαρούλι.	48
Πίνακας 10: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης I-131 σε Bq/kg, μαρούλι.	49
Πίνακας 11: Determination Limit $L_Q$ (10%) Cs-137 σε counts για μαρούλι.	49
Πίνακας 12: Determination time Cs-137 σε s για μαρούλι	50
Πίνακας 13: Determination limit LQ (10%) Cs-134(a) σε counts για μαρούλι.	51
Πίνακας 14: Determination time Cs-134(a) σε s για μαρούλι	52
Πίνακας 15: Determination limit LQ (10%) Cs-134(b) σε counts, για μαρούλι.	52
Πίνακας 16: Determination time Cs-134(b) σε s, για μαρούλι.	53
Πίνακας 17: Determination limit LQ (10%) I-131 σε counts, για μαρούλι.	53
Πίνακας 18: Determination time I-131 σε s, για μαρούλι.	53
Πίνακας 19: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-137 σε Bq/kg, μήλο	57
Πίνακας 20: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(a) σε Bq/kg για μήλο	58
Πίνακας 21: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(b) σε Bq/kg για μήλο	59
Πίνακας 22: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης I-131 σε Bq/kg για μήλο	59
Πίνακας 23: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-137 σε counts για μήλο.	60
Πίνακας 24: Determination time Cs-137 σε s για μήλο.	61
Πίνακας 25: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-134(a) σε counts για μήλο.	62
Πίνακας 26: Determination time Cs-134(a) σε s για μήλο.	62
Πίνακας 27: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-134(b) σε counts, για μήλο.	63
Πίνακας 28: Determination time Cs-134(b) σε s για μήλο.	63
Πίνακας 29: Determination limit $L_Q$ (10%) I-131 σε counts για μήλο.	64
Πίνακας 30: Determination time I-131 σε s για μήλο.	64
Πίνακας 31: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ισοτόπων σε Bq/kg για γάλα.	65
Πίνακας 32: Determination limit $L_Q$ (10%) σε counts για γάλα.	66
Πίνακας 33: Determination time σε s για γάλα.	67
Πίνακας 34: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-137 σε Bq/kg, για πατάτα.	71
Πίνακας 35: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(a) σε Bq/kg για πατάτα.	72
Πίνακας 36: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(b) σε Bq/kg για πατάτα.	72
Πίνακας 37: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης I-131 σε Bq/kg για πατάτα.	72



Πίνακας 38: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-137 σε counts για πατάτα. ....	73
Πίνακας 39: Determination time Cs-137 σε s για πατάτα .....	74
Πίνακας 40: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-134(a) σε counts για πατάτα. ....	75
Πίνακας 41: Determination time Cs-134(a) σε s για πατάτα. ....	75
Πίνακας 42: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-134(b) σε counts για πατάτα. ....	75
Πίνακας 43: Determination time Cs-134(b) σε s για πατάτα. ....	75
Πίνακας 44: Determination limit $L_Q$ (10%) I-131 σε counts για πατάτα. ....	76
Πίνακας 45: Determination time I-131 σε s για πατάτα. ....	76
Πίνακας 46: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης των ισοτόπων σε Bq/kg για σιτάρι .....	77
Πίνακας 47: Determination Limit $L_Q$ (10%) σε counts για σιτάρι. ....	78
Πίνακας 48: Determination time σε s, για σιτάρι .....	79
Πίνακας 49: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-137 σε Bq/kg για κουνουπίδι .....	83
Πίνακας 50: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(a) σε Bq/kg, για κουνουπίδι .....	84
Πίνακας 51: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(b) σε Bq/kg, για κουνουπίδι. ....	85
Πίνακας 52: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης I-131 σε Bq/kg, για κουνουπίδι. ....	85
Πίνακας 53: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-137 σε counts, για κουνουπίδι. ....	86
Πίνακας 54: Determination time Cs-137 σε s για κουνουπίδι. ....	87
Πίνακας 55: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-134(a) σε counts για κουνουπίδι. ....	88
Πίνακας 56: Determination time Cs-134(a) σε s για κουνουπίδι .....	88
Πίνακας 57: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-134(b) σε counts για κουνουπίδι .....	88
Πίνακας 58: Determination time Cs-134(b) σε s για κουνουπίδι .....	89
Πίνακας 59: Determination limit $L_Q$ (10%) I-131 σε counts για κουνουπίδι .....	89
Πίνακας 60: Determination time I-131 σε s για κουνουπίδι .....	89
Πίνακας 61: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-137 σε Bq/kg για μανιτάρι. ....	91
Πίνακας 62: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(a) σε Bq/kg για μανιτάρι. ....	92
Πίνακας 63: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-134(b) σε Bq/kg για μανιτάρι .....	93
Πίνακας 64: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης I-131 σε Bq/kg για μανιτάρι .....	93
Πίνακας 65: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-137 σε counts για μανιτάρι. ....	94
Πίνακας 66: Determination time Cs-137 σε s, για μανιτάρι. ....	95
Πίνακας 67: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-134(a) σε counts για μανιτάρι. ....	96
Πίνακας 68: Determination time Cs-134(a) σε s, για μανιτάρι. ....	96
Πίνακας 69: Determination limit $L_Q$ (10%) Cs-134(b) σε counts για μανιτάρι. ....	96
Πίνακας 70: Determination time Cs-134(b) σε s για μανιτάρι. ....	97
Πίνακας 71: Determination limit $L_Q$ (10%) I-131 σε counts, για μανιτάρι. ....	97
Πίνακας 72: Determination time I-131 σε s για μανιτάρι. ....	98
Πίνακας 73: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για μαρούλι .....	100
Πίνακας 74: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για μήλο. ....	101
Πίνακας 75: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για πατάτα .....	102
Πίνακας 76: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για κουνουπίδι. ....	103
Πίνακας 77: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για μανιτάρι .....	104
Πίνακας 78: Σενάρια δειγματοληψίας, αναμονής και συνολικός όγκος αέρα .....	113

Πίνακας 79: MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m <sup>3</sup> στο φίλτρο 1.....	113
Πίνακας 80: MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m <sup>3</sup> στο φίλτρο 2.....	114
Πίνακας 81: MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m <sup>3</sup> στο φίλτρο 3.....	114
Πίνακας 82: MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m <sup>3</sup> στο φίλτρο 4.....	115
Πίνακας 83: MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m <sup>3</sup> στο φίλτρο 5.....	115
Πίνακας 84: MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m <sup>3</sup> στο φίλτρο 6.....	116
Πίνακας 85: MDA ισοτόπων ενδιαφέροντος σε Bq/m <sup>3</sup> στο φίλτρο 7.....	116
Πίνακας 86: Determination Limit L <sub>Q</sub> (10%) Cs-137 σε counts, φίλτρα αέρα.....	119
Πίνακας 87: Determination time(s) - Cs-137 για φίλτρα αέρα.....	120
Πίνακας 88: Determination limit LQ (10%) Cs-134(a) σε counts για φίλτρα αέρα.....	121
Πίνακας 89: Determination time(s) - Cs-134(a) για φίλτρα αέρα.....	121
Πίνακας 90: Determination limit LQ (10%) Cs-134(b) σε counts για φίλτρα αέρα.....	121
Πίνακας 91: Determination time(s) - Cs-134(b) για φίλτρα αέρα.....	121
Πίνακας 92: Determination limit L <sub>Q</sub> (10%) σε counts για το φίλτρο 3.....	122
Πίνακας 93: Determination time (s) για το φίλτρο 3.....	122
Πίνακας 94: Determination Limit LQ (10%) σε counts για το φίλτρο 7.....	122
Πίνακας 95: Determination Time (s) για το φίλτρο 7.....	122

## 9. Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης (MDA) Cs-137 σε μαρούλι. ....	47
Διάγραμμα 2: Determination limit L <sub>Q</sub> (10%) για το μαρούλι. ....	50
Διάγραμμα 3: Determination time Cs-137, για μαρούλι. ....	51
Διάγραμμα 4: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης MDA Cs-137, για μήλο. ....	58
Διάγραμμα 5: Determination Limit L <sub>Q</sub> Cs-137 για μήλο. ....	60
Διάγραμμα 6: Determination time Cs-137, για μήλο. ....	61
Διάγραμμα 7: Επίπεδα ανίχνευσης MDA όλων των ισοτόπων, για γάλα. ....	66
Διάγραμμα 8: Determination limit L <sub>Q</sub> όλων των ισοτόπων, για γάλα. ....	67
Διάγραμμα 9: Determination time των ισοτόπων για γάλα. ....	68
Διάγραμμα 10: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης MDA Cs-137 για πατάτα. ....	71
Διάγραμμα 11: Determination limit L <sub>Q</sub> (10%) Cs-137 για πατάτα. ....	73
Διάγραμμα 12: Determination time Cs-137 για πατάτα. ....	74
Διάγραμμα 13: MDA ισοτόπων για σιτάρι. ....	78
Διάγραμμα 14: Determination limit L <sub>Q</sub> (10%) όλων των ισοτόπων για σιτάρι. ....	79
Διάγραμμα 15: Determination time, για σιτάρι. ....	80
Διάγραμμα 16: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης MDA Cs-137, για κουνουπίδι. ....	84
Διάγραμμα 17: Determination limit L <sub>Q</sub> (10%) Cs-137 σε counts, για κουνουπίδι. ....	86
Διάγραμμα 18: Determination time Cs-137 για κουνουπίδι. ....	87
Διάγραμμα 19: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης Cs-137 σε Bq/kg για μανιτάρι. ....	92
Διάγραμμα 20: Determination limit L <sub>Q</sub> (10%) Cs-137 σε counts για μανιτάρι. ....	94
Διάγραμμα 21: Determination time Cs-137 για μανιτάρι. ....	95
Διάγραμμα 22: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για μαρούλι. ....	101
Διάγραμμα 23: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για μήλο. ....	102
Διάγραμμα 24: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg, για πατάτα. ...	103
Διάγραμμα 25: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg για κουνουπίδι. ....	104
Διάγραμμα 26: Κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ραδιοϊσοτόπων σε Bq/kg, για μανιτάρι. ....	105
Διάγραμμα 27: Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια Cs-137 σε φίλτρα αέρα. ....	117
Διάγραμμα 28: Determination time (s) – Cs-137 για φίλτρα αέρα. ....	120
Διάγραμμα 29: MDA Cs-134(a), μαρούλι. ....	128
Διάγραμμα 30: MDA Cs-134(b), μαρούλι. ....	128
Διάγραμμα 31: MDA I-30, μαρούλι. ....	129
Διάγραμμα 32: MDA Cs-134(a), μήλο. ....	129
Διάγραμμα 33: MDA Cs-134(b), μήλο. ....	130
Διάγραμμα 34: MDA I-131, μήλο. ....	130
Διάγραμμα 35: MDA Cs-134(a), πατάτα. ....	131
Διάγραμμα 36: MDA Cs-134(b), πατάτα. ....	131
Διάγραμμα 37: MDA I-131, πατάτα. ....	132

Διάγραμμα 38: MDA Cs-134(a), κουνουπίδι.....	132
Διάγραμμα 39: MDA Cs-134(b), κουνουπίδι. ....	133
Διάγραμμα 40: MDA I-131, κουνουπίδι. ....	133
Διάγραμμα 41: MDA Cs-134(a), μανιτάρι.....	134
Διάγραμμα 42: MDA Cs-134(b), μανιτάρι.....	134
Διάγραμμα 43: MDA I-131, μανιτάρι.....	135
Διάγραμμα 44: LQ – Cs-134(a), μαρούλι. ....	136
<b>Διάγραμμα 45: LQ Cs-134(b), μαρούλι. ....</b>	<b>136</b>
Διάγραμμα 46: LQ I-131, μαρούλι.....	137
Διάγραμμα 47: LQ Cs-134(a), μήλο. ....	137
Διάγραμμα 48: LQ Cs-134(b), μήλο. ....	139
Διάγραμμα 49: LQ I-131, μήλο. ....	139
Διάγραμμα 50: LQ - Cs-134(a), πατάτα. ....	140
Διάγραμμα 51: LQ Cs-134(b), πατάτα. ....	140
Διάγραμμα 52: LQ I-131, πατάτα. ....	141
Διάγραμμα 53: LQ Cs-134(a), κουνουπίδι. ....	141
Διάγραμμα 54: LQ Cs-134(b), κουνουπίδι. ....	142
Διάγραμμα 55: LQ I-131, κουνουπίδι. ....	142
Διάγραμμα 56: LQ Cs-134(a), μανιτάρι. ....	143
Διάγραμμα 57: LQ Cs-134(b), μανιτάρι. ....	143
Διάγραμμα 58: LQ I-131, μανιτάρι. ....	144
Διάγραμμα 59: Determination Time Cs-134(a), μαρούλι.....	145
Διάγραμμα 60: Determination Time Cs-134(b), μαρούλι.....	145
Διάγραμμα 61: Determination Time I-131, μαρούλι.....	146
Διάγραμμα 62: Determination Time Cs-134(a), μήλο.....	146
Διάγραμμα 63: Determination Time Cs-134(b), μήλο.....	147
Διάγραμμα 64: Determination Time I-131, μαρούλι.....	147
Διάγραμμα 65: Determination Time Cs-134(b), πατάτα. ....	148
Διάγραμμα 66: Determination Time Cs-134(a), πατάτα. ....	148
Διάγραμμα 67: Determination Time I-131, πατάτα. ....	149
Διάγραμμα 68: Determination Time Cs-134(a), κουνουπίδι. ....	149
Διάγραμμα 69: Determination Time Cs-134(b), κουνουπίδι.....	150
Διάγραμμα 70: Determination Time I-131, κουνουπίδι.....	150
Διάγραμμα 71: Determination Time Cs-134(a), μανιτάρι. ....	151
Διάγραμμα 72: Determination Time Cs-134(b), μανιτάρι. ....	151
Διάγραμμα 73: Determination Time I-131, μανιτάρι.....	152
Διάγραμμα 74: MDA I-131, φίλτρα αέρα. ....	153
Διάγραμμα 75: MDA ραδιοϊσοτόπων, φίλτρο 5. ....	153
Διάγραμμα 76: LQ – Cs134(a), φίλτρα αέρα.....	155
Διάγραμμα 77: LQ – Cs-134(b), φίλτρα αέρα. ....	155
Διάγραμμα 78: LQ ραδιοϊσοτόπων, φίλτρο 3.....	156

Διάγραμμα 79: LQ ραδιοϊσοτόπων, φίλτρο 7.....	156
Διάγραμμα 80: Determination Time (s) – Cs-134(a), φίλτρα αέρα.....	157
Διάγραμμα 81: Determination Time (s) – Cs-134(b), φίλτρα αέρα. ....	158
Διάγραμμα 82: Determination Time (s) – Ραδιοϊσοτόπων, φίλτρο 3. ....	158
Διάγραμμα 83: Determination Time (s) – Ραδιοϊσοτόπων, φίλτρο 7. ....	159

## 10. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ. ....	29
Εικόνα 2: Τυπικό γ-φάσμα στο οποίο διακρίνεται η φωτοκορυφή των φωτονίων του Cs-137 .....	33
Εικόνα 3: Πλαστικό κυλινδρικό δοχείο όγκου 282ml που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την συσκευασία στερεών και υγρών δειγμάτων. ....	34
Εικόνα 4: Τμήμα αναφοράς γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης από το πρόγραμμα SPUNAL..	36
Εικόνα 5: <i>Αριστερά:</i> Υπολογισμός της περιοχής κορυφής με χρήση εκτεταμένων περιοχών background. <i>Δεξιά:</i> $L_d$ -Detection Limit, $L_c$ - Critical Limit (αφορά την καθαρή επιφάνεια, αν είναι στατιστικά σημαντική), $k_{a\sigma_0}$ – πολλαπλάσιο τυπικής απόκλισης [10].....	40
Εικόνα 6: <i>Αριστερά:</i> Χρήση αλουμινόχαρτου και σκεύους. <i>Δεξιά:</i> Πλύση του μαρουλιού..	44
Εικόνα 7: <i>Πάνω αριστερά:</i> Φούρνος ξήρασης. <i>Πάνω δεξιά:</i> Ζύγιση σκεύους. <i>Κάτω αριστερά:</i> Ζύγιση μαρουλιού μετά την πλύση. <i>Κάτω δεξιά:</i> Ξήρανση μαρουλιού και μήλου. .....	44
Εικόνα 8: <i>Πάνω αριστερά:</i> Μαρούλι και μήλο μετά τη ξήρανση. <i>Πάνω δεξιά:</i> Θρυμματισμός μαρουλιού με πλύση. <i>Κάτω αριστερά:</i> Ομογενοποίηση του πλυμένου μαρουλιού σε μπλέντερ. <i>Κάτω δεξιά:</i> Καταγραφή δεδομένων, κυπελάκι γεωμετρίας 8. ....	45
Εικόνα 9: Ζύγιση ωμού μαρουλιού με την τάρα.....	46
Εικόνα 10: Ζύγιση δείγματος μήλου .....	55
Εικόνα 11: <i>Αριστερά:</i> Ο σπαστήρας του ΕΠΤ-ΕΜΠ. <i>Δεξιά:</i> Σύνθλιψη μήλου χειροκίνητα. ..	56
Εικόνα 12: Δείγμα γάλατος. ....	65
Εικόνα 13: <i>Αριστερά:</i> Προετοιμασία δείγματος πατάτας. <i>Δεξιά:</i> Το δείγμα ύστερα από την ξήρανση.....	69
Εικόνα 14: Καταγραφή στοιχείων σε δοχείο γεωμετρίας «5» .....	69
Εικόνα 15: <i>Αριστερά:</i> Μπλέντερ. <i>Δεξιά:</i> Ομογενοποιημένο δείγμα πατάτας.....	70
Εικόνα 16: <i>Αριστερά:</i> Δείγμα ωμής πατάτας σε γεωμετρία 2. <i>Δεξιά:</i> Δείγμα ωμής πατάτας σε γεωμετρία «2» έπειτα από 6 ώρες. ....	70
Εικόνα 17: Σιτάρι σε δοχείο γεωμετρίας «2». ....	77
Εικόνα 18: <i>Πάνω αριστερά και δεξιά:</i> Ζύγιση δείγματος σε σκεύος και σε δίσκους. <i>Κάτω αριστερά:</i> Αποξήρανση δείγματος. <i>Κάτω δεξιά:</i> Ζύγιση ξηρής μάζας κουνουπιδιού.....	81
Εικόνα 19: <i>Αριστερά:</i> Δείγμα ξηρού κουνουπιδιού γεωμετρίας 5. <i>Δεξιά:</i> Δείγμα ωμού κουνουπιδιού γεωμετρίας 5. ....	82
Εικόνα 20: <i>Αριστερά:</i> Ζύγιση δείγματος σε σκεύος. <i>Δεξιά:</i> Αποξήρανση δείγματος, Μανιτάρι .....	90
Εικόνα 21: <i>Αριστερά:</i> Ζύγιση ξηρού μανιταριού γεωμετρίας 2. <i>Δεξιά:</i> Δείγμα ωμού μανιταριού γεωμετρίας 5. ....	91
Εικόνα 22: Δοχείο Marinelli. ....	99
Εικόνα 23: Υπολογισμός determination time με ανάλογη μείωση υποστρώματος για Cs-137 σε λογαριθμική κλίμακα, activity 1000 Bq/kg .....	109

Εικόνα 24: Υπολογισμός determination time με ανάλογη μείωση υποστρώματος για Cs-137 σε λογαριθμική κλίμακα, activity 10 Bq/kg. ....109

Εικόνα 25: Αριστερά: Φορητός δειγματολήπτης αέρα του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας. Δεξιά: Φίλτρο αέρα  $\varnothing 4''$ , προσαρμοσμένο στην αντλία. Κάτω: Ένδειξη παροχής αέρα σε  $m^3/min$ . ....111

Εικόνα 26: Ανιχνευτής HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ με σχετική απόδοση 33.8%.....112

## 11. Κατάλογος Αναφορών

- [1] I. A. E. AGENCY, «A model national emergency response plan for radiological accidents,» IAEA, Vienna, 1993.
- [2] I. A. E. AGENCY, «Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency,» IAEA, Vienna, 2000.
- [3] I. A. E. AGENCY, «Method for the development of emergency response preparedness for nuclear or radiological accidents,» IAEA, Vienna, 1997.
- [4] Ε. Ε. Α. Ενέργειας, «ΕΙΔΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΕ ΡΑΔΙΟΛΟΓΙΚΗ Ή ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΚΤΑΚΤΗ ΑΝΑΓΚΗ (ΕΞΑΡΠΕΑ) ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΣΟΒΑΡΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΚΤΟΣ ΣΥΝΟΡΩΝ,» ΕΕΑΕ, ΑΘΗΝΑ, 2021.
- [5] O. Frindik, M. Heilgeist, W. Kalus και R. Schelenz, «Procedure for determining radionuclides in foodstuffs by gamma spectrometry,» Federal coordinating office for soil, vegetation, animal feed and food of vegetable or animal origin, 1997.
- [6] T. K. Taipale, «The Sampling and Analysing Methods of Radionuclides used in The Nordic Countries for Environmental Samples,» Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, 1985.
- [7] G. Dercon, A. L. Z. Yi, S. Fesenko και L. Heng, «Sampling of agricultural soils and plants for radioactivity analysis,» Food and Agriculture Organization of the United Nations International Atomic Energy Agency, Vienna, 2022.
- [8] «Measurement of Radionuclides in Food and the Environment,» International Atomic Energy Agency, Vienna, 1989.
- [9] M. Heilgeist, «ANMERKUNGEN ZUR PROBENAUFBEREITUNG VON LEBENSMITTELN: .,» Bundesforschungsanstalt für Ernährung, Zentrallaboratorium für Isotopentechnik, Karlsruhe, 1989.
- [10] G. R. Gilmore, Practical Gamma-ray Spectrometry, Warrington, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [11] Μ. Ν. ΠΑΠΑΔΙΟΝΥΣΙΟΥ, «ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE - CARLO,» ΑΘΗΝΑ, 2015.



[12] IAEA, Criteria for Radionuclide Activity Concentrations for Food and Drinking Water, Vienna: IAEA, TECDOC 1788, 2016.

[13] U. D. O. H. A. H. SERVICES, «TOXICOLOGICAL PROFILE FOR CESIUM,» 2004.

--- Τέλος εγγράφου ---