

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

*Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών*

*Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας*

***ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ  
ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΧΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ  
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΤΟΥΣ  
ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ της

**ΕΛΕΝΗΣ ΠΑΛΑΜΑΡΑ**

Σπουδάστριας της Σχολής  
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επ. Καθηγητής Μ.Ι.Αναγνωστάκης

Συνεργασία: Δρ. Δ.Ι. Καράγγελος

ΑΘΗΝΑ 2010

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο προσδιορισμός της ραδιενέργειας δειγμάτων επιφανειακού χώματος με χρήση της μεθόδου της γ-φασματοσκοπίας είναι ένα θέμα που απασχολεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η διαδικασία της προετοιμασίας των δειγμάτων είναι μια σημαντική παράμετρος, που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε μια διερεύνηση της επίδρασης που έχουν διάφορες μέθοδοι προετοιμασίας ενός δείγματος χώματος που πρόκειται να αναλυθεί με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας στη μετρούμενη ραδιενέργεια, καθώς και στην ολική αβεβαιότητα της μέτρησης. Η μεθοδολογία προετοιμασίας που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εφαρμόστηκε σε δείγματα χώματος από την περιοχή της Μεγαλόπολης, για να διαπιστωθεί κατά πόσο η μεθοδολογία αυτή μπορεί να βοηθήσει στην εκτίμηση της απόθεσης ραδιοϊσοτόπων σε περιοχές που γειτνιάζουν με θερμικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Μ.Ι. Αναγνωστάκη για τη δυνατότητα που μου έδωσε αναθέτοντάς μου αυτή τη ΔΕ να παρακολουθήσω ενεργά όλα τα στάδια ενός ερευνητικού πειράματος: Από την αρχική συλλογή των σχετικών βιβλιογραφικών αναφορών, στο σχεδιασμό και την εκτέλεση του πειράματος, τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, έως την τελική διεξαγωγή και καταγραφή των συμπερασμάτων. Η διαδικασία αυτή υπήρξε ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα και εποικοδομητική από άποψη απόκτησης γνώσεων και ανάπτυξης διάφορων παράπλευρων ακαδημαϊκών ικανοτήτων.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Δ.Ι. Καράγγελο για το χρόνο που αφιέρωσε επιβλέποντας όλα τα στάδια αυτής της εργασίας, για τη συνεχή βοήθεια που προσέφερε σε κάθε πρόβλημα που παρουσιάστηκε, καθώς και για τη δυνατότητα που μου παρείχε να λαμβάνω – κατά το δυνατό – πρωτοβουλίες. Η συμβολή του στην ολοκλήρωση της εργασίας υπήρξε καθοριστική.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Κ. Καρφόπουλο για τη βοήθεια που μου προσέφερε σε θέματα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Ν. Παπαδόπουλο για τις γνώσεις και την εμπειρία του σχετικά με την απόθεση ραδιενέργειας στην περιοχή της Μεγαλόπολης.

Αθήνα – Ιούλιος 2010

1	Εισαγωγή .....	1
2	Προσδιορισμός της ραδιενέργειας σε δείγματα χώματος και σχετικές μέθοδοι στατιστικής επεξεργασίας.....	5
2.1	Εισαγωγή .....	5
2.2	Γενικά στοιχεία για το χώμα.....	6
2.2.1	Περιγραφή του χώματος .....	6
2.2.2	Φυσικές και χημικές ιδιότητες χώματος .....	7
2.2.3	Ρύπανση του εδάφους.....	10
2.3	Ραδιενέργεια του εδάφους .....	12
2.3.1	Διάκριση φυσικής και τεχνητής ραδιενέργειας .....	12
2.3.2	Ραδιοϊσότοπα που απαντώνται στο έδαφος .....	13
2.3.2.1	Φυσικά ραδιενεργά ισότοπα .....	13
2.3.2.2	Τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα .....	14
2.3.3	Πηγές ραδιενεργού ρύπανσης εδάφους .....	15
2.3.4	Ραδιενέργεια των ελληνικών εδαφών .....	16
2.4	Δειγματοληψία χώματος .....	17
2.4.1	Γενικά στοιχεία .....	18
2.4.2	Τυπική διαδικασία δειγματοληψίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ .....	19
2.5	Προετοιμασία δειγμάτων .....	20
2.5.1	Μέθοδοι επεξεργασίας.....	20
2.5.1.1	Διαχωρισμός σε υπο-δείγματα.....	21
2.5.1.2	Ξήρανση.....	21
2.5.1.3	Σπάσιμο και λειοτρίβιση.....	22
2.5.1.4	Κοσκίνισμα .....	23
2.5.2	Τυπική διαδικασία προετοιμασίας δείγματος του ΕΠΤ-ΕΜΠ .....	23
2.6	γ-φασματοσκοπική ανάλυση .....	25
2.6.1	Οι ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	26
2.6.1.1	Ανιχνευτής HPGe .....	26
2.6.1.2	Ανιχνευτής LEGe.....	26
2.6.1.3	Ανιχνευτής XtRa.....	27
2.6.2	Κώδικας φασματοσκοπικής ανάλυσης SPUNAL.....	27
2.7	Αβεβαιότητα κατά τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων σε δείγματα χώματος .....	28
2.7.1	Γενικά περί αβεβαιότητας.....	28
2.7.2	Πηγές αβεβαιότητας.....	29
2.8	Σύγκριση αποτελεσμάτων γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων με βάση το u-score. 31	
2.9	Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA).....	33
2.9.1	Γενικά στοιχεία .....	33
2.9.2	Κατανομή F.....	33
2.9.3	Ανάλυση της διακύμανσης κατά ένα παράγοντα .....	34
2.9.3.1	Προσδιορισμός μοντέλου .....	34
2.9.3.2	Υποθέσεις μοντέλου .....	35
2.9.3.3	Έλεγχος υποθέσεων .....	36
2.9.3.4	Υπολογισμός των αθροισμάτων των τετραγώνων.....	36
2.9.3.5	Εκτιμητές διακύμανσης $\sigma^2$ .....	38
2.9.3.6	Τεστ F .....	39
2.9.3.7	Τελική παρουσίαση βασικών μεγεθών ανάλυσης διακύμανσης κατά ένα παράγοντα .....	40

2.9.3.8	Διαχωρισμός ολικής αβεβαιότητας μέτρησης στις επιμέρους συνιστώσες της .....	40
2.9.4	Ανάλυση της διακύμανσης κατά δύο παράγοντες.....	41
2.9.5	Εφαρμογή της μεθόδου ANOVA σε περιβαλλοντικές αναλύσεις.....	42
2.9.6	Εφαρμογή της μεθόδου ANOVA στην παρούσα ΔΕ .....	43
	Πίνακες κεφαλαίου .....	44
	Σχήματα κεφαλαίου .....	45
3	Μελέτη των μεθόδων προετοιμασίας δείγματος χώματος και σχετική στατιστική ανάλυση .....	49
3.1	Εισαγωγή .....	49
3.2	Οργάνωση δειγματοληψιών εδάφους για τις ανάγκες της ΔΕ.....	49
3.3	Μεθοδολογία γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης .....	50
3.3.1	Επιλογή ισοτόπων .....	50
3.3.2	Επιλογή ανιχνευτών .....	53
3.3.3	Διάρκεια συλλογής φασμάτων.....	53
3.3.4	Μέτρηση υποστρώματος ανιχνευτή HPGe.....	54
3.3.5	Αβεβαιότητα υποστρώματος .....	55
3.3.6	Ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτικών διατάξεων .....	57
3.3.7	Παρουσίαση αποτελεσμάτων γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης .....	58
3.4	Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας δείγματος.....	59
3.4.1	Δειγματοληψία.....	59
3.4.2	Προετοιμασία δειγμάτων .....	60
3.4.3	γ-Φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων .....	60
3.4.3.1	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	60
3.4.3.2	Αξιολόγηση της συνεισφοράς της αβεβαιότητας υποστρώματος ...	61
3.4.4	Στατιστική ανάλυση μετρούμενων τιμών συγκέντρωσης ραδιενέργειας 62	
3.4.4.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων με βάση το u-score .....	62
3.4.4.2	Περιγραφή λογιστικού φύλλου Excel ANOVA .....	62
3.4.4.3	Εκτέλεση ανάλυσης ANOVA.....	63
3.4.4.4	Εκτίμηση αβεβαιότητας λόγω δειγματοληψίας.....	64
3.4.4.5	Εκτίμηση αβεβαιότητας λόγω προετοιμασίας.....	65
3.5	Επίδραση του χονδρόκοκκου κλάσματος (> 2 mm) στη συγκέντρωση ραδιενέργειας και στην αβεβαιότητα ανάλυσης .....	66
3.5.1	Ομογενοποίηση και διαχωρισμός σε υποδείγματα .....	67
3.5.2	Κοσκίνισμα .....	68
3.5.2.1	Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός .....	68
3.5.2.2	Πειραματική διαδικασία .....	69
3.5.3	Συσκευασία υπο-δειγμάτων .....	70
3.5.4	γ-Φασματοσκοπική ανάλυση.....	70
3.5.5	Στατιστική ανάλυση.....	70
3.5.5.1	Εκτέλεση ανάλυσης ANOVA.....	70
3.5.5.2	Εκτίμηση αβεβαιότητας λόγω προετοιμασίας.....	72
3.5.5.3	Σύγκριση αβεβαιότητας προετοιμασίας των υπο-δειγμάτων με και χωρίς αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος .....	74
3.5.5.4	Σύγκριση μέσω τιμών των υπο-δειγμάτων με και χωρίς αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.....	74
3.6	Επίδραση της λειοτριβίσης στη συγκέντρωση ραδιενέργειας και στην αβεβαιότητα ανάλυσης .....	75

3.6.1	Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός σπασίματος.....	76
3.6.2	Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός λειοτρίβισης .....	77
3.6.3	Δοκιμή λειοτρίβισης .....	79
3.6.4	Δειγματοληψία .....	80
3.6.5	Προετοιμασία δειγμάτων .....	80
3.6.5.1	Προετοιμασία υπο-δειγμάτων με αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος και λειοτρίβιση .....	80
3.6.5.2	Προετοιμασία υπο-δειγμάτων με λειοτρίβιση του συνόλου του δείγματος81	
3.6.6	γ-Φασματοσκοπική ανάλυση.....	82
3.6.7	Στατιστική ανάλυση.....	82
3.6.7.1	Εκτέλεση ανάλυσης ANOVA.....	82
3.6.7.2	Εκτίμηση αβεβαιότητας λόγω προετοιμασίας.....	84
3.6.7.3	Σύγκριση μέσων τιμών .....	85
3.7	Σύγκριση των δύο μεθόδων προετοιμασίας που περιλαμβάνουν αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.....	87
3.7.1	Σύγκριση μέσων τιμών .....	87
3.7.2	Σύγκριση τυπικών αποκλίσεων.....	88
3.8	Επίδραση της θερμοκρασίας ξήρασης στη συγκέντρωση ραδιενέργειας..	89
3.8.1	Δειγματοληψία .....	89
3.8.2	Αρχική προεργασία.....	90
3.8.3	Ξήρανση.....	90
3.8.3.1	Θέρμανση στους 150 °C .....	91
3.8.3.2	Θέρμανση στους 100 °C .....	91
3.8.3.3	Θέρμανση στους 50 °C .....	91
3.8.4	Κοσκίνισμα .....	91
3.8.5	Συσκευασία υπο-δειγμάτων .....	92
3.8.6	γ-φασματοσκοπική ανάλυση .....	92
3.8.7	Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων .....	92
3.8.7.1	Διάγραμμα ραδιενέργειας – θερμοκρασίας .....	92
3.8.7.2	Υπολογισμός συντελεστή συσχέτισης.....	93
3.9	Συμπεράσματα .....	94
	Πίνακες κεφαλαίου .....	98
	Σχήματα κεφαλαίου .....	130
4	Μελέτη της διακύμανσης της συγκέντρωσης φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του χώματος.....	133
4.1	Δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης χώματος.....	133
4.1.1	Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός .....	134
4.1.2	Διαδικασία κοσκίνισματος.....	134
4.1.3	Αποτελέσματα δοκιμής κοκκομετρικής ανάλυσης χώματος.....	135
4.2	Σύγκριση συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα διάφορα κλάσματα χώματος	
	136	
4.2.1	Δειγματοληψία .....	136
4.2.1.1	Υπολογισμός απαιτούμενης μάζας αρχικού δείγματος .....	136
4.2.1.2	Διαδικασία δειγματοληψίας.....	137
4.2.2	Κοσκίνισμα .....	137
4.2.2.1	Κριτήριο διακοπής .....	138
4.2.2.2	Πειραματική διαδικασία .....	138
4.2.2.3	Ιδιαιτερότητες στο κοσκίνισμα του κλάσματος των 125 μm .....	139
4.2.2.4	Κοκκομετρική ανάλυση.....	140

4.2.3	Θραύση χονδρόκοκκου κλάσματος .....	140
4.2.4	Συσκευασία δειγμάτων .....	140
4.2.5	γ-Φασματοσκοπική ανάλυση.....	141
4.2.5.1	Επιλογή ισοτόπων .....	141
4.2.5.2	Επιλογή ανιχνευτών και διάρκεια συλλογής φασμάτων .....	142
4.2.5.3	Διόρθωση της απόδοσης ανιχνευτή HPGe για τα δείγματα γεωμετρίας 5 λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης .....	142
4.2.5.4	Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	144
4.2.6	Κατώτερο όριο ανίχνευσης του <sup>7</sup> Be.....	145
4.2.6.1	Βασικά στοιχεία υπολογισμού κατώτατου ορίου ανίχνευσης .....	145
4.2.6.2	Υπολογισμός κατώτατου ορίου ανίχνευσης .....	147
4.2.7	Στατιστική ανάλυση.....	147
4.2.7.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων με βάση το u-score .....	147
4.2.7.2	Διαγράμματα συγκέντρωσης ανά κλάσμα.....	148
4.2.8	Σύγκριση μετρούμενης ραδιενέργειας σε δείγματα γεωμετρίας 2 και 5 150	
4.2.9	Συμπεράσματα .....	151
	Πίνακες κεφαλαίου .....	153
	Σχήματα κεφαλαίου .....	160
5	Κοκκομετρική και γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χώματος από την περιοχή της Μεγαλόπολης.....	168
5.1	Εισαγωγή .....	168
5.2	Μελέτες απόθεσης ραδιοϊσοτόπων στην περιοχή θερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής .....	169
5.2.1	Περιοχή Langerlo στο Βέλγιο.....	170
5.2.2	Περιοχή Lodz στη Πολωνία.....	171
5.2.3	Περιοχή Ajka στην Ουγγαρία.....	172
5.2.4	Περιοχή της Πτολεμαΐδας στην Ελλάδα.....	172
5.2.5	Περιοχή της Μεγαλόπολης στην Ελλάδα .....	173
5.3	Σχεδιασμός δειγματοληψίας χώματος στην περιοχή Μεγαλόπολης .....	174
5.4	Δειγματοληψία .....	176
5.4.1	Διαδικασία δειγματοληψίας.....	176
5.4.1.1	Θέση 1 <sup>η</sup> «Κατσίμπαλης».....	177
5.4.1.2	Θέση 2 <sup>η</sup> «Δρόμος Κατσίμπαλη – Καρύταινα» .....	177
5.4.1.3	Θέση 3 <sup>η</sup> «Κουρουνιός» .....	178
5.4.1.4	Θέση 4 <sup>η</sup> «Καρυές προς Καστανοχώρι» .....	178
5.4.2	Δειγματοληψία ιπτάμενης τέφρας.....	178
5.4.3	Μετρήσεις δόσης .....	178
5.4.4	Μετρήσεις ραδονίου .....	179
5.5	Προκαταρκτική ανάλυση (screening) δειγμάτων .....	179
5.6	Επεξεργασία δειγμάτων .....	180
5.6.1	Επιλογή δειγμάτων προς ανάλυση.....	180
5.6.2	Επεξεργασία δείγματος 8-1.....	181
5.6.3	Επεξεργασία δείγματος 9-1.....	182
5.7	γ-φασματοσκοπική ανάλυση .....	183
5.7.1	Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας ανάλυσης .....	183
5.7.2	Ανάλυση υπο-δειγμάτων αρχικού δείγματος 8-1 .....	185
5.7.3	Ανάλυση υπο-δειγμάτων αρχικού δείγματος 9-1 .....	186

5.8	Στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων .....	187
5.8.1	Σύγκριση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{137}\text{Cs}$ με τα προβλεπόμενα επίπεδα ραδιενέργειας της περιοχής.....	187
5.8.1.1	Διαγράμματα συγκέντρωσης ανά κοκκομετρικό κλάσμα .....	189
5.8.1.2	Σύγκριση σταθμισμένης μέσης τιμής ραδιενέργειας με τιμή ραδιενέργειας από δείγμα χωρίς επεξεργασία .....	191
5.8.1.3	Σύγκριση ραδιενέργειας διαδοχικών κλασμάτων με βάση το u score	192
5.9	Συμπεράσματα .....	194
	Πίνακες κεφαλαίου .....	196
	Σχήματα κεφαλαίου .....	215
6	Επίλογος.....	229
6.1	Περίληψη της Διπλωματικής Εργασίας.....	229
6.1.1	Πειράματα μελέτης των μεθόδων προετοιμασίας χώματος.....	229
6.1.2	Πείραμα μελέτης της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα διαφορετικά κλάσματα χώματος.....	232
6.1.3	Δειγματοληψία Μεγαλόπολης .....	232
6.2	Προοπτικές μελλοντικής έρευνας.....	234
	Βιβλιογραφία .....	236
	Παράρτημα 1 - Κατάλογος δειγματοληψιών.....	239
	Παράρτημα 2 - Φόρμες δειγματοληψιών.....	240
	Παράρτημα 3 - Σύγκριση μετρούμενης ραδιενέργειας των ισοτόπων $^{137}\text{Cs}$ και $^{40}\text{K}$ στους ανιχνευτές HPGe και LEGe.....	245
	Πίνακες παραρτήματος .....	247
	Σχήματα παραρτήματος .....	248

# 1 Εισαγωγή

Ο προσδιορισμός της ραδιενέργειας του εδάφους είναι ένα θέμα που απασχολεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η διερεύνηση του φυσικού ραδιενεργού υποβάθρου μίας περιοχής και η διερεύνηση της ενδεχόμενης ρύπανσης από φυσικά η τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα λόγω ανθρωπογενούς δραστηριότητας. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο παρουσιάζονται και επιστημονικές εφαρμογές, όπως μελέτες διάβρωσης του εδάφους και ιζηματογένεσης, με χρήση των ραδιενεργών ισοτόπων που υπάρχουν ή αποτίθενται στο έδαφος. Ανεξάρτητα από την εφαρμογή, σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητος ο κατά το δυνατόν ακριβής προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος, καθώς και η εκτίμηση της ολικής αβεβαιότητας που συνοδεύει τη μέτρηση. Ο προσδιορισμός της συνολικής αβεβαιότητας είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, καθώς υπεισέρχονται πλήθος παραγόντων, ορισμένοι από τους οποίους δεν είναι εύκολο να εκτιμηθούν ποσοτικά. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετήθηκαν ορισμένοι από τους παράγοντες που επιδρούν στη συνολική αβεβαιότητα κατά τη δειγματοληψία και ανάλυση δειγμάτων χώματος. Συγκεκριμένα, η μελέτη εστιάστηκε στην επίδραση των μεθόδων προετοιμασίας ενός δείγματος χώματος, τόσο στη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας όσο και στην συνολική αβεβαιότητα.

Κατά την εκπόνηση της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκε μια σειρά από δειγματοληψίες επιφανειακού χώματος στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Οι δειγματοληψίες έγιναν από την ίδια θέση και η διαδικασία της λήψης των δειγμάτων ήταν τυποποιημένη, ώστε να περιοριστεί όσο γίνεται περισσότερο η εισαγωγή αβεβαιότητας δειγματοληψίας. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων ώστε να μελετηθεί η επίδραση ορισμένων συνηθισμένων μεθόδων προετοιμασίας δειγμάτων χώματος, στη μετρούμενη ραδιενέργεια του δείγματος. Σε κάθε πείραμα, τα δείγματα υπέστησαν διαφορετική προετοιμασία, η οποία κατά περίπτωση περιελάμβανε την ομογενοποίηση, το κοσκίνισμα, την αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος, το διαχωρισμό στα κοκκομετρικά κλάσματα, τη λειοτρίβιση μέρους ή ολόκληρης της μάζας και τη ξήρανση σε θερμοκρασίες άνω των 50°C σε φούρνο. Τα δείγματα του εκάστοτε πειράματος αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας με σκοπό τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$



και  $^{234}\text{Th}$ . Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ με χρήση των ανιχνευτών HPGe και LEGe. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης υπέστησαν στατιστική επεξεργασία. Ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε πειράματος χρησιμοποιήθηκαν διάφορα στατιστικά εργαλεία, όπως είναι η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) κατά ένα ή κατά δύο παράγοντες, η χάραξη διαγραμμάτων και η εκτέλεση στατιστικών τεστ, όπως ο έλεγχος βάσης του u-score, το t test και το F test.

Η διερεύνηση που έγινε με δείγματα χώματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου ολοκληρώθηκε με την κοκκομετρική ανάλυσή τους και την εν συνεχεία ανάλυση των κοκκομετρικών κλασμάτων με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας, προκειμένου να προσδιορισθούν τα επίπεδα των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$  στα διάφορα κλάσματα του χώματος. Η διερεύνηση αυτή οδήγησε στο πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα ότι η ραδιενέργεια των διαφόρων ισοτόπων εξαρτάται από το κοκκομετρικό κλάσμα.

Στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκε και μία δειγματοληψία χώματος στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Η περιοχή αυτή εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από ραδιολογικής απόψεως, καθώς παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα υποβάθρου φυσικής ραδιενέργειας, ενώ στην περιοχή λειτουργούν και δύο θερμικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας, που χρησιμοποιούν λιγνίτη της περιοχής. Η ιπτάμενη τέφρα που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα από τους θερμικούς σταθμούς περιλαμβάνει πλήθος ραδιοϊσοτόπων, τα οποία αποτίθενται στο έδαφος. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος προετοιμασίας δειγμάτων που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια των προηγούμενων πειραμάτων της ΔΕ, στη μελέτη του εδάφους περιοχών που ενδεχομένως έχουν επιβαρυνθεί από την απόθεση ραδιοϊσοτόπων λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων των διαφόρων κοκκομετρικών κλασμάτων των δειγμάτων που συλλέχθηκαν κατά τη δειγματοληψία αυτή.

Η Διπλωματική Εργασία αποτελείται από έξι Κεφάλαια και συνοδεύεται από 3 Παραρτήματα.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικά στοιχεία γύρω από το χώμα, τη σύσταση και τις ιδιότητες του. Επίσης, παρουσιάζονται τα κύρια, φυσικά και τεχνητά,

ραδιοϊσότοπα του εδάφους και η προέλευση τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές μέθοδοι δειγματοληψίας επιφανειακού χώματος, ενώ έμφαση δίδεται στην παρουσίαση των μεθόδων προετοιμασίας των δειγμάτων. Συνοπτικά, αναφέρονται οι βασικές αρχές της γ-φασματοσκοπίας και δίδονται πληροφορίες για τους ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσης ΔΕ. Στο ίδιο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις κύριες πηγές αβεβαιότητας που υπεισέρχονται κατά τη δειγματοληψία, προετοιμασία και φασματοσκοπική ανάλυση ενός δείγματος χώματος. Τέλος, παρουσιάζονται τα κύρια στατιστικά εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν κατά την επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από τα πειράματα της ΔΕ.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αρχικά γίνεται μια πειραματική εκτιμήση της αβεβαιότητας δειγματοληψίας και προετοιμασίας δείγματος χώματος που πρόκειται να αναλυθεί με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας, για να διαπιστωθεί το κατά πόσον η επίδραση της προετοιμασίας είναι άξια περαιτέρω μελέτης. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα τρία πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της επίδρασης διάφορων μεθόδων προετοιμασίας των δειγμάτων χώματος, στη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας και στην εκτιμώμενη αβεβαιότητα της προετοιμασίας. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι διαδικασίες του κοσκινίσματος και της επακόλουθης αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος, της λειοτρίβισης και της ξήρανσης σε φούρνο. Τέλος, παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των εκάστοτε δειγμάτων. Στο Κεφάλαιο αυτό κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται η μέθοδος της διακύμανσης αβεβαιότητας κατά ένα παράγοντα.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται το πείραμα κοκκομετρικής ανάλυσης του χώματος. Κατά το πείραμα αυτό λήφθηκε ένα μεγάλο δείγμα επιφανειακού χώματος, το οποίο στη συνέχεια κοσκινίστηκε και διαχωρίστηκε σε 8 κοκκομετρικά κλάσματα. Από κάθε ένα από τα κλάσματα συσκευάστηκε ένα υπο-δείγμα, το οποίο αναλύθηκε με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας. Τα αποτελέσματα της φασματοσκοπίας στη συνέχεια υπέστησαν στατιστική επεξεργασία για να διερευνηθεί η επίδραση της κοκκομετρίας του χώματος στη μετρούμενη συγκέντρωση των υπό μελέτη ισοτόπων. Στο τέλος του Κεφαλαίου παρουσιάζονται διαγράμματα που συσχετίζουν τη συγκέντρωση ραδιενέργειας των υπό μελέτη ισοτόπων με τα κοκκομετρικά κλάσματα του χώματος.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, περιγράφεται η δειγματοληψία πεδίου που πραγματοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσης ΔΕ στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Στα δείγματα που λήφθηκαν από τη Μεγαλόπολη εφαρμόστηκε η ίδια μέθοδος προετοιμασίας που περιγράφηκε στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Σκοπός ήταν να διαπιστωθεί κατά πόσο η συγκεκριμένη μέθοδος επεξεργασίας μπορεί να βοηθήσει κατά τη μελέτη της απόθεσης ραδιοϊσοτόπων σε περιοχές που γειτνιάζουν με θερμικούς σταθμούς. Λόγω περιορισμένου χρόνου και διαθέσιμου ανιχνευτικού εξοπλισμού, κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας, δεν αναλύθηκαν όλα τα δείγματα που λήφθηκαν κατά τη δειγματοληψία της Μεγαλόπολης.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο συνοψίζεται η Διπλωματική Εργασία και συγκεντρώνονται συνολικά τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που προέκυψαν. Αναφέρονται επίσης πιθανές προεκτάσεις της για μελλοντική έρευνα, κυρίως όσον αφορά την έρευνα στο πεδίο της Μεγαλόπολης.

Η Διπλωματική Εργασία συνοδεύεται από 3 Παραρτήματα. Στο 1<sup>ο</sup> Παράρτημα παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία από τις δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας. Στο 2<sup>ο</sup> Παράρτημα παρουσιάζονται οι φόρμες δειγματοληψίας που συμπληρώθηκαν κατά τις δειγματοληψίες στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και στη Μεγαλόπολη. Στο 3<sup>ο</sup> Παράρτημα παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών ραδιενέργειας για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$  που προέκυψαν από δύο ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ (HPGe, LEGe).

## 2 Προσδιορισμός της ραδιενέργειας σε δείγματα χώματος και σχετικές μέθοδοι στατιστικής επεξεργασίας

### 2.1 Εισαγωγή

Ο προσδιορισμός της ραδιενέργειας του εδάφους είναι ένα θέμα που παρουσιάζει ενδιαφέρον σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Παραδείγματος χάριν, η γνώση των επιπέδων ραδιενέργειας στο έδαφος είναι απαραίτητη:

- Για τον προσδιορισμό του φυσικού ραδιενεργού υποβάθρου μιας περιοχής.
- Για την επιτήρηση της καλής λειτουργίας πυρηνοληκτρικών σταθμών και σχετικών εγκαταστάσεων.
- Για τον υπολογισμό της ραδιολογικής επιβάρυνσης μιας περιοχής μετά από πυρηνικό ατύχημα.
- Για τον υπολογισμό της ραδιολογικής επιβάρυνσης μιας περιοχής εξαιτίας ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως παραδείγματος χάριν η λειτουργία θερμικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας.
- Σε επιστημονικές εφαρμογές, όπως μελέτες διάβρωσης του εδάφους και ιζηματογένεσης, με βάση το ανθρωπογενές ραδιοϊσότοπο  $^{137}\text{Cs}$  ή τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα  $^{210}\text{Pb}$  και  $^7\text{Be}$ .

Σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές είναι απαραίτητος ο κατά το δυνατόν ακριβής προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος, καθώς και η εκτίμηση της ολικής αβεβαιότητας που συνοδεύει τη μέτρηση. Στην παρούσα ΔΕ μελετήθηκε η επίδραση των μεθόδων προετοιμασίας ενός δείγματος χώματος, στη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας και στη συνολική της αβεβαιότητα.

Στις επόμενες παραγράφους του παρόντος Κεφαλαίου παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του εδάφους, καθώς και οι ιδιότητές του, οι οποίες είναι δυνατόν να επιδρούν στη συγκέντρωση των διάφορων ραδιενεργών ισοτόπων ή των διάφορων ρύπων σε αυτό. Γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των σημαντικότερων φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στο χώμα και των συνηθέστερων αιτίων ραδιολογικής του επιβάρυνσης. Ακόμα, παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνηθέστεροι ρύποι που είναι δυνατόν να εμφανίζονται στο χώμα.

Στη συνέχεια, γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση των συνηθέστερων μεθόδων δειγματοληψίας και επεξεργασίας των δειγμάτων χώματος. Δεδομένου ότι το ενδιαφέρον της ΔΕ εστιάζεται στον προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων, ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση της τεχνικής της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, η οποία είναι η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ για τον προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων, ενώ γίνεται και ιδιαίτερη αναφορά στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε.

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων από τα πειράματα που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της ΔΕ, θα χρησιμοποιηθούν αρκετά συχνά στατιστικά εργαλεία. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητο στο Κεφάλαιο αυτό να δοθούν ορισμένα βασικά στοιχεία σχετικά με την αβεβαιότητα των μετρήσεων και να παρουσιασθούν οι βασικές μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, θα παρουσιασθούν η μεθοδολογία σύγκρισης αποτελεσμάτων γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων με βάση το u-score και η μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA).

## **2.2 Γενικά στοιχεία για το χώμα**

Το χώμα, το νερό και ο αέρας αποτελούν τα τρία βασικά περιβαλλοντικά μέσα. Ως χώμα ορίζεται το σύνθετο βιογεωχημικό υλικό που σχηματίζεται στη διεπιφάνεια μεταξύ του φλοιού της γης και της ατμόσφαιρας, και το οποίο διαφέρει σημαντικά όσον αφορά στις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητές του από το υπόστρωμα των πετρωμάτων από το οποίο έχει προκύψει (Alloway 1999). Το χώμα είναι ένα στρώμα από ανόργανα σωματίδια και οργανικές ουσίες, τα οποία συχνά δημιουργούν συσσωματώματα. Τα κενά μεταξύ των σωματιδίων και των συσσωματωμάτων σχηματίζουν ένα δίκτυο πόρων, οι οποίοι είναι γεμάτοι με υδατοειδή διαλύματα και αέρια.

### **2.2.1 Περιγραφή του χώματος**

Το ανόργανο τμήμα του χώματος συντίθεται από σωματίδια, με μέγεθος που ποικίλλει από πέτρες και χαλίκια έως σκόνη. Τα σωματίδια αυτά αποκαλούνται «διακριτά στοιχεία του χώματος» και σύμφωνα με τη Διεθνή Εδαφολογική Ένωση (International Union of Soil Sciences, IUSS) διακρίνονται ανάλογα με το μέγεθος τους σε τέσσερις βασικές κατηγορίες (Παναγιωτόπουλος 1984):

- Λίθοι (gravels), μεγέθους από 2000 ως 200 μm.

- Άμμος (sand), μεγέθους από 200 ως 20  $\mu\text{m}$ .
- Ιλύς (silt), μεγέθους από 20 ως 2  $\mu\text{m}$ .
- Άργιλος (clay), μεγέθους μικρότερο από 2  $\mu\text{m}$ .

Στο κλάσμα του αργίλου κυριαρχούν τα αργιλιοπυριτικά ορυκτά, ενώ υπάρχουν σε μικρότερες συγκεντρώσεις και χαλαζίας, αιματίτης, υδραργιλίτης και οξειδία και υδροοξειδία του σιδήρου και του αργιλίου. Τα ορυκτά αυτά είναι ενεργά από φυσικοχημική άποψη και έχουν σχηματισθεί ως δευτερογενή προϊόντα της αποσάθρωσης πρωτογενών ορυκτών. Αντιθέτως, τα υπόλοιπα τρία κλάσματα αποτελούνται από αδρανή ορυκτά και θραύσματα πετρωμάτων (Παναγιωτόπουλος 1984).

Το οργανικό τμήμα του χώματος αποκαλείται χούμος (humus). Ο χούμος αποτελείται κυρίως από τα προϊόντα της αποσύνθεσης των φυτών και μεγάλο αριθμό οργανισμών, όπως είναι τα βακτήρια, οι μύκητες, τα πρωτόζωα και διάφορα είδη της μεσοπανίδας, όπως οι γεωσκώληκες.

Η συγκέντρωση του χούμου στο χώμα ποικίλλει σημαντικά, ανάλογα με την εκάστοτε περιοχή. Σε άνυδρες περιοχές δεν ξεπερνά το 1%, ενώ σε περιοχές με αυξημένα επίπεδα υγρασίας μπορεί να φτάσει το 10% της μάζας του χώματος. Ο χούμος, αν και αποτελεί μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας του χώματος, επηρεάζει τις φυσικές και χημικές ιδιότητές του, ενώ επιδρά σημαντικά και στη συμπεριφορά των ρυπαντών μέσα σε αυτό.

### **2.2.2 Φυσικές και χημικές ιδιότητες χώματος**

Τα διάφορα είδη χώματος που απαντώνται στο περιβάλλον μπορούν να περιγραφούν με βάση πλήθος ιδιοτήτων, ανάλογα και με το είδος και τη σκοπιμότητα της πραγματοποιούμενης μελέτης. Συνοπτικά αναφέρονται οι κύριες φυσικές ιδιότητες:

- Σύσταση: Είναι η αναλογία των συστατικών του εδάφους.
- Υφή: Η υφή του χώματος καθορίζεται από την αναλογία των διακριτών στοιχείων στη σύσταση του χώματος. Γενικά, το χώμα μπορεί να διακριθεί σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με την υφή του:
  - Χώμα λεπτής (fine) υφής. Η σύσταση του χώματος είναι κατά κύριο λόγο αργιλώδης, δηλαδή τα σωματίδια του είναι ιδιαίτερα λεπτόκοκκα, με διάμετρο μικρότερη από 0.002 mm. Όταν είναι υγρό

το χώμα είναι κολλώδες και εύπλαστο, ενώ στεγνό είναι σκληρό και συμπαγές.

- Χώμα τραχιάς (coarse) υφής. Το χώμα αποτελείται κυρίως από άμμο και λίθους, δηλαδή από χονδρόκοκκα σωματίδια μεγέθους από 2 ως 0.02 mm. Η υφή του είναι τραχιά, είναι λιγότερο κολλώδες και κυλάει με μεγάλη ευκολία.
- Χώμα μέσης υφής. Η αναλογία μεταξύ άμμου, ιζήματος και αργίλου είναι πιο ισορροπημένη. Η συμπεριφορά του χώματος είναι ενδιάμεση, ανάλογα και με την ακριβή σύστασή του.

Σύμφωνα με το αμερικάνικο Υπουργείο Γεωργίας μπορεί να γίνει μια πιο αναλυτική διάκριση του χώματος ανάλογα με την υφή του, διαμορφώνοντας συνολικά 12 υποκατηγορίες, οι οποίες ονομάζονται τάξεις του χώματος (Tan 1996).

Η υφή του χώματος αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του και επηρεάζει την ικανότητα αποστράγγισης και κατακράτησης του νερού, το μέγεθος και τον αριθμό των πόρων καθώς και την ανάπτυξη των φυτικών ριζών.

- Διαπερατότητα του χώματος (soil permeability): Αποτελεί μία από τις βασικότερες ιδιότητες του χώματος και σχετίζεται με τη συχνότητα και το μέγεθος των πόρων που σχηματίζονται ανάμεσα από τα σωματίδια και τα συσσωματώματα του χώματος. Πόροι με διάμετρο μεγαλύτερη από 30 μm είναι συνήθως γεμάτοι με αέρα, ενώ πόροι με διάμετρο μικρότερη από 30 μm τείνουν να συγκρατούν το νερό και άλλα υδάτινα διαλύματα. Η διαπερατότητα του χώματος καθορίζεται από πλήθος παραγόντων, όπως η υφή του (τάξη του χώματος), η διάμετρος των πόρων, η ενδεχόμενη κατεργασία του χώματος κ.ά. Η διαπερατότητα του χώματος καθορίζει την ταχύτητα με την οποία τα υγρά διαλύματα απορροφώνται από αυτό και συνεπώς επηρεάζει σημαντικά τη μεταφορά των ρύπων από την επιφάνεια στα πιο βαθιά στρώματα του χώματος (Alloway 1999).
- Πορώδες και ειδικό βάρος: Το πορώδες βάρος καθορίζεται από τον όγκο που έχουν τα διάκενα του εδάφους. Το ειδικό βάρος ορίζεται ως ο λόγος του βάρους ενός σώματος προς τον όγκο του (Σφακιανάκη 2009).

- Υγροσκοπικότητα: Η υγροσκοπικότητα αναφέρεται στην ικανότητα πρόσληψης και απόδοσης υγρασίας (Σφακιανάκη 2009).
- Ειδική θερμότητα: Αφορά στην ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του χώματος κατά 1°C. Η θερμοκρασία είναι ένας από τους συντελεστές της ανάπτυξης των φυτών και εξαρτάται από τα συστατικά του εδάφους, το χρώμα του, την υγρασία του κλπ (Σφακιανάκη 2009).

Οι βασικές χημικές ιδιότητες του χώματος είναι:

- pH: Αποτελεί μέτρο της οξύτητας μιας ουσίας. Συγκεκριμένα, εκφράζει τον αρνητικό λογάριθμο της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου. Είναι από τις σημαντικότερες ιδιότητες το χώματος και επηρεάζει σημαντικά τόσο την ανάπτυξη των φυτών, όσο και τη συμπεριφορά των ιόντων του χώματος. Το pH του χώματος συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 4 και 8.5, αν και σε διάφορα σημεία του κόσμου έχουν παρατηρηθεί ακραίες τιμές, μεταξύ 2 και 10.5. Γενικά, το χώμα σε περιοχές με έντονη υγρασία έχει τιμή pH 5 – 7, ενώ σε άνυδρες περιοχές 7 – 9 (Alloway 1999).
- Οξειδοαναγωγή: Ο όρος περιγράφει όλες τις χημικές αντιδράσεις κατά τις οποίες τα άτομα των στοιχείων που συμμετέχουν αλλάζουν αριθμό οξείδωσης. Η διαδικασία της οξειδοαναγωγής μπορεί να γίνεται σχετικά απλά και γρήγορα, όπως η οξείδωση του άνθρακα από το οξυγόνο προς διοξείδιο του άνθρακα, ή μπορεί να είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, όπως η οξείδωση της γλυκόζης στους οργανισμούς, η οποία επιτυγχάνεται μέσω πολύπλοκων διεργασιών μεταφοράς ηλεκτρονίων. Στο χώμα, η οξειδοαναγωγή επηρεάζει κυρίως τη συμπεριφορά στοιχείων όπως τα C, N, O, S, Fe, Mn. Σε μικρότερο βαθμό επηρεάζει και τα στοιχεία: Ag, As, Cr, Cu, Hg, Pb (Alloway 1999).
- Προσροφητική ικανότητα: Η συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών στο χώμα καθορίζεται από την προσροφητική ικανότητα του χώματος. Όταν ένας ρύπος επικάθεται στην επιφάνεια του χώματος, είτε αλληλεπιδρά με τα επιφανειακά σωματίδια του χώματος, είτε απομακρύνεται με το νερό της βροχής. Οι διαλυτοί ρύποι διαπερνούν το επιφανειακό χώμα και εισέρχονται στο σύστημα των πόρων του χώματος. Αντιθέτως, το αδιάλυτα και υδροφοβικά οργανικά μόρια κολλάνε στα επιφανειακά σωματίδια του χώματος, ή κινούνται με



ταχύτητα σε μεγάλο βάθος διαμέσου μεγάλων πόρων και σχισμών του εδάφους (Alloway 1999).

- Ανταλλαγή ιόντων: Ορίζεται ως η ανταλλαγή ιόντων μεταξύ δύο ηλεκτρολυτών.

### 2.2.3 Ρύπανση του εδάφους

Με τον όρο ρύπανση του εδάφους εννοείται οποιαδήποτε ανεπιθύμητη αλλαγή στα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους, η οποία είναι ή μπορεί υπό προϋποθέσεις να γίνει ζημιόγonos για τον άνθρωπο και τους υπόλοιπους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς. Ρύπανση του εδάφους συμβαίνει όταν συγκεντρώνονται σε αυτό ρυπογόνες ουσίες σε ποσότητες που αλλοιώνουν τη σύστασή του, προκαλούν βλάβες στους οργανισμούς και διαταράσσουν τα οικοσυστήματά του. Οι ρυπογόνες ουσίες συγκεντρώνονται από την ατμόσφαιρα, παραδείγματος χάριν τοξικές ουσίες που πέφτουν με τη βροχή, ή από το νερό του εδάφους (Σφακιανάκη 2009).

Οι πιο συνηθισμένες πηγές ρύπανσης του εδάφους είναι:

1. Η ατμοσφαιρική εναπόθεση. Περιλαμβάνει διάφορους ρύπους, οι οποίοι μπορεί να εκλύονται κατά τη διάρκεια πλήθους δραστηριοτήτων. Ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις είναι οι ακόλουθες:
  - Οξειδία και όξινα ανιόντα του S και του N, βαριά μέταλλα και άλλα ιχνοστοιχεία, καθώς και πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) από την καύση ορυκτών καυσίμων.
  - PAHs και Pb, από τα καυσαέρια των αυτοκινήτων.
  - As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Sb, Ti και Zn, από διαδικασίες τήξης μεταλλευμάτων για την εξαγωγή μετάλλων.
  - Cd, Cu, Pb και Zn, από βιομηχανίες που χρησιμοποιούν μέταλλα, συμπεριλαμβανομένων των χυτηρίων.
  - Οργανικοί μικρορυπαντές και Hg, από χημικές βιομηχανίες.
  - Cd, τετραχλωροδιβενζο-παρα-διοξίνες (TCDDs) και τετραχλωροδιβενζοφουράνιο (TCDFs), από τα στερεά κατάλοιπα διαδικασιών αποτέφρωσης.

- Ραδιοϊσότοπα, από πυρηνικά ή ραδιολογικά ατυχήματα, από ατμοσφαιρικές δοκιμές πυρηνικών όπλων, ως αποτέλεσμα της καύσης συμβατικών καυσίμων σε θερμικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας και ως παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών.
  - PAHs, Pb, Cr, TCDDs και TCDFs, από μεγάλες πυρκαγιές.
2. Διάφορες χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στη γεωργία, όπως:
- Οργανικά μόρια που περιέχουν χημικές ενώσεις με TCDDs, B και As, από ζιζανιοκτόνα.
  - Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, από εντομοκτόνα.
  - Cu, Zn, Hg και οργανικά μόρια, από μυκητοκτόνα.
  - Προσμίξεις Cd και U στα φωσφορικά άλατα, από λιπάσματα.
3. Διάφορα απόβλητα, που καταλήγουν με κάποιον τρόπο στο χώμα:
- As, Cu και Zn, από κοπριά.
  - Βαριά μέταλλα, οργανικοί ρύποι, PAHs και παθογόνα μικρόβια, από ιζήματα αποχέτευσης.
  - Μέταλλα και οργανικές ουσίες, από οικιακά απόβλητα.
  - $\text{SO}_4^{2-}$ , As, Cd, Cu, Pb, Zn, Ba και U, από απόβλητα ορυχείων.
  - PAHs και TCDDs, από τη στάχτη που προέρχεται από καύση ορυκτών καυσίμων, από αποτεφρώσεις και πυρκαγιές.
4. Τυχαία συσσώρευση ρύπων. Περιλαμβάνει πλήθος χημικών στοιχείων και ενώσεων, ανάλογα με την ανθρώπινη δραστηριότητα που προκάλεσε τη συσσώρευση, όπως:
- Zn, Cu και Pb, από τη διάβρωση μετάλλων που βρίσκονται σε επαφή με το χώμα.
  - PAHs, As, Cr και Cu, από ουσίες που χρησιμοποιούνται για την προστασία των ξύλων σε φράκτες κ.ά.
  - Ορυκτέλαιο, χλωριωμένοι διαλύτες και καύσιμα αεροπλάνων, από διαρροές υπόγειων δεξαμενών.

- Υδρογονάνθρακες και PAHs, από πεδία στρατιωτικών επιχειρήσεων ή ασκήσεων.
5. Εγκαταλελειμμένες βιομηχανικές μονάδες. Μπορεί να απελευθερώσουν στο χώμα διάφορους ρύπους όπως: φαινόλες, PAHs, κυανιούχα άλατα, υδρογονάνθρακες, As, Cu, Pb, Zn και Cr.

## **2.3 Ραδιενέργεια του εδάφους**

Στο έδαφος ανιχνεύεται ένα μεγάλο πλήθος ραδιενεργών ισοτόπων, η παρουσία των οποίων, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να είναι αποτέλεσμα ρύπανσης. Τα ισότοπα που ανιχνεύονται στο έδαφος μπορούν να διακριθούν σε φυσικά και τεχνητά, ανάλογα με την προέλευσή τους. Στη συνέχεια αναλύεται η διάκριση μεταξύ της φυσικής και της τεχνητής ραδιενέργειας και παρουσιάζονται συνοπτικά τα συνηθέστερα ραδιοϊσότοπα που απαντώνται στο έδαφος. Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στα ισότοπα που ανιχνεύονται στα ελληνικά εδάφη, τα οποία μελετούνται στην παρούσα ΔΕ.

### **2.3.1 Διάκριση φυσικής και τεχνητής ραδιενέργειας**

Τα ραδιενεργά ισότοπα που ανιχνεύονται στο έδαφος διακρίνονται σε φυσικά και τεχνητά ανάλογα με την προέλευσή τους.

Τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα είναι εκείνα που βρίσκονται στο περιβάλλον λόγω φυσικών διαδικασιών. Δύο είναι οι κατηγορίες φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στο γήινο περιβάλλον:

- Τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα τα οποία υπάρχουν στη γη, τόσο στο έδαφος όσο και στο υπέδαφος. Ο φλοιός και ο πυρήνας της γης αποτελούν το σημείο προέλευσης των ραδιενεργών ισοτόπων των σειρών ουρανίου, ακτινίου και θορίου, καθώς και των ισοτόπων του καλίου και του ρουβιδίου. Καθώς το μάγμα που προέρχεται από τον πυρήνα στερεοποιείται σχηματίζονται τα πυριγενή πετρώματα. Αυτά διαβρώνονται εξαιτίας χημικών και μηχανικών καταπονήσεων και υπό την επίδραση του νερού, καταλήγοντας σε χώμα. Ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος και το είδος της διάβρωσης, τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα συνήθως εντοπίζονται σε κόκκους μεγάλης πυκνότητας μαζί με τα άλλα ιχνοστοιχεία. Εξαιρέση αποτελούν το κάλιο και το ρουβίδιο, τα οποία συνήθως απομακρύνονται υπό μορφή διαλύματος (Αναγνωστάκης 2005α).

- Τα ισότοπα κοσμικής προέλευσης (cosmogenic radionuclides). Τα ισότοπα αυτά παράγονται κατά την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα, κυρίως μέσω αντιδράσεων κατακερματισμού (spallation) και σύλληψης νετρονίου. Τα σημαντικότερα από τα παραγόμενα ραδιοϊσότοπα είναι τα  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ . Μία μικρή ποσότητα ραδιενεργών ισοτόπων προστίθεται στη γη και μέσω της κοσμικής σκόνης και των μετεωριτών  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{48}\text{V}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{53,54}\text{Mn}$ ,  $^{56,57,58,60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ .

Τα τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα είναι ισότοπα τα οποία παράγονται εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες οι οποίες έχουν ως συνέπεια την παραγωγή τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων έχουν ξεκινήσει μετά το 2<sup>ο</sup> παγκόσμιο πόλεμο. Οι κυριότερες πηγές εκλύσεως τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στο περιβάλλον είναι:

- Τα πυρηνικά εργοστάσια και οι εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας πυρηνικού καυσίμου.
- Η χρήση πυρηνικών όπλων.
- Τα πυρηνικά και ραδιολογικά ατυχήματα.

## 2.3.2 Ραδιοϊσότοπα που απαντώνται στο έδαφος

### 2.3.2.1 Φυσικά ραδιενεργά ισότοπα

Τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που απαντώνται στο έδαφος είναι:

- Τα ισότοπα της ραδιενεργού σειράς του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ), με κυριότερα τα μακρόβια  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{210}\text{Pb}$ . Η ραδιενεργός σειρά αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-1.
- Τα ισότοπα της ραδιενεργού σειράς του ακτινίου ( $^{235}\text{U}$ ). Η ραδιενεργός σειρά αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-2.
- Τα ισότοπα της ραδιενεργού σειράς του θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ), με κυριότερα τα μακρόβια  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  και  $^{228}\text{Th}$ . Η ραδιενεργός σειρά αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-3.
- 22 ισότοπα τα οποία δεν ανήκουν σε καμία από τις παραπάνω σειρές. Τα περισσότερα από αυτά έχουν πολύ μεγάλους χρόνους ημιζωής και βρίσκονται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις στη φύση, με αποτέλεσμα η μελέτη τους να

μην έχει ιδιαίτερη σημασία. Από ραδιοβιολογικής απόψεως, μόνο τα ισότοπα  $^{40}\text{K}$  και  $^{87}\text{Rb}$  έχουν σημασία (Kathren 1984).

Στο έδαφος και σε όλα τα υλικά που προέρχονται από αυτό (πχ. ορυκτά) συνήθως υπάρχουν όλα τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα σε συγκεντρώσεις που ποικίλλουν ανάλογα με τη σύσταση του εδάφους. Στη βιβλιογραφία, συνήθως βρίσκονται στοιχεία για τα ισότοπα  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  και κυρίως για το  $^{226}\text{Ra}$ , το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω του αέριου θυγατρικού του ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ ). Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζονται και εργασίες που δίδουν στοιχεία και για τα ισότοπα  $^{238}\text{U}$  και  $^{210}\text{Pb}$ , αν και τα στοιχεία που διατίθενται για τα  $^{238}\text{U}$  και  $^{210}\text{Pb}$  είναι ακόμα περιορισμένα, λόγω κυρίως των δυσκολιών στον προσδιορισμό τους. Στον Πίνακα 2-1 παρουσιάζεται η μέση συγκέντρωση των ισοτόπων  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{238}\text{U}$  στο χώμα για την Ελλάδα βάση της έκθεσης του 2000 της UNSCEAR. Στον ίδιο Πίνακα παρουσιάζονται και οι παγκόσμιες μέσες τιμές (UNSCEAR 2000).

Για λόγους που θα γίνουν κατανοητοί σε επόμενο Κεφάλαιο, στα πλαίσια της ΔΕ το ενδιαφέρον εστιάστηκε στα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , και  $^{234}\text{Th}$ .

### 2.3.2.2 Τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα

Ο σημαντικότερος μηχανισμός παραγωγής τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων είναι οι σχάσεις που πραγματοποιούνται σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα, ή κατά τη διάρκεια μίας πυρηνικής έκρηξης. Κατά τη σχάση παράγεται ένα μεγάλο πλήθος τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων, με χρόνους ημιζωής που ποικίλλουν σημαντικά. Από αυτά, τα πιο σημαντικά ισότοπα είναι τα:  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ , καθώς και τα ισότοπα του καισίου ( $^{137}\text{Cs}$  &  $^{134}\text{Cs}$ ), του στρόντιου ( $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Sr}$  κ.α.) και του ιωδίου ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$  κ.α.) (Kathren 1984). Κατά τη λειτουργία πυρηνικών αντιδραστήρων παράγονται και ισότοπα του πλουτωνίου, όπως το  $^{241}\text{Pu}$ , το οποίο αποτελεί τον πατρικό πυρήνα της σειράς του ποσειδωνίου ( $^{237}\text{Np}$ ).

Οι πυρηνικές δοκιμές έχουν απελευθερώσει στο περιβάλλον (θάλασσα, έδαφος & ατμόσφαιρα) πολύ μεγάλες ποσότητες τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων. Τα ισότοπα που απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα αποτέθηκαν στη συνέχεια στο έδαφος και στη θάλασσα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, όπως έχει εκτιμηθεί (Kathren 1984), η συνολική ραδιενέργεια που έχει απελευθερωθεί από τις πυρηνικές δοκιμές είναι ίση με  $1.2 \cdot 10^{29}$  Bq προϊόντων σχάσεως. Στην τιμή αυτή δεν έχει συνυπολογιστεί η

ραδιενέργεια του  $^3\text{H}$  και του  $^{14}\text{C}$ , τα οποία παράγονται εξαιτίας της νετρονικής ενεργοποίησης.

Μετά το ατύχημα στον πυρηνοληλεκτρικό σταθμό του Chernobyl το 1986 έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες σε όλη την Ευρώπη για τον προσδιορισμό των τοπικών επιπέδων ραδιενέργειας του  $^{137}\text{Cs}$ . Μεγάλες ποσότητες του ισότοπου αυτού οι οποίες απελευθερώθηκαν κατά το ατύχημα, μεταφέρθηκαν με το πλούμιο σε μεγάλες αποστάσεις και επικάθισαν στο έδαφος, προκαλώντας σε ορισμένες περιοχές σημαντική ραδιολογική επιβάρυνση του εδάφους. Αναλυτικές πληροφορίες για το ατύχημα και την επακόλουθη εναπόθεση του  $^{137}\text{Cs}$  στα εδάφη των ευρωπαϊκών χωρών παρέχονται στο «Atlas of Caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident» (De Cort 1998). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η συνολική απόθεση του  $^{137}\text{Cs}$  στα ευρωπαϊκά εδάφη υπολογίστηκε ίση με 64 PBq. Ενδεικτικό, επίσης, είναι ότι σε ορισμένες περιοχές της Ρωσίας, Λευκορωσίας και Ουκρανίας μετρήθηκαν συγκεντρώσεις  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος που ξεπερνούσαν την τιμή 1480 kBq/m<sup>2</sup>.

Στην παρούσα ΔΕ, από τα τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα απασχόλησε μόνο το  $^{137}\text{Cs}$ , το οποίο για τα ελληνικά εδάφη θεωρείται ότι οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην απόθεση από το ατύχημα του Chernobyl.

### **2.3.3 Πηγές ραδιενεργού ρύπανσης εδάφους**

Πολλές από τις ανθρώπινες δραστηριότητες προκαλούν ραδιενεργό ρύπανση του εδάφους. Στις περισσότερες περιπτώσεις απελευθερώνεται ραδιενεργός σκόνη στην ατμόσφαιρα η οποία στη συνέχεια επικάθεται στο έδαφος. Οι κυριότερες πηγές ραδιολογικής επιβάρυνσης είναι οι ακόλουθες:

- Οι πυρηνικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο έδαφος και στον αέρα.
- Τα πυρηνικά ατυχήματα που έλαβαν χώρα σε πυρηνοληλεκτρικούς σταθμούς ενέργειας, με σημαντικότερο αυτό που συνέβη στο Chernobyl το 1986.
- Οι πυρηνικές εκρήξεις από τη χρήση των πυρηνικών βομβών στη Χιροσίμα και το Ναγκασάκι.
- Τα ραδιολογικά ατυχήματα, όπως η τήξη πηγών σε εργοστάσια ανακύκλωσης μετάλλου.
- Η χρήση βλημάτων απεμπλουτισμένου ουρανίου σε εμπόλεμες ζώνες ή σε πεδία βολής.

- Η καύση ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας σε θερμικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Η ιπτάμενη τέφρα που απελευθερώνεται από τα εργοστάσια μπορεί να έχει υψηλά επίπεδα φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων.
- Οι αποθέσεις των καταλοίπων της εξόρυξης του ουρανίου και άλλων ορυκτών με υψηλά επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας.
- Η χρήση ποτάσας και φωσφορικών λιπασμάτων στις καλλιέργειες. Τα φωσφορικά λιπάσματα έχουν υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας για τα ισότοπα  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , ενώ η ποτάσα έχει υψηλή συγκέντρωση  $^{40}\text{K}$ .
- Η χρήση αλεξικέραυνων με ραδιενεργές πηγές  $^{241}\text{Am}$  και  $^{226}\text{Ra}$ . Η χρήση τους έχει απαγορευθεί σε πολλές χώρες, αν και πολλά είναι ακόμα εγκατεστημένα.
- Άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες που ενδεχομένως έχουν ως συνέπεια παραγωγή υλικών με αυξημένα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας (TENORM, Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials)

### 2.3.4 Ραδιενέργεια των ελληνικών εδαφών

Η μελέτη της ραδιενέργειας των ελληνικών εδαφών από το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει ξεκινήσει ήδη από τη δεκαετία του 1980 (Simopoulos 1989). Μόνο στη χρονική περίοδο 1986-1999 πραγματοποιήθηκαν 7 δειγματοληψίες που κάλυψαν ολόκληρη την ηπειρωτική Ελλάδα, στις οποίες συλλέχθηκαν συνολικά 1648 δείγματα επιφανειακού χώματος (0–1 cm). Τα δείγματα αυτά συσκευάστηκαν σύμφωνα με την τυπική διαδικασία που ακολουθείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, η οποία περιγράφεται στην Παράγραφο 2.5.2. Στη συνέχεια, αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των φυσικών ισοτόπων  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  και  $^{210}\text{Pb}$  και των τεχνητών ραδιοϊσοτόπων που αποτέθηκαν στο ελληνικό έδαφος λόγω του ατύχηματος του Chernobyl. Από την ανάλυση των δειγμάτων αυτών έχει προκύψει χαρτογράφηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας φυσικών ισοτόπων στα ελληνικά εδάφη (Anagnostakis 1996) και της εναπόθεσης τεχνητών ραδιοϊσοτόπων μετά το ατύχημα του Chernobyl (Petrooulos 1996).

Από τις παραπάνω δειγματοληψίες και αναλύσεις έχει προκύψει η συγκέντρωση των φυσικών ραδιοϊσοτόπων στον ελληνικό χώρο ως εξής (Anagnostakis 1996) και (Anagnostakis 2002):

- $^{226}\text{Ra}$ :  $25 \pm 19 \text{ Bq/kg}$

- $^{228}\text{Ra}$ :  $21 \pm 16 \text{ Bq/kg}$
- $^{40}\text{K}$ :  $335 \pm 220 \text{ Bq/kg}$
- $^{238}\text{U}$ :  $40 \pm 37 \text{ Bq/kg}$
- $^{210}\text{Pb}$ :  $83 \pm 60 \text{ Bq/kg}$

Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές με αυτές που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2-1 παρατηρείται ότι σε όρους μέσων τιμών τα ελληνικά χώματα έχουν εν γένει χαμηλότερα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας, συγκριτικά με τις παγκόσμιες μέσες τιμές των παραπάνω ισοτόπων.

Όσον αφορά στην απόθεση των τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl, η μέση εναπόθεση του  $^{137}\text{Cs}$  στον ελληνικό χώρο υπολογίστηκε ίση με  $10 \text{ kBq/m}^2$ , ενώ η μέγιστη τιμή ήταν  $149 \text{ kBq/m}^2$  (Petrooulos 1996).

Στο Σχήμα 2-4 απεικονίζεται η εναπόθεση του  $^{137}\text{Cs}$  εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl σε  $\text{Bq/m}^2$  στα ελληνικά εδάφη (Petrooulos 1996), ενώ στα Σχήματα 2-5 έως 2-7 απεικονίζεται η συγκέντρωση της ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , και  $^{40}\text{K}$  σε  $\text{Bq/kg}$  στα ελληνικά επιφανειακά εδάφη (Anagnostakis 1996).

## **2.4 Δειγματοληψία χώματος**

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας του εδάφους (φυσικής ή τεχνητής) σε μία περιοχή συνήθως απαιτείται η λήψη δειγμάτων χώματος. Η διαδικασία που ξεκινά με τη συλλογή του δείγματος στο πεδίο και ολοκληρώνεται με την παραλαβή του από το αναλυτικό εργαστήριο ονομάζεται δειγματοληψία και παίζει κυρίαρχο ρόλο για την ποιότητα του αναλυτικού αποτελέσματος.

Τα δείγματα που λαμβάνονται πρέπει να είναι κατά το δυνατό αντιπροσωπευτικά της ευρύτερης περιοχής, συνεπώς πρέπει να γίνεται προσεκτική επιλογή των θέσεων δειγματοληψίας. Επίσης, ο αριθμός των δειγμάτων και το μέγεθός τους πρέπει να επαρκεί για τις ανάγκες της εκάστοτε μεθόδου ανάλυσης. Τέλος, η διαδικασία της δειγματοληψίας πρέπει να είναι κατά το δυνατό τυποποιημένη για λόγους επαναληψιμότητας του πειράματος και για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας που εισάγεται στη μέτρηση.

Στην παρούσα ΔΕ δεν γίνεται σε βάθος μελέτη της επίδρασης της δειγματοληψίας, καθώς δεν είναι το κύριο αντικείμενό της. Παρ' όλα αυτά, για λόγους πληρότητας



παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές μέθοδοι και τεχνικές δειγματοληψίας χώματος, ενώ παρουσιάζεται αναλυτικά και η διαδικασία που ακολουθείται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ.

#### **2.4.1 Γενικά στοιχεία**

Στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται αρκετές μέθοδοι δειγματοληψίας χώματος. Η επιλογή της κατάλληλης κάθε φορά μεθόδου γίνεται βάση του αριθμού των δειγμάτων που πρέπει να συλλεχθούν και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε πεδίου δειγματοληψίας. Οι βασικότερες μέθοδοι δειγματοληψίας (Scott 2008) είναι:

- Απλή τυχαία δειγματοληψία (Simple random sampling): Λαμβάνεται ορισμένος αριθμός δειγμάτων από τυχαίες θέσεις του πεδίου δειγματοληψίας, θεωρώντας ότι το πεδίο είναι σε όλη την έκτασή του ομοιόμορφο.
- Στρωματοποιημένη δειγματοληψία (Stratified random sampling): Το πεδίο δειγματοληψίας χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες που έχουν ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Από κάθε ζώνη λαμβάνεται ορισμένος αριθμός δειγμάτων από θέσεις που επιλέγονται κατά τυχαίο τρόπο.
- Συστηματική δειγματοληψία (Systematic sampling): Το πεδίο δειγματοληψίας χωρίζεται σε πλέγμα ορισμένων διαστάσεων και συλλέγεται ένα δείγμα από κάθε τμήμα του πλέγματος.
- Γενική χωρική δειγματοληψία (General spatial sampling): Θεωρούνται δύο νοητοί κάθετοι μεταξύ τους άξονες στο πεδίο δειγματοληψίας. Λαμβάνεται ορισμένος αριθμός δειγμάτων από θέσεις που βρίσκονται πάνω στους νοητούς άξονες κατά ισαπέχοντα διαστήματα.

Τα τελευταία χρόνια πολλές μελέτες έχουν ασχοληθεί με την αβεβαιότητα που εισάγεται στη μέτρηση λόγω των διάφορων παραμέτρων της διαδικασίας δειγματοληψίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη της αβεβαιότητας δειγματοληψίας που εισάγεται από τη χρήση διαφορετικού εξοπλισμού συλλογής χώματος (de Zorzi 2008). Η μελέτη αυτή απέδειξε ότι, ακόμα κι αν ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία δειγματοληψίας, η επιλογή του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την αβεβαιότητα της μέτρησης.

Αναλυτικές πληροφορίες για τις προτεινόμενες διαδικασίες δειγματοληψίας χώματος δίνονται στον οδηγό της αμερικάνικης Atomic Energy Commission (U.S. AEC 1974)

και σε παρουσιάσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του «Workshop on understanding and evaluating radioanalytical measurement uncertainty» (Trieste, 2007) υπό την αιγίδα του Διεθνή Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) και οι οποίες είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο<sup>1</sup>.

#### **2.4.2 Τυπική διαδικασία δειγματοληψίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ**

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ ακολουθεί μια τυποποιημένη διαδικασία για τη δειγματοληψία των δειγμάτων χώματος (Anagnostakis 1996). Επισημαίνεται ότι η διαδικασία αυτή ακολουθείται στην περίπτωση όπου το ζητούμενο της μελέτης είναι ο υπολογισμός της συγκέντρωσης ραδιενέργειας (φυσικής ή τεχνητής) στο επιφανειακό χώμα. Στην περίπτωση που είναι αναγκαία η λήψη χώματος από μεγαλύτερο βάθος τόσο η διαδικασία όσο και ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός διαφοροποιούνται.

Όπως αναφέρθηκε, πριν από κάθε δειγματοληψία πρέπει να γίνει προσεκτικός σχεδιασμός του πειράματος και να επιλεγθεί ο απαραίτητος αριθμός των δειγμάτων, καθώς και η μάζα καθενός από αυτά.

Επίσης, πρέπει να συλλεχθεί ο απαραίτητος εξοπλισμός. Η σωστή λειτουργία κάθε εργαλείου πρέπει να ελεγχθεί, ενώ όλα τα εργαλεία πρέπει να καθαρισθούν προσεκτικά για να αποφευχθούν φαινόμενα cross-contamination. Η διαδικασία της δειγματοληψίας αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- Κατ' αρχήν επιλέγεται με προσοχή η θέση της δειγματοληψίας, ώστε να βρίσκεται σε σημείο με όσο γίνεται πιο επίπεδο έδαφος και να μην γειτνιάζει με δέντρα. Επίσης, ανάλογα και με το σκοπό της εκάστοτε δειγματοληψίας, το χώμα στην επιλεγμένη θέση πρέπει να μην είναι διαταραγμένο, γι' αυτό επιλέγονται σημεία κατά το δυνατό ανεπηρέαστα από ανθρώπινες δραστηριότητες.
  - Με τη βοήθεια GPS λαμβάνονται οι ακριβείς συντεταγμένες της θέσης δειγματοληψίας, οι οποίες καταγράφονται στο ημερολόγιο του πειράματος, μαζί και με σχετικό σκαρίφημα της τοποθεσίας.
- Στην επιλεγμένη θέση δειγματοληψίας απομακρύνεται η επιφανειακή βλάστηση.

---

<sup>1</sup> [http://cdsagenda5.ictp.trieste.it/full\\_display.php?ida=a06186](http://cdsagenda5.ictp.trieste.it/full_display.php?ida=a06186)

- Με χρήση αξίνας απομακρύνονται οι ρίζες και οι μεγάλες επιφανειακές πέτρες.
- Συλλέγεται με το φτυάρι το επιφανειακό χώμα (βάθους 0 – 1 cm). Το χώμα τοποθετείται σε πλαστικές σακούλες για τη μεταφορά στο εργαστήριο. Κάθε δείγμα παίρνει έναν κωδικό, ο οποίος καταχωρείται σε πίνακες που περιλαμβάνουν τα βασικά στοιχεία κάθε δειγματοληψίας και κάθε δείγματος. Η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται σε κάθε δειγματοληψία εξαρτάται από το εκάστοτε πείραμα. Για παράδειγμα, για τα δείγματα επιφανειακού χώματος που συλλέγονται με σκοπό τη χαρτογράφηση φυσικής και τεχνητής ραδιενέργειας του ελληνικού χώρου, δίνεται σειριακή αρίθμηση σε μητρώο δειγμάτων το οποίο μέχρι στιγμής αριθμεί περίπου 2500 δείγματα.
- Τα δείγματα ζυγίζονται στο πεδίο ή κατά την επιστροφή στο εργαστήριο.

Η μέθοδος που αναφέρθηκε ακολουθήθηκε σε όλες τις δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ.

## **2.5 Προετοιμασία δειγμάτων**

Μετά τη συλλογή ενός δείγματος χώματος, αυτό πρέπει να υποστεί κατάλληλη επεξεργασία και να συσκευαστεί ώστε να είναι δυνατή η ανάλυσή του με την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του χώματος πρέπει να αποφευχθεί η ρύπανσή του και να παρεμποδιστούν μεταγενέστερες χημικές αντιδράσεις που ενδεχομένως θα το αλλοιώσουν. Το δείγμα πρέπει να διατηρηθεί κατά το δυνατό στην αρχική του κατάσταση, ενώ καθ' όλα τα στάδια της προετοιμασίας του δεν πρέπει να αλλοιωθούν οι ιδιότητες του. Ακόμα, κατά τη διάρκεια της συσκευασίας του χώματος πρέπει να εξασφαλιστεί ότι κάθε κλάσμα του δείγματος έχει την ίδια πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί στο τελικό δείγμα. (Tan 1996).

### **2.5.1 Μέθοδοι επεξεργασίας**

Στην παρούσα ΔΕ όλα τα δείγματα χώματος αναλύονται με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας. Συνεπώς, στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο συνηθισμένες μορφές επεξεργασίας δειγμάτων χώματος που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και βρίσκουν εφαρμογή στην προετοιμασία δειγμάτων για γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Αυτές είναι η ξήρανση, η λειοτρίβιση, το κοσκίνισμα και ο διαχωρισμός σε υπο-δείγματα.

### **2.5.1.1 Διαχωρισμός σε υπο-δείγματα**

Σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαία η ανάλυση ενός υλικού που διατίθεται σε μεγάλη ποσότητα για τον προσδιορισμό των φυσικών ή/και των χημικών ιδιοτήτων του. Η ανάλυση τέτοιων μεγάλων ποσοτήτων υλικού μπορεί να μην είναι πρακτικά δυνατή, ή να απαιτεί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα και τεράστιο κόστος. Για το λόγο αυτό λαμβάνονται από τη συνολική ποσότητα πολύ μικρότερα δείγματα, συνήθως της τάξης των κιλών ή γραμμαρίων, ακολουθώντας τυποποιημένες διαδικασίες, έτσι ώστε αυτά να είναι αντιπροσωπευτικά της αρχικής ποσότητας. Επίσης, αρκετές φορές απαιτείται η υποδιαίρεση των δειγμάτων που λαμβάνει ένα εργαστήριο για να γίνουν μετρήσεις επαναληψιμότητας ή ελέγχου της ομοιογένειας του δείγματος. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες τυποποιημένες μέθοδοι για τον διαχωρισμό δειγμάτων σκόνης στο εργαστήριο, όπως αναλυτικά παρουσιάζονται στη ΔΕ του Θ.Πέππα (Πέππας 2008).

Στην παρούσα ΔΕ όπου ήταν απαραίτητος ο διαχωρισμός ενός δείγματος χώματος σε μικρότερα υπο-δείγματα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του κώνου και της υποδιαίρεσης στα τέσσερα (cone and quartering). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το χόμα τοποθετείται πάνω σε χαρτί και διαμορφώνεται σε κατά το δυνατό συμμετρικό κώνο. Στη συνέχεια, τοποθετείται μεταλλική κατασκευή σχήματος σταυρού πάνω στον κώνο, με τρόπο ώστε το κέντρο του σταυρού να ταυτίζεται με την κορυφή του κώνου. Η κατασκευή πιέζεται προς τα κάτω, με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του δείγματος σε τέσσερα κατά προσέγγιση ίσα τμήματα. Από κάθε τμήμα συσκευάζεται και ένα υπο-δείγμα χώματος (Tan 1996).

### **2.5.1.2 Ξήρανση**

Η ξήρανση είναι μια απαραίτητη επεξεργασία δειγμάτων χώματος που πρόκειται να υποστούν γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων κάθε ισοτόπου γίνεται ανά μονάδα μάζας ξηρού υλικού. Με τον τρόπο αυτό, δείγματα που συλλέγονται από την ίδια θέση δειγματοληψίας σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, για παράδειγμα σε διαφορετικές εποχές του έτους, είναι συγκρίσιμα. Η ξήρανση επιτρέπει την προετοιμασία δειγμάτων υψηλότερης συγκέντρωσης ραδιενέργειας ανά μονάδα μάζας υλικού, κάτι που διευκολύνει τη φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλής ραδιενέργειας. Ένας άλλος λόγος για τον οποίο πρέπει να γίνεται ξήρανση του δείγματος είναι ότι ορισμένα από τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, και ιδιαίτερα αυτό της αυταπορρόφησης,

επηρεάζονται από τη χημική σύσταση του δείγματος και από το ποσοστό υγρασίας που περιέχει. Οι συντελεστές διόρθωσης αυταπορρόφησης που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση είναι υπολογισμένοι για ένα συγκεκριμένο ποσοστό υγρασίας και δεν πρέπει να εφαρμόζονται για δείγματα πολύ διαφορετικής υγρασίας. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ το ανώτατο όριο υγρασίας που θεωρείται αποδεκτό για δείγμα χώματος έχει οριστεί ίσο με 5%.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η ξήρανση δειγμάτων χώματος συνήθως πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σε ορισμένες περιπτώσεις αναφέρεται και η ξήρανση με θέρμανση σε φούρνο. Οι θερμοκρασίες θέρμανσης ποικίλλουν από 35 ως 120°C, ανάλογα με τα υπό μελέτη ισότοπα. Αντίστοιχα ποικίλλει και η διάρκεια της θέρμανσης, από μία ώρα ως και μία ολόκληρη ημέρα. Ενδεικτικά αναφέρεται:

- Στον οδηγό των Eurachem/EUROLAB/CITAC/Nordtest/AMC προτείνεται η θέρμανση σε φούρνο στους 60°C, για όλη τη νύχτα (Ramsey 2007).
- Στο εγχειρίδιο MARLAP, το οποίο εκδίδεται από την Environmental Protection Agency των ΗΠΑ, προτείνεται η θέρμανση σε φούρνο στους 60-110°C (EPA 2004).
- Στο εγχειρίδιο HASL-300, το οποίο εκδίδεται από το Department of Energy των ΗΠΑ, προτείνεται θέρμανση σε φούρνο στους 100°C, για όλη τη νύχτα (DOE 1997).
- Η ΙΑΕΑ προτείνει τη θέρμανση σε φούρνο στους 50-105°C (ΙΑΕΑ 1989).
- Τέλος, στο πρότυπο ASTM C999-05 αναφέρεται η θέρμανση σε φούρνο στους 110°C για 24 hr ή περισσότερο (ASTM 2009).

### **2.5.1.3 Σπάσιμο και λειοτρίβιση**

Για να εξασφαλιστεί η σωστή ανάμιξη των διάφορων συστατικών του χώματος, σε πολλές περιπτώσεις προτείνεται το σπάσιμο των χοντρόκοκκων σωματιδίων και στη συνέχεια λειοτρίβιση του δείγματος. Οι επιθυμητές τελικές διαστάσεις των σωματιδίων του χώματος ποικίλλουν ανάλογα με την εκάστοτε μελέτη. Ενδεικτικά αναφέρεται:

- Στη μελέτη (Van der Perk 2008), το χώμα υπέστη λειοτρίβιση μέχρι μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 100 μm.

- Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C999-05, το χώμα πρέπει να υποστεί λειοτρίβιση μέχρι μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 500  $\mu\text{m}$ .

#### **2.5.1.4 Κοσκίνισμα**

Το κοσκίνισμα είναι μία από τις πλέον συνήθεις διαδικασίες επεξεργασίας του χώματος, η οποία συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία και εφαρμόζεται για διαφορετικούς λόγους ανάλογα με την περίπτωση. Σε ορισμένες περιπτώσεις το κοσκίνισμα χρησιμοποιείται για να διευκολύνει τη διαδικασία της λειοτρίβισης. Πιο συγκεκριμένα, μετά από τη λειοτρίβιση, το δείγμα κοσκινίζεται για να διαχωριστούν τα σωματίδια που εξακολουθούν να έχουν μέγεθος μεγαλύτερο του επιθυμητού. Στη συνέχεια, το χονδρόκοκκο κλάσμα υποβάλλεται εκ νέου σε λειοτρίβιση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου όλα τα σωματίδια του χώματος μειωθούν στις επιθυμητές διαστάσεις (Tan 1996).

Σε άλλες περιπτώσεις, το χώμα κοσκινίζεται με σκοπό το διαχωρισμό του πλέον χονδρόκοκκου κλάσματος, το οποίο ανάλογα με την εκάστοτε μελέτη ορίζεται ως το κλάσμα άνω του 0.5 mm (ASTM 2009), 1 mm ή και 2 mm (Van der Perk 2008). Στη συνέχεια, το κλάσμα αυτό αφαιρείται και δεν χρησιμοποιείται στο δείγμα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται για να γίνει ευκολότερη η συσκευασία του δείγματος και να εξασφαλιστεί η ομοιογένεια του. Ακόμα, το χονδρόκοκκο κλάσμα αποτελείται από πέτρες και άλλα ξένα υλικά και αναμένεται να έχει πολύ χαμηλότερη συγκέντρωση ραδιενέργειας από τα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα του χώματος, με αποτέλεσμα να αλλοιώνει το αποτέλεσμα της μέτρησης.

#### **2.5.2 Τυπική διαδικασία προετοιμασίας δείγματος του ΕΠΤ-ΕΜΠ**

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία για την προετοιμασία δειγμάτων χώματος πριν τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση (Anagnostakis 1996). Το δείγμα απλώνεται πάνω σε χαρτί και αφήνεται να ξηρανθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ζητούμενο είναι η υγρασία του χώματος να μην ξεπερνά το 5%. Η διάρκεια της διαδικασίας αυτής κυμαίνεται ανάλογα με τη μάζα του δείγματος και την αρχική υγρασία του δείγματος από 2 μέρες έως και πάνω από μία βδομάδα. Σύμφωνα με την τυπική διαδικασία προετοιμασίας δειγμάτων χώματος του ΕΠΤ-ΕΜΠ, δεν πραγματοποιείται ομογενοποίηση, κοσκίνισμα, σπάσιμο των χονδρόκοκκων κλασμάτων, ή άλλη επεξεργασία του χώματος. Πριν την πλήρωση των δοχείων, αφαιρούνται με το χέρι μεγάλες πέτρες,

ρίζες και ξένα υλικά. Το μέγεθος των αφαιρούμενων υλικών αποφασίζεται χωρίς προκαθορισμένο κριτήριο, ανάλογα με την κρίση του δειγματολήπτη. Το αφαιρούμενο υλικό φυλάσσεται σε πλαστική σακούλα και ζυγίζεται. Ύστερα, πραγματοποιείται με το χέρι σπάσιμο των χοντρών συσσωματωμάτων, ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία της συσκευασίας.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η υγρασία του χώματος με τη βοήθεια ζυγού προσδιορισμού υγρασίας. Η αρχή λειτουργίας του ζυγού είναι η ακόλουθη: Καθορισμένη ποσότητα 10.0 gr από το επιθυμητό υλικό τοποθετείται σε ανοιχτό δοχείο. Η συσκευή χρησιμοποιεί λάμπα η οποία προκαλεί θέρμανση του υλικού και εξάτμιση του νερού. Τυπικά, ο μετρητής ρυθμίζεται σε ισχύ 5 Watt και για χρόνο 5 λεπτών. Μετά την πάροδο του επιλεγμένου χρονικού διαστήματος υπολογίζεται η ελάττωση του βάρους, η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό της υγρασίας του δείγματος που εξατμίζεται.

Η συσκευασία του χώματος γίνεται σε πλαστικά δοχεία καθορισμένων διαστάσεων. Ενδεικτικά αναφέρονται δύο συνηθισμένες γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται για δείγματα χώματος, με την κωδική ονομασία που χρησιμοποιείται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ:

- Γεωμετρία 2: Χρησιμοποιείται κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου 72 mm και ύψους 69 mm, χωρητικότητας 0.282 L. Το δοχείο γεμίζεται πλήρως.
- Γεωμετρία 5: Χρησιμοποιείται το ίδιο κυλινδρικό δοχείο, το οποίο όμως γεμίζεται μέχρι ύψος 22 mm από τον πυθμένα του δοχείου. Δεδομένου ότι τα δοχεία δεν είναι γεμάτα μέχρι πάνω, η μεταφορά των δειγμάτων γεωμετρίας 5 πρέπει να γίνεται με προσοχή, ώστε να μην μεταβάλλεται η επιθυμητή γεωμετρία του δείγματος.

Η πλήρωση των δοχείων γίνεται με προσοχή ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη κενών στο δοχείο. Το δοχείο κλείνει με βιδωτό καπάκι. Τόσο στο δοχείο όσο και στο καπάκι του αναγράφεται η κωδική ονομασία που έχει δοθεί στο δείγμα, σύμφωνα με τους κανόνες τυποποίησης που ακολουθεί το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Η ποσότητα του χώματος που δεν χρησιμοποιείται φυλάσσεται σε σακούλα, η οποία ζυγίζεται.

Στη συνέχεια το δοχείο ζυγίζεται και υπολογίζεται η καθαρή του μάζα (νωπή και ξηρή). Τα στοιχεία αυτά αναγράφονται στην καρτέλα του δείγματος, μαζί με την κωδική του ονομασία, το ποσοστό της υγρασίας του, την ημερομηνία

δειγματοληψίας, τους δειγματολήπτες του δείγματος, καθώς και όποια άλλη πληροφορία είναι σημαντική σχετικά με την επεξεργασία που υπέστη το δείγμα.

Τέλος, το δοχείο σφραγίζεται αεροστεγώς με επικάλυψη από λεπτό στρώμα κατάλληλης ρητίνης. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη ώστε να αποφευχθεί η διαφυγή των αερίων ισοτόπων του ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$  και  $^{220}\text{Rn}$ ).

Ιδιαίτερη δυσκολία παρουσιάζει το σφράγισμα των δοχείων γεωμετρίας 5, δεδομένου ότι σε αυτήν την περίπτωση το δοχείο δεν είναι γεμάτο μέχρι επάνω. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ ακολουθείται η εξής μέθοδος για το σφράγισμα των δοχείων γεωμετρίας 5:

- Κόβεται κυκλικός δίσκος διαμέτρου 72 mm από PET (πολυαιθυλένιο) πάχους 1 mm.
- Ο δίσκος αυτός τοποθετείται μέσα στο δοχείο, σε επαφή με το περιεχόμενο χρώμα (σε ύψος 22mm μέσα στο δοχείο).
- Ο δίσκος σταθεροποιείται στο εσωτερικό του δοχείου με σιλικόνη.
- Βάφεται με ρητίνη ο πλαστικός δίσκος και τα εσωτερικά τοιχώματα του δοχείου. Το δοχείο κλείνει με το καπάκι του και βάφεται και εξωτερικά.

## **2.6 γ-φασματοσκοπική ανάλυση**

Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι μία μη καταστροφική μέθοδος προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων. Η λειτουργία της βασίζεται στην επεξεργασία του φάσματος των φωτονίων που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων. Με τη γ-φασματοσκοπία επιτυγχάνεται ο ποιοτικός προσδιορισμός του είδους των πυρήνων που διασπώνται, δηλαδή του αντίστοιχου ραδιοϊσοτόπου. Ταυτόχρονα, επιτυγχάνεται και η ποσοτική εκτίμηση του πλήθους των πυρήνων που διασπώνται στη μονάδα του χρόνου, για κάθε είδος πυρήνα, η οποία τελικά οδηγεί σε εκτίμηση της ραδιενέργειας του δείγματος.

Η γ-φασματοσκοπία είναι μία από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ραδιομετρικές τεχνικές, καθώς παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα εν συγκρίσει με τις άλλες μεθόδους ανάλυσης (π.χ. α-φασματοσκοπία):

- Η πλειοψηφία των ραδιενεργών ισοτόπων που συνήθως ερευνούνται εκπέμπουν ακτίνες-γ.
- Είναι μη καταστροφική μέθοδος.



- Αναλύει ταυτόχρονα όλα τα  $\gamma$ -ραδιενεργά ισότοπα που περιέχονται σε ένα δείγμα, χωρίς να απαιτείται ειδική διαδικασία για το κάθε ένα από αυτά.
- Δεν απαιτείται σύνθετη προετοιμασία ή ραδιοχημική επεξεργασία των δειγμάτων.

### **2.6.1 Οι ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ**

Για τη  $\gamma$ -φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χόματος χρησιμοποιούνται συνήθως οι ανιχνευτές HPGe, LEGe και XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ανάλογα με τα υπό μελέτη κάθε φορά ισότοπα και το διαθέσιμο εξοπλισμό του εργαστηρίου. Στη συνέχεια δίνονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε ανιχνευτή.

Στην παρούσα ΔΕ όλα τα δείγματα αναλύθηκαν στους ανιχνευτές HPGe, LEGe και XtRa, ανάλογα με τα υπό μελέτη ισότοπα κάθε πειράματος.

#### **2.6.1.1 Ανιχνευτής HPGe**

Ο ανιχνευτής HPGe (High Purity Germanium) είναι κατασκευασμένος από γερμάνιο υψηλής καθαρότητας. Έχει σχετική απόδοση 33.8% και διακριτική ικανότητα 1.78 keV στα 1.33 MeV. Διαθέτει περίβλημα από αλουμίνιο, με αποτέλεσμα να μην είναι κατάλληλος για την ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Περιβάλλεται από ατσάλινη θωράκιση, κατασκευής της εταιρείας Gamma Products Inc. Σύμφωνα με την κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ο ανιχνευτής αυτός ονομάζεται «ανιχνευτής 2».

#### **2.6.1.2 Ανιχνευτής LEGe**

Ο ανιχνευτής LEGe (Low Energy Germanium) είναι κατασκευασμένος από γερμάνιο υψηλής καθαρότητας και είναι σχεδιασμένος για αναλύσεις φωτονίων χαμηλών ενεργειών ( $E < 200$  keV), επιτυγχάνοντας εύρος ημίσειας ύψους 0.53 keV στα 122 keV. Ο κρύσταλλός του έχει σχετικά μεγάλη επιφάνεια και μικρό πάχος, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η απόδοση αλλά και η διακριτική ικανότητα στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών. Παράλληλα, το περίβλημά του διαθέτει παράθυρο από βηρύλλιο, ώστε να ελαχιστοποιείται η απορρόφηση φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Ο ανιχνευτής περιβάλλεται από ατσάλινη θωράκιση ελληνικής κατασκευής. Ο ανιχνευτής LEGe χρησιμοποιείται με δύο διαφορετικές ρυθμίσεις ενίσχυσης:

- Σε χαμηλή ενίσχυση ο πολυκαναλικός αναλυτής καλύπτει την περιοχή 0 - 2000 keV, όπως τυπικά γίνεται στους ανιχνευτές γερμανίου. Σε

αυτή την περίπτωση, σύμφωνα με την κωδικοποίηση του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ο ανιχνευτής ονομάζεται «ανιχνευτής 3».

- Σε υψηλή ενίσχυση το φάσμα περιορίζεται στην περιοχή 0 – 200 keV. Σε αυτή την περίπτωση, σύμφωνα με την κωδικοποίηση του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ο ανιχνευτής ονομάζεται «ανιχνευτής 6».

Στην παρούσα ΔΕ ο ανιχνευτής LEGe χρησιμοποιήθηκε μόνο σε ρύθμιση 0-2000 keV (ανιχνευτής 3).

### **2.6.1.3 Ανιχνευτής XtRa**

Ο ανιχνευτή XtRa είναι ένας μεγάλος ανιχνευτής γερμανίου, με σχετική απόδοση 105%. Η διακριτική του ικανότητα είναι 2.1 keV στα 1.33 MeV. Το μέγεθος τον καθιστά κατάλληλο για αναλύσεις χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας, ενώ είναι δυνατή και η ανάλυση φωτονίων χαμηλών ενεργειών, λόγω του παράθυρού του, το οποίο είναι κατασκευασμένο από βηρύλλιο. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε θωράκιση της εταιρείας Canberra, κατασκευασμένη από ατσάλι μεγάλης ηλικίας. Σύμφωνα με την κωδικοποίηση του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ο ανιχνευτής ονομάζεται «ανιχνευτής 4».

### **2.6.2 Κώδικας φασματοσκοπικής ανάλυσης SPUNAL**

Η ανάλυση των φασμάτων που συλλέγονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ πραγματοποιείται με τη χρήση του κώδικα SPUNAL (SPectrum UNix AnaLysis), ο οποίος είναι γραμμένος σε γλώσσα FORTRAN 77 και έχει εξ' ολοκλήρου αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά του έναντι των εμπορικών προγραμμάτων γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης είναι το γεγονός ότι είναι ένας ανοικτός κώδικας που επιδέχεται τροποποιήσεων και βελτιώσεων στη δομή του.

Συνοπτικά, ο κώδικας SPUNAL εκτελεί τις εξής λειτουργίες (Πέππας 2008):

- Παρέχει δυνατότητες επικοινωνίας πολυκαναλικών αναλυτών με Η/Υ και προγράμματα μεταφοράς φασμάτων σε αρχεία Η/Υ και αντίστροφα.
- Διαθέτει προγράμματα κατάλληλα για όλων των ειδών τις βαθμονομήσεις που είναι απαραίτητες σε διατάξεις με ανιχνευτές υψηλής διακριτικής ικανότητας.
- Διαθέτει προγράμματα για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση φασμάτων που έχουν αποθηκευτεί σε αρχεία Η/Υ. Η ανάλυση συνίσταται στον εντοπισμό

απλών και πολλαπλών φωτοκορυφών, προσδιορισμό της επιφάνειας και του κεντροειδούς τους, ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων και δημιουργία λιστών τελικών αποτελεσμάτων ανάλογα με την εφαρμογή.

- Ενημερώνει αυτόματα βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εν συνεχεία στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, την ανάλυση με τη μέθοδο των fractals και τη χαρτογράφηση με ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών DBGIS (Data Base / Geographical Information System), το οποίο επίσης έχει αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

## **2.7 Αβεβαιότητα κατά τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων σε δείγματα χρώματος**

### **2.7.1 Γενικά περί αβεβαιότητας**

Η αβεβαιότητα μπορεί να οριστεί ως μια παράμετρος που συνδέεται με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης και η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσαν εύλογα να αποδοθούν στη μετρήσιμη ποσότητα (CITAC 2007).

Η ολική αβεβαιότητα της μέτρησης συνήθως οφείλεται σε πολλές διαφορετικές πηγές, οι οποίες δεν είναι απαραίτητα ανεξάρτητες μεταξύ τους. Οι αβεβαιότητες που εισάγονται από κάθε πηγή μπορούν γενικά να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες (JCGM 2008):

- Αβεβαιότητα τύπου A: Σε αυτήν την περίπτωση η εκτίμηση της αβεβαιότητας μπορεί να γίνει με στατιστική ανάλυση μιας ομάδας δεδομένων που έχουν προκύψει από επανάληψη του ίδιου πειράματος. Συνήθως, η καλύτερη εκτίμηση της αβεβαιότητας δίνεται από τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης των πειραματικών δεδομένων. Η αβεβαιότητα τύπου A συχνά αναφέρεται και ως τυχαίο σφάλμα.
- Αβεβαιότητα τύπου B: Σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της αβεβαιότητας με στατιστική ανάλυση μιας ομάδας πειραματικών δεδομένων. Η αβεβαιότητα τύπου B συχνά αναφέρεται και ως συστηματικό σφάλμα. Η εκτίμηση της αβεβαιότητας γίνεται με αξιολόγηση όλων των δυνατών σχετικών επιστημονικών δεδομένων, τα οποία ανάλογα με το πείραμα μπορεί να είναι:

- Δεδομένα που έχουν προκύψει από παλαιότερη εκτέλεση του πειράματος.
- Εμπειρική ή θεωρητική γνώση της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών και του εξοπλισμού του πειράματος.
- Επεξηγηματικές πληροφορίες που παρέχονται από τον κατασκευαστή συσκευών που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση του πειράματος.
- Δεδομένα που έχουν προκύψει από τη διαδικασία της βαθμονόμησης.
- Τιμές αβεβαιότητας για υλικά αναφοράς που παρέχονται σε εγχειρίδια, πιστοποιητικά κλπ.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο υπολογισμός του επιθυμητού μεγέθους  $Y$  δεν γίνεται άμεσα, δηλαδή με απευθείας μέτρηση του μεγέθους, αλλά προκύπτει από υπολογισμό με χρήση των τιμών ορισμένων άλλων μεγεθών  $X_1, X_2, \dots, X_N$  τα οποία έχουν προκύψει από μέτρηση, μέσω κάποιας συνάρτησης  $f$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.1).$$

Τότε, η ολική αβεβαιότητα  $u(Y)$  του μεγέθους  $Y$  θα δίνεται από τη σχέση:

$$u(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 u^2(X_i)} \quad (2.2),$$

Όπου  $u(X_i)$  η αβεβαιότητα του μεγέθους  $X_i$ .

Η Σχέση (2.2) ονομάζεται Νόμος διάδοσης της αβεβαιότητας (JCGM 2008).

### 2.7.2 Πηγές αβεβαιότητας

Κατά την πειραματική εκτίμηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας ισοτόπων σε δείγματα χώματος με τη μέθοδο της  $\gamma$ -φασματοσκοπίας, τρεις είναι οι σημαντικότερες πηγές αβεβαιότητας:

- Η διαδικασία της δειγματοληψίας. Η αβεβαιότητα που εισάγεται από τη δειγματοληψία σχετίζεται με ένα πλήθος παραγόντων όπως είναι (CITAC 2007):
  - Η χωρική ετερογένεια του χώματος.
  - Η επιλογή συγκεκριμένης μεθόδου δειγματοληψίας.

- Η επίδραση της διαδικασίας δειγματοληψίας στη σύνθεση του δείγματος.
- Η μεταφορά και συντήρηση του δείγματος μέχρι την τελική επεξεργασία του.

Επισημαίνεται ότι στην παρούσα ΔΕ δεν έγινε αναλυτική μελέτη της αβεβαιότητας που εισάγεται κατά τη δειγματοληψία. Η τιμή της εκτιμήθηκε σε ορισμένα πειράματα για λόγους σύγκρισης με την υπό μελέτη αβεβαιότητα λόγω της προετοιμασίας του δείγματος.

- Η προετοιμασία του δείγματος. Κάθε τεχνική που εφαρμόζεται για την επεξεργασία του δείγματος μπορεί να εισαγάγει αβεβαιότητα στη μέτρηση, καθώς μπορεί να προκληθεί απώλεια ή αλλοίωση του αρχικού δείγματος. Επίσης, η χρήση οποιασδήποτε μηχανής ή άλλου εξοπλισμού μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση του δείγματος, λόγω ανεπαρκούς καθαρισμού από προγενέστερη χρήση. Πιο αναλυτικά, η αβεβαιότητα που εισάγεται από την προετοιμασία σχετίζεται με τις ακόλουθες διαδικασίες (CITAC 2007):

- Ομογενοποίηση
- Διαχωρισμός σε υπο-δείγματα
- Ξήρανση
- Λειοτρίβιση
- Φαινόμενα Cross-contamination

Στην παρούσα ΔΕ μελετήθηκε αναλυτικά η επίδραση των τεσσάρων πρώτων παραγόντων στην ολική αβεβαιότητα της μέτρησης, ενώ λήφθηκαν όλα τα απαραίτητα μέτρα για αποφυγή του φαινομένου του cross-contamination του δείγματος.

- Η ανάλυση του δείγματος. Η αβεβαιότητα που εισάγεται από την ανάλυση μπορεί να εκτιμηθεί για δεδομένο ανιχνευτή και φωτοκορυφή. Η ολική αβεβαιότητα ανάλυσης μπορεί να διαχωριστεί στις ακόλουθες συνιστώσες (Πέππας 2008):

- Αβεβαιότητα προσδιορισμού επιφάνειας της φωτοκορυφής. Υπολογίζεται απευθείας από το λογισμικό και φαίνεται στα φάσματα που προκύπτουν από κάθε ανάλυση (σε επίπεδο 1.65σ).
- Αβεβαιότητα λόγω αφαίρεσης υποστρώματος.
- Αβεβαιότητα λόγω προσαρμογής της συνάρτησης βαθμονόμησης απόδοσης.
- Αβεβαιότητα λόγω του προτύπου αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση απόδοσης. Προκύπτει από το πιστοποιητικό που συνοδεύει το πρότυπο.
- Αβεβαιότητα λόγω διορθώσεων αυταπορρόφησης, η οποία λαμβάνεται υπόψη μόνο για ενέργειες φωτονίων μικρότερες των 200 keV.
- Αβεβαιότητα λόγω διορθώσεων για τα φαινόμενα true-coincidence και random-summing.

Στην παρούσα ΔΕ, για τον υπολογισμό της αβεβαιότητα ανάλυσης λήφθηκε υπ' όψιν μόνο η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής και αφαίρεσης υποστρώματος, όπως αναλύεται στην Παράγραφο 3.3.5. Οι υπόλοιπες τέσσερις συνιστώσες είναι αβεβαιότητες τύπου B, δηλαδή προσδιορίζονται με μη στατιστικές μεθόδους. Δεδομένου ότι στην παρούσα μελέτη όλες οι στατιστικές συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν δείγματα ίδιας γεωμετρίας που αναλύθηκαν φασματοσκοπικά στον ίδιο ανιχνευτή, οι αβεβαιότητες τύπου B δεν λήφθηκαν υπ' όψιν, καθώς είναι συσχετισμένες. Συνεπώς, όπου αναφέρεται αβεβαιότητα ανάλυσης εννοείται αποκλειστικά η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής συμπεριλαμβάνοντας και την αβεβαιότητα του υποστρώματος, εκτός και αν σε κάποιον υπολογισμό αναφέρεται διαφορετικά.

## **2.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων με βάση το u-score.**

Κατά την πραγματοποίηση γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων, συχνά προκύπτει η ανάγκη σύγκρισης δύο διαφορετικών μετρήσεων ενός ισότοπου. Για την πραγματοποίηση του ελέγχου αυτού, και με βάση τη στατιστική Poisson των πυρηνικών μετρήσεων, μπορούμε να θεωρήσουμε προσεγγιστικά ότι η μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας του ισότοπου στο δείγμα αποτελεί τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή.

Σύμφωνα με τη λογική αυτή, οι μετρήσεις  $X_1$ ,  $X_2$  που πρόκειται να συγκριθούν, θεωρείται ότι προέρχονται από κανονικές κατανομές με μέσες τιμές  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  και τυπικές αποκλίσεις  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ . Με την παραδοχή ότι οι τυπικές αποκλίσεις  $s_1$ ,  $s_2$  οι οποίες προκύπτουν από την ανάλυση του φάσματος, αποτελούν καλή εκτίμηση των  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , οι δύο μετρήσεις μπορούν να συγκριθούν με βάση την ακόλουθη μεταβλητή (Σιμόπουλος 1989):

$$z_0 = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}} \quad (2.3)$$

Οι υποθέσεις του στατιστικού τεστ είναι οι ακόλουθες:

Μηδενική υπόθεση:  $H_0 : X_1 = X_2$

Εναλλακτική υπόθεση:  $H_1 : X_1 \neq X_2$

Επισημαίνεται ότι η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων ασκήσεων διασύγκρισης γ-φασματοσκοπικών μετρήσεων (Fajgelj 2007, Arinc 2004). Στις αναλύσεις αυτές, και για να αποφεύγεται η σύγχυση μεταξύ των διαφόρων χρησιμοποιούμενων στατιστικών παραμέτρων, η μεταβλητή ελέγχου συμβολίζεται με το γράμμα  $u$  και αναφέρεται ως «u-score». Η σύμβαση αυτή ακολουθείται και στο κείμενο της παρούσης ΔΕ.

Ορίζοντας επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha_1=1\%$  για την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης και  $\alpha_2 = 5\%$  για την αποδοχή, για δίπλευρο έλεγχο τα όρια της κρίσιμης περιοχής προκύπτουν από τους πίνακες της κανονικής κατανομής (Σιμόπουλος 1989) ως εξής:

- Η μηδενική υπόθεση γίνεται αποδεκτή και οι δύο μετρήσεις θεωρείται ότι συμπίπτουν όταν  $|u| < 1.96$ .
- Η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και οι δύο μετρήσεις θεωρείται ότι διαφέρουν όταν  $|u| > 2.58$ .
- Στην περιοχή αβεβαιότητας  $1.96 < |u| < 2.58$ , ο έλεγχος δεν μπορεί να καταλήξει σε αξιόπιστο συμπέρασμα.

## 2.9 Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)

### 2.9.1 Γενικά στοιχεία

Η ανάλυση της διακύμανσης (ANalysis Of VAriance – ANOVA) είναι μία στατιστική μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων, με την οποία η αβεβαιότητα που υπάρχει σε ένα σύνολο δεδομένων διασπάται στις επιμέρους συνιστώσες της, με στόχο την κατανόηση της σημαντικότητας των διαφορετικών πηγών της αβεβαιότητας.

Στόχος κάθε στατιστικού πειράματος είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών πάνω στην υπό μελέτη εξαρτημένη μεταβλητή. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές αναφέρονται συνήθως σαν παράγοντες (factors) και μπορεί να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές. Οι διακριτές τιμές του παράγοντα που μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε στο πείραμα λέγονται επίπεδα (levels). Για κάθε επίπεδο έχουμε έναν ορισμένο αριθμό παρατηρήσεων (observations ή replicates).

Επισημαίνεται ότι, για να αποφευχθεί η επίδραση άσχετων παραγόντων στο πείραμα, πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια ώστε όλες οι μη ελεγχόμενες παράμετροι (π.χ. σειρά πραγματοποίησης δοκιμών) να επιλέγονται κατά τυχαίο τρόπο. Ένα τέτοιο πείραμα ονομάζεται πλήρως τυχαιοποιημένο πείραμα (completely randomized experiment).

### 2.9.2 Κατανομή F

Αν  $X_1$  και  $X_2$  είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κατανομή  $\chi^2$  με βαθμούς ελευθερίας  $\nu_1$  και  $\nu_2$  αντίστοιχα, τότε το κλάσμα  $W = \frac{X_1/\nu_1}{X_2/\nu_2}$  είναι τυχαία

μεταβλητή που ακολουθεί κατανομή F. Η κατανομή αυτή χαρακτηρίζεται από δύο βαθμούς ελευθερίας,  $\nu_1$  για τον αριθμητή και  $\nu_2$  για τον παρονομαστή, για αυτό γράφουμε  $F_{\nu_1, \nu_2}$ .

Για τη σύγκριση των διακυμάνσεων δύο πληθυσμών χρησιμοποιούνται οι δειγματικές διακυμάνσεις  $s_1^2$  και  $s_2^2$ . Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το κλάσμα  $VR = \frac{s_1^2/\sigma_1^2}{s_2^2/\sigma_2^2}$

(λόγος δύο  $\chi^2$ ), όπου  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  οι πραγματικές διακυμάνσεις των πληθυσμών, οι οποίες συνήθως δεν είναι γνωστές. Για τον έλεγχο διατυπώνεται η μηδενική υπόθεση

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2,$$



Και η εναλλακτική:

$$H_1 : \sigma_1^2 > \sigma_2^2$$

Υπό τη μηδενική υπόθεση, η τυχαία μεταβλητή  $VR = \frac{s_1^2}{s_2^2}$  ακολουθεί την κατανομή

$F_{(v_1-1), (v_2-1)}$ . Η κρίσιμη περιοχή για την αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης σε στάθμη σημαντικότητας  $\alpha$  δίνεται από την ανίσωση:

$$F_0 < F_{(v_1-1), (v_2-1), \alpha} \quad (2.4),$$

Όπου το  $F_{(v_1-1), (v_2-1), \alpha}$  προκύπτει από κατάλληλους στατιστικούς πίνακες.

### 2.9.3 Ανάλυση της διακύμανσης κατά ένα παράγοντα

Από τους υπάρχοντες πειραματικούς σχεδιασμούς ο απλούστερος είναι εκείνος που χαρακτηρίζεται από την ανάλυση της διακύμανσης κατά ένα παράγοντα (one factor ANOVA).

#### 2.9.3.1 Προσδιορισμός μοντέλου

Στη γενική περίπτωση υποτίθεται ότι υπάρχουν  $k$  επίπεδα με  $n_j$  παρατηρήσεις ανά επίπεδο για  $j = 1, \dots, k$ . Συμβολίζεται με  $X_{ij}$  την  $i$  παρατήρηση του  $j$  επιπέδου.

Ορίζονται τα ακόλουθα βασικά μεγέθη:

- $T_{\cdot j} = \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}$ , το άθροισμα των παρατηρήσεων του  $j$  επιπέδου
- $\bar{X}_{\cdot j} = \frac{T_{\cdot j}}{n_j}$ , ο αριθμητικός μέσος του  $j$  επιπέδου
- $T_{\cdot\cdot} = \sum_{j=1}^k T_{\cdot j} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}$ , το άθροισμα όλων των παρατηρήσεων
- $\bar{X}_{\cdot\cdot} = \frac{T_{\cdot\cdot}}{N}$ , ο αριθμητικός μέσος όλων των παρατηρήσεων,

$$\text{όπου } N = \sum_{j=1}^k n_j .$$

Γίνεται η υπόθεση ότι για το  $j$  επίπεδο οι παρατηρήσεις  $X_{ij}$  έχουν την μορφή

$$X_{ij} = \mu_j + e_{ij} \quad (2.5),$$

όπου  $\mu_j$  είναι ο μέσος όρος του πληθυσμού του  $j$  επιπέδου και  $e_{ij}$  είναι η διαφορά της  $i$  παρατήρησης του  $j$  επιπέδου από τη μέση τιμή του επιπέδου για  $i = 1, \dots, n$  και  $j = 1, \dots, k$ . Ο όρος  $e_{ij}$  εκφράζει τη μη ελεγχόμενη διακύμανση που υπάρχει στον πληθυσμό και στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται και ως «error». Επισημαίνεται ωστόσο ότι ο όρος error καλό είναι να αποφεύγεται σε μετρητικές εφαρμογές, καθώς δημιουργεί σύγχυση με την αβεβαιότητα του μετρούμενου μεγέθους που επίσης αναφέρεται ως σφάλμα στην παλαιότερη βιβλιογραφία.

Λύνοντας την (2.5) ως προς  $e_{ij}$  προκύπτει:

$$e_{ij} = X_{ij} - \mu_j \quad (2.6).$$

Ο γενικός μέσος όρος (grand mean)  $\mu$  όλων των παρατηρήσεων είναι:

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \mu_j \quad (2.7).$$

Με την ίδια λογική που το  $X_{ij}$  διαφέρει από το  $\mu_j$ , μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το  $\mu_j$  διαφέρει από το  $\mu$  κατά ένα ποσό:

$$\tau_j = \mu_j - \mu \quad (2.8),$$

που εκφράζει την επίδραση του επιπέδου  $j$  του παράγοντα στο εξεταζόμενο μέγεθος. Από τη σχέση (2.8), λύνοντας ως προς  $\mu_j$  προκύπτει:

$$\mu_j = \mu + \tau_j \quad (2.9).$$

Συνδυάζοντας τη (2.5) με τη (2.9) προκύπτει η τελική έκφραση:

$$X_{ij} = \mu + \tau_j + e_{ij} \quad (2.10),$$

για  $i = 1, \dots, n$  και  $j = 1, \dots, k$ .

Προκύπτει επομένως από τη Σχέση (2.10) ότι η παρατήρηση  $X_{ij}$  είναι άθροισμα τριών ποσοτήτων, του καθολικού μέσου, της επίδρασης του επιπέδου και της μη ελεγχόμενης διακύμανσης.

### 2.9.3.2 Υποθέσεις μοντέλου

Οι υποθέσεις που διέπουν το μοντέλο που περιγράφεται από τη Σχέση (2.10) είναι:

- Οι παρατηρήσεις  $X_{ij}$  κάθε επιπέδου αποτελούν  $k$  ανεξάρτητα δείγματα από αντίστοιχους πληθυσμούς.

- Καθένας από τους  $k$  πληθυσμούς ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή  $\mu_j$  και κοινή διακύμανση  $\sigma^2$ , για  $j = 1, \dots, k$ .
- Οι επιδράσεις των επιπέδων  $\tau_j$  είναι σταθεροί αριθμοί που ικανοποιούν τη σχέση:  $\sum_{j=1}^k \tau_j = 0$ .

Από τη Σχέση (2.6) και τις παραπάνω υποθέσεις προκύπτει ότι τα  $e_{ij}$  είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές από την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και διακύμανση  $\sigma^2$ .

### 2.9.3.3 Έλεγχος υποθέσεων

Όπως προηγουμένως υποτέθηκε, για κάθε επίπεδο οι πληθυσμοί έχουν ίσες μέσες τιμές. Εφ' όσον η υπόθεση αυτή ισχύει, τότε προκύπτει άμεσα από τη Σχέση (2.8) ότι οι επιδράσεις  $\tau_j$  των επιπέδων θα είναι μηδέν. Συνεπώς, για να ελεγχθεί η υπόθεση πρέπει να πραγματοποιηθεί στατιστικό τεστ με τις ακόλουθες υποθέσεις:

$$H_0 : \tau_j = 0, j = 1, \dots, k$$

$$H_1 : \tau_j \neq 0, \text{ για ένα τουλάχιστον } j.$$

### 2.9.3.4 Υπολογισμός των αθροισμάτων των τετραγώνων

Στα πλαίσια της ανάλυσης ANOVA, η μεταβλητότητα, η οποία ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των παρατηρήσεων από τη μέση τιμή τους, αναφέρεται και ως Άθροισμα Τετραγώνων (Sum of Squares) και συμβολίζεται με  $SS$ .

Αρχικά υπολογίζεται το Ολικό Άθροισμα Τετραγώνων (Total Sum of Squares -  $SS_{total}$ ) των αποκλίσεων των παρατηρήσεων από τον καθολικό μέσο:

$$SS_{total} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{..})^2 \quad (2.11),$$

Αθροίζοντας τις τετραγωνικές αποκλίσεις αρχικά μέσα σε κάθε επίπεδο και στη συνέχεια για τα  $k$  επίπεδα. Το  $SS_{total}$  μπορεί να διασπαστεί στις επιμέρους συνιστώσες του χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη έκφραση:

$$SS_{total} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [(X_{ij} - \bar{X}_{\cdot j}) + (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{..})]^2 =$$

$$= \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\cdot j})^2 + 2 \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{..}) + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{..})^2 \quad (2.12).$$

Ο μεσαίος όρος της (2.12) γράφεται:

$$2 \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\cdot j})(\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{..}),$$

από όπου προκύπτει ότι είναι ίσος με μηδέν, διότι:

$$\sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\cdot j}) = 0.$$

Τελικά η Σχέση (2.12) μπορεί να γραφτεί ισοδύναμα:

$$SS_{total} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\cdot j})^2 + \sum_{j=1}^k n_j (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{..})^2 \quad (2.13).$$

Στην περίπτωση που το πλήθος των παρατηρήσεων είναι ίσο με  $n$  για όλα τα επίπεδα η Σχέση (2.13) γράφεται:

$$SS_{total} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\cdot j})^2 + n \sum_{j=1}^k (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{..})^2 \quad (2.14)$$

Το πρώτο άθροισμα στο δεξιό πλευρό της (2.13) υπολογίζει αρχικά το άθροισμα των τετραγωνισμένων αποκλίσεων των παρατηρήσεων από το μέσο κάθε επιπέδου και κατόπιν αθροίζει τα επιμέρους αποτελέσματα για όλα τα επίπεδα. Το αποτέλεσμα της άθροισης αυτής λέγεται Άθροισμα Τετραγώνων Μέσα στο Επίπεδο (Within Groups Sum of Squares –  $SS_{within}$ )

$$SS_{within} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\cdot j})^2 \quad (2.15).$$

Το δεύτερο άθροισμα στο δεξιό πλευρό της (2.13) υπολογίζει αρχικά για κάθε επίπεδο την τετραγωνισμένη απόκλιση του μέσου του επιπέδου από τον καθολικό μέσο και κατόπιν πολλαπλασιάζει το αποτέλεσμα με το πλήθος των παρατηρήσεων του επιπέδου. Τα επιμέρους αποτελέσματα αθροίζονται για όλα τα επίπεδα και το τελικό αποτέλεσμα λέγεται Άθροισμα Τετραγώνων Μεταξύ Μέσων Τιμών (Between Groups Sum of Squares –  $SS_{between}$ ), το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$SS_{between} = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{\cdot\cdot})^2 \quad (2.16),$$

ενώ στην περίπτωση που όλα τα επίπεδα έχουν  $n$  παρατηρήσεις προκύπτει:

$$SS_{between} = n \sum_{j=1}^k (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{\cdot\cdot})^2 \quad (2.17).$$

### 2.9.3.5 Εκτιμητές διακύμανσης $\sigma^2$

Από τα αθροίσματα των τετραγώνων που υπολογίσθηκαν είναι δυνατόν να υπολογισθούν δύο εκτιμητές της διακύμανσης  $\sigma^2$  του πληθυσμού. Αποδεικνύεται ότι όταν οι μέσες τιμές των πληθυσμών των  $k$  επιπέδων είναι ίσες, τότε τα  $SS_{within}$  και  $SS_{between}$  διαιρούμενα με τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας αποτελούν αμερόληπτους εκτιμητές του  $\sigma^2$ .

#### 1<sup>ος</sup> Εκτιμητής:

Μέσα στο  $j$  επίπεδο το μέσο τετράγωνο (Mmean Square) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$MS_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\cdot j})^2}{n_j - 1} \quad (2.18).$$

Το μέσο τετράγωνο δίνει έναν αμερόληπτο εκτιμητή για τη διακύμανση του αντίστοιχου επιπέδου. Κάτω από την υπόθεση ότι οι διακυμάνσεις όλων των επιπέδων είναι ίσες, μπορούμε να συγχωνεύσουμε τους  $k$  εκτιμητές και να πάρουμε έναν εκτιμητή για τη διακύμανση μέσα στα επίπεδα (Within Groups Variance) σύμφωνα με τον τύπο του μέσου τετραγώνου:

$$MS_{within} = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\cdot j})^2}{k(n-1)} = \frac{SS_{within}}{k(n-1)} \quad (2.19).$$

Στη γενική περίπτωση που το πλήθος των παρατηρήσεων των επιπέδων δεν είναι ίδιο, ο αμερόληπτος εκτιμητής για το  $\sigma^2$  έχει τη μορφή:

$$MS_{within} = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\cdot j})^2}{\sum_{j=1}^k n_j - 1} \quad (2.20).$$

2<sup>ος</sup> Εκτιμητής:

Ο δεύτερος εκτιμητής του  $\sigma^2$  προκύπτει από το γνωστό τύπο για τη διακύμανση του δειγματικού μέσου ενός δείγματος με  $n$  παρατηρήσεις:

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma^2}{n} \Rightarrow \sigma^2 = n \cdot \sigma_x^2 \quad (2.21).$$

Ένας αμερόληπτος εκτιμητής του  $\sigma_x^2$ , που είναι η διακύμανση μεταξύ των επιπέδων (Between Groups Variance), προκύπτει από το μέσο τετράγωνο:

$$MS_x = \frac{\sum_{j=1}^k (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{\cdot\cdot})^2}{k-1} \quad (2.22).$$

Συνεπώς, στην ειδική περίπτωση που όλα τα επίπεδα έχουν  $n$  παρατηρήσεις ένας αμερόληπτος εκτιμητής για το  $\sigma^2$  είναι:

$$MS_{between} = \frac{n \sum_{j=1}^k (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{\cdot\cdot})^2}{k-1} = \frac{SS_{between}}{k-1} \quad (2.23).$$

Στη γενική περίπτωση που το πλήθος των παρατηρήσεων των επιπέδων δεν είναι ίδιο, ο αμερόληπτος εκτιμητής για το  $\sigma^2$  έχει τη μορφή:

$$MS_{between} = \frac{\sum_{j=1}^k n_j (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X}_{\cdot\cdot})^2}{k-1} \quad (2.24).$$

### 2.9.3.6 Τεστ F

Όταν η μηδενική υπόθεση  $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$  της Παραγράφου 2.9.3.3 επαληθεύεται, τότε αναμένεται οι δύο εκτιμητές του  $\sigma^2$  να είναι περίπου ίσοι. Όταν η μηδενική υπόθεση δεν ισχύει, και επομένως οι μέσες τιμές των πληθυσμών των επιπέδων διαφέρουν, τότε αναμένεται το  $MS_{between}$  να είναι μεγαλύτερο από το  $MS_{within}$ . Για το λόγο αυτό και προκειμένου να συγκριθούν οι δύο εκτιμητές του  $\sigma^2$  υπολογίζεται ο λόγος των διακυμάνσεων (Variance Ratio -VR):

$$VR = \frac{MS_{between}}{MS_{within}} \quad (2.25).$$

Επειδή το  $VR$  είναι λόγος δύο τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν κατανομή  $\chi^2$ , θα ακολουθεί την κατανομή  $F$  με βαθμούς ελευθερίας αριθμητή  $(k-1)$  και βαθμούς ελευθερίας παρονομαστή ίσους με:

$$\sum_{j=1}^k (n_j - 1) = \sum_{j=1}^k n_j - k = N - k \quad (2.26).$$

Η κρίσιμη τιμή της κατανομής  $F_{(k-1),(N-k),\alpha}$  είναι το σημείο εκείνο για το οποίο ισχύει  $P(F_{(k-1),(N-k)} > F_{(k-1),(N-k),\alpha}) = \alpha$  και βρίσκεται από πίνακες της κατανομής  $F$ .

Για συγκεκριμένο επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$  συγκρίνεται η υπολογισμένη τιμή  $VR$  με την  $F_{(k-1),(N-k),\alpha}$ . Όταν  $VR > F_{(k-1),(N-k),\alpha}$ , η  $H_0$  δεν γίνεται αποδεκτή με βάση τα δεδομένα του δείγματος.

### 2.9.3.7 Τελική παρουσίαση βασικών μεγεθών ανάλυσης διακύμανσης κατά ένα παράγοντα

Βάση των όσων αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, συνοψίζονται τα βασικά μεγέθη που πρέπει να υπολογιστούν κατά την ανάλυση διακύμανσης κατά ένα παράγοντα στον Πίνακα 2-2 (Montgomery 2007). Επισημαίνεται ότι στον Πίνακα αυτό, όπως και σε όλες τις εφαρμογές της μεθόδου ANOVA στην παρούσα ΔΕ, ο λόγος των διακυμάνσεων  $VR$ , συμβολίζεται με  $F_0$ .

### 2.9.3.8 Διαχωρισμός ολικής αβεβαιότητας μέτρησης στις επιμέρους συνιστώσες της

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.9.1, με τη μέθοδο ANOVA είναι δυνατό να διασπαστεί η αβεβαιότητα που υπάρχει σε ένα σύνολο δεδομένων στις επιμέρους συνιστώσες της. Στην απλούστερη περίπτωση που το πείραμα έχει μόνο δύο επίπεδα, η οποία θα μας απασχολήσει στην παρούσα ΔΕ, η ολική αβεβαιότητα των δεδομένων δίνεται από τη σχέση:

$$s_{total}^2 = s_{between}^2 + s_{within}^2 \quad (2.27).$$

Αποδεικνύεται ότι στην περίπτωση που το  $F$  test που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.9.3.6 αποτύχει, οι επιμέρους αβεβαιότητες του πειράματος μπορούν να υπολογιστούν από τις ακόλουθες σχέσεις (Montgomery 2007):

$$MS_{between} = n \cdot s_{between}^2 + s_{within}^2 \Rightarrow s_{between} = \sqrt{\frac{MS_{between} - s_{within}^2}{n}} \quad (2.28)$$

$$MS_{within} = s_{within}^2 \Rightarrow s_{within} = \sqrt{MS_{within}} \quad (2.29),$$

Όπου  $n$  ο αριθμός των παρατηρήσεων κάθε επιπέδου, ενώ τα  $MS_{within}$  και  $MS_{between}$  υπολογίζονται από τις Σχέσεις (2.29) και (2.23) αντίστοιχα.

#### 2.9.4 Ανάλυση της διακύμανσης κατά δύο παράγοντες

Στη γενικότερη περίπτωση που απαιτείται η εξέταση της επίδρασης δύο διαφορετικών παραγόντων εφαρμόζεται η μέθοδος της ανάλυση της διακύμανσης κατά δύο παράγοντες (two factor ANOVA).

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτήν που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.9.3 για την ανάλυση διακύμανσης κατά ένα παράγοντα. Θεωρείται πείραμα με δύο παράγοντες A και B, που έχουν  $a$  και  $b$  επίπεδα αντίστοιχα. Για λόγους απλούστευσης θα θεωρηθεί ίσος αριθμός παρατηρήσεων  $n$  σε κάθε περίπτωση. Συνοπτικά, οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την περίπτωση για το ολικό άθροισμα τετραγώνων είναι:

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (X_{ijk} - \bar{X} \dots)^2 = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_{within} \quad (2.30).$$

Στη Σχέση (2.30) η διακύμανση των παρατηρήσεων που οφείλεται στον παράγοντα A ισούται με:

$$SS_A = bn \sum_{i=1}^a (\bar{X}_{i..} - \bar{X} \dots)^2 \quad (2.31),$$

η διακύμανση των παρατηρήσεων που οφείλεται στον παράγοντα B ισούται με:

$$SS_B = an \sum_{j=1}^b (\bar{X}_{.j.} - \bar{X} \dots)^2 \quad (2.32),$$

η διακύμανση των παρατηρήσεων που οφείλεται στην αλληλεπίδραση των παραγόντων A και B ισούται με:

$$SS_{AB} = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{X}_{ij.} - \bar{X}_{i..} - \bar{X}_{.j.} + \bar{X} \dots)^2 \quad (2.33)$$

και η μη ελεγχόμενη διακύμανση των παρατηρήσεων ισούται με:

$$SS_{within} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (X_{ijk} - \bar{X}_{ij.})^2 \quad (2.34).$$



Οι σχέσεις για τα μέσα τετράγωνα θα είναι αντίστοιχα:

$$MS_A = \frac{SS_A}{a-1} \quad (2.35),$$

$$MS_B = \frac{SS_B}{b-1} \quad (2.36),$$

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)} \quad (2.37)$$

$$MS_{within} = \frac{SS_{within}}{ab(n-1)} \quad (2.38).$$

Στον Πίνακα 2-3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα βασικά μεγέθη της ανάλυσης διακύμανσης κατά δύο παράγοντες (Montgomery 2007).

### 2.9.5 Εφαρμογή της μεθόδου ANOVA σε περιβαλλοντικές αναλύσεις

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές της χρήσης της μεθόδου ANOVA κατά τη στατιστική ανάλυση δεδομένων που έχουν προκύψει από περιβαλλοντικές μελέτες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη της αβεβαιότητας που οφείλεται στη φυσική επεξεργασία δειγμάτων φράουλας (Lyn 2003). Σκοπός της μελέτης αυτής ήταν η εκτίμηση της αβεβαιότητας που εισάγεται από τη φυσική επεξεργασία δειγμάτων φράουλας τα οποία αναλύονται με χημικές μεθόδους, για να προσδιοριστεί η ενδεχόμενη συγκέντρωση φυτοφαρμάκων.

Ένα αρχικό δείγμα από φράουλες χωρίστηκε σε δυο υπο-δείγματα, κάθε ένα από τα οποία υπέστη διαφορετική φυσική επεξεργασία. Στη συνέχεια, τα δύο υπο-δείγματα χωρίστηκαν εκ νέου σε δύο υπο-δείγματα και όλα αναλύθηκαν με την ίδια χημική μέθοδο για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων 20 συνηθισμένων φυτοφαρμάκων.

Το πείραμα αυτό αναλύθηκε με τη μέθοδο ANOVA κατά ένα παράγοντα, θεωρώντας ως μοναδικό παράγοντα τη φυσική επεξεργασία, η οποία έχει δύο επίπεδα. Κάθε επίπεδο περιλαμβάνει δύο παρατηρήσεις, τα δύο τελικά υπο-δείγματα που υπέστησαν χημική ανάλυση. Η συνολική αβεβαιότητα της μέτρησης χωρίζεται στην αβεβαιότητα λόγω επεξεργασίας και στην αβεβαιότητα της ανάλυσης. Βάση των Σχέσεων (2.28) και (2.29) της Παραγράφου 2.9.3.8, η αβεβαιότητα της φυσικής επεξεργασίας των δειγμάτων διαχωρίστηκε από τη συνολική αβεβαιότητα της μέτρησης και εκτιμήθηκε αριθμητικά, αποδεικνύοντας ότι και η φυσική προετοιμασία δειγμάτων που

αναλύονται με χημική μέθοδο μπορεί να εισαγάγει σημαντική αβεβαιότητα, σε ορισμένες περιπτώσεις συγκρίσιμη με αυτή της χημικής ανάλυσης.

### **2.9.6 Εφαρμογή της μεθόδου ANOVA στην παρούσα ΔΕ**

Στην παρούσα ΔΕ η μέθοδος ANOVA χρησιμοποιήθηκε για δύο λόγους:

- Η ανάλυση κατά ένα παράγοντα χρησιμοποιήθηκε κατ' αρχήν για να συγκριθεί η μέση τιμή διαφορετικών ομάδων υπο-δειγμάτων. Στη συνέχεια, βάση των όσων αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 2.9.3.8, η υπό μελέτη αβεβαιότητα προετοιμασίας δειγμάτων χόματος διαχωρίστηκε από τις άλλες πηγές αβεβαιότητας. Τέλος, πραγματοποιήθηκε αριθμητική εκτίμηση της αβεβαιότητας προετοιμασίας.
- Η ανάλυση κατά δύο παράγοντες χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση της μέσης τιμής άνω των δύο ομάδων δειγμάτων, διαδικασία που με εφαρμογή άλλων στατιστικών τεστ θα ήταν επίπονη και χρονοβόρα. Η ανάλυση αυτή παρουσιάζεται στο Παράρτημα 3.

## Πίνακες κεφαλαίου

Πίνακας 2-1: Συγκέντρωση ραδιενέργειας χόματος των ισοτόπων  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{226}\text{Ra}$

Περιοχή	Συγκέντρωση ραδιενέργειας (Bq/kg)			
	$^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{238}\text{U}$
	Μέση τιμή	Μέση τιμή	Μέση τιμή	Μέση τιμή
Ελλάδα	360	21	25	25
Παγκοσμίως	400	30	35	35

Πίνακας 2-2: Υπολογισμός βασικών μεγεθών ανάλυσης ANOVA κατά ένα παράγοντα

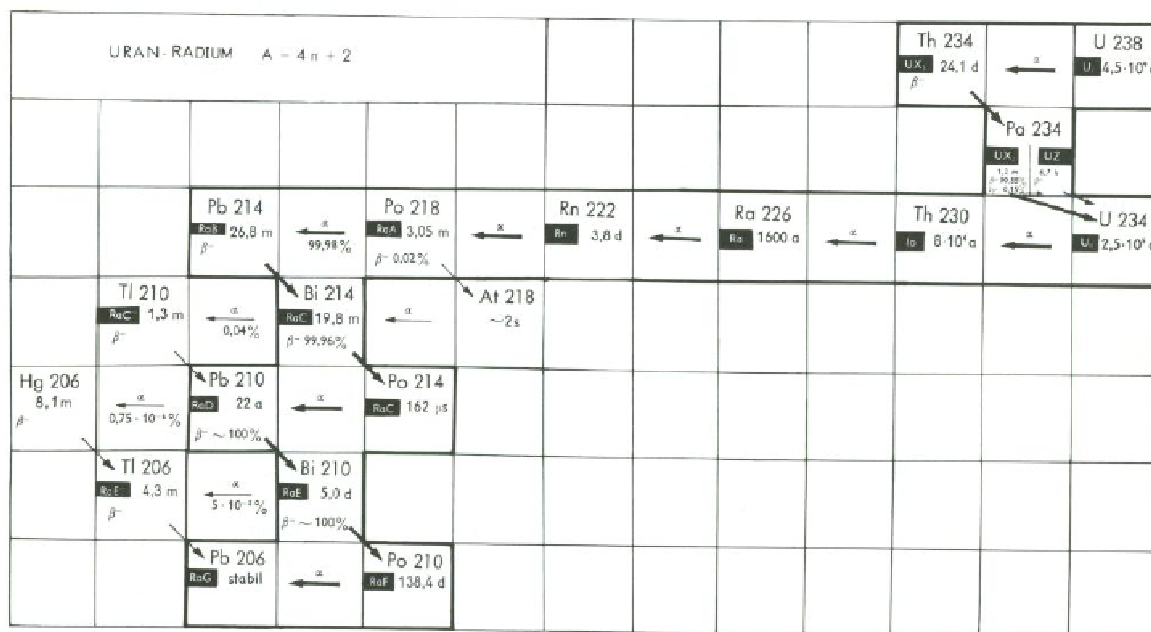
Πηγή αβεβαιότητας	Αθροίσματα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσα τετράγωνα	$F_0$
Υπό εξέταση παράγοντας	$SS_{\text{between}}$	k-1	$MS_{\text{between}}$	$\frac{MS_{\text{between}}}{MS_{\text{within}}}$
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	$SS_{\text{within}}$	k(n-1)	$MS_{\text{within}}$	
Ολικό	$SS_{\text{total}}$	kn-1		

Πίνακας 2-3: Υπολογισμός βασικών μεγεθών ανάλυσης ANOVA κατά ένα παράγοντα

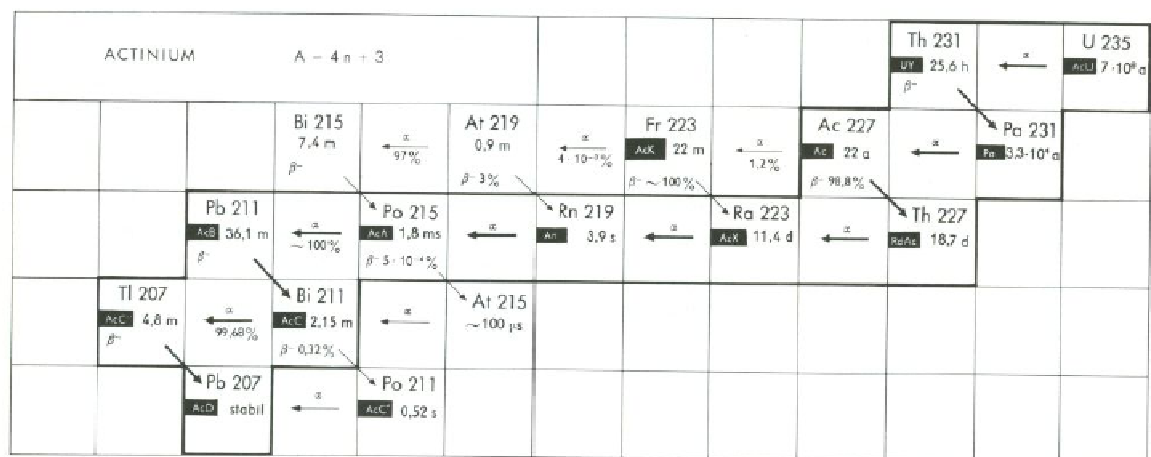
Πηγή αβεβαιότητας	Αθροίσματα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσα τετράγωνα	$F_0$
A παράγοντας	$SS_A$	a-1	$MS_A$	$\frac{MS_A}{MS_{\text{within}}}$
B παράγοντας	$SS_B$	b-1	$MS_B$	$\frac{MS_B}{MS_{\text{within}}}$
Αλληλεπίδραση A και B	$SS_{AB}$	(a-1)(b-1)	$MS_{AB}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_{\text{within}}}$
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	$SS_{\text{within}}$	ab(n-1)	$MS_{\text{within}}$	
Ολικό	$SS_{\text{total}}$	abn-1		

## Σχήματα κεφαλαίου

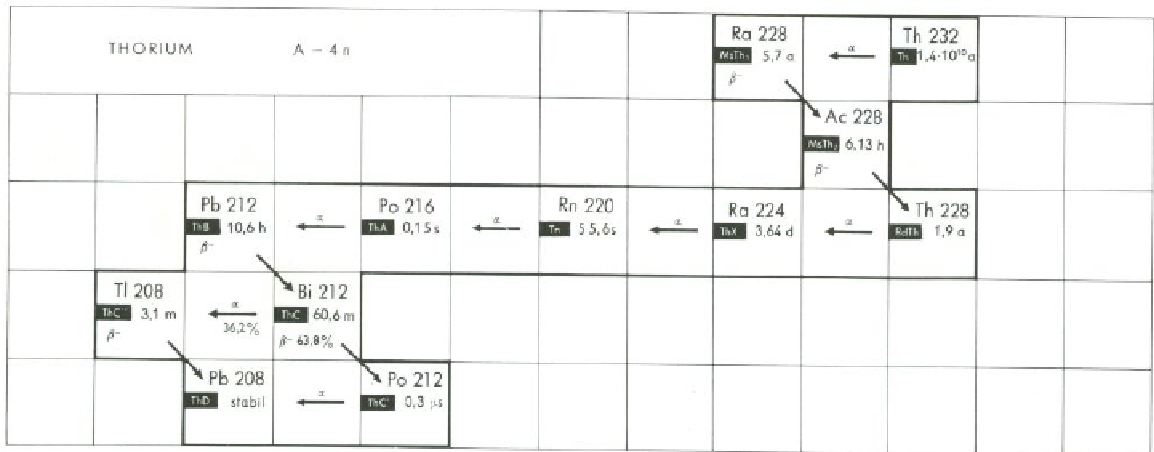
Σχήμα 2-1: Ραδιενεργός σειρά ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ) (Pfennig 1998)



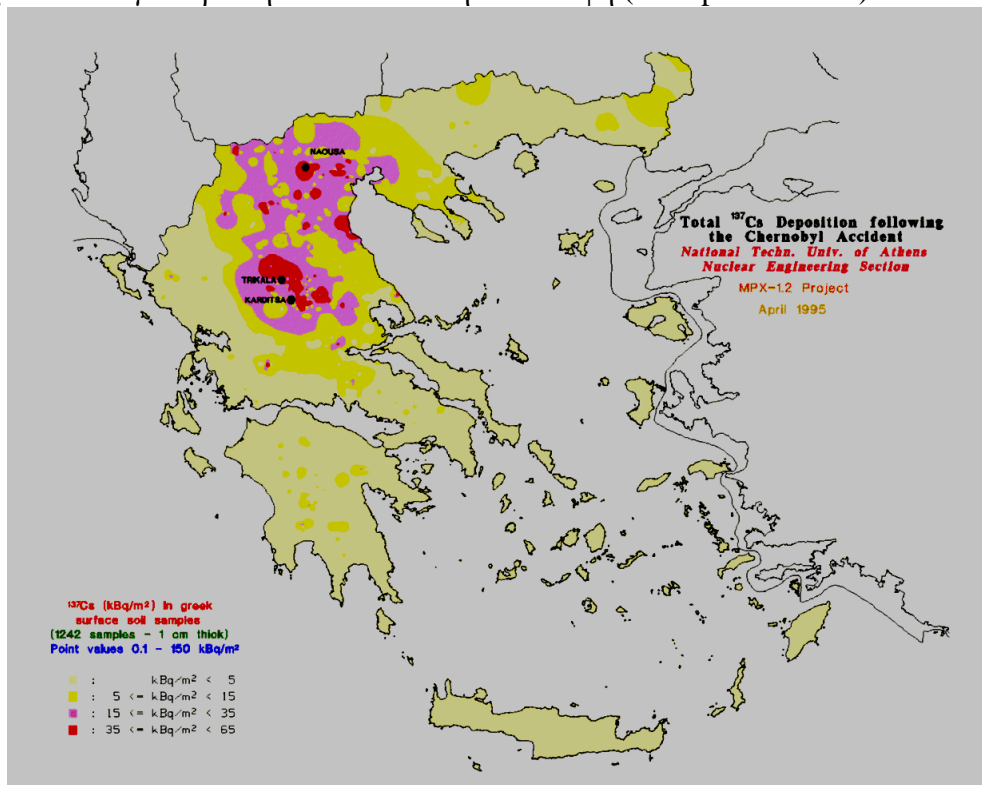
Σχήμα 2-2: Ραδιενεργός σειρά ακτινίου ( $^{235}\text{U}$ ) (Pfennig 1998)



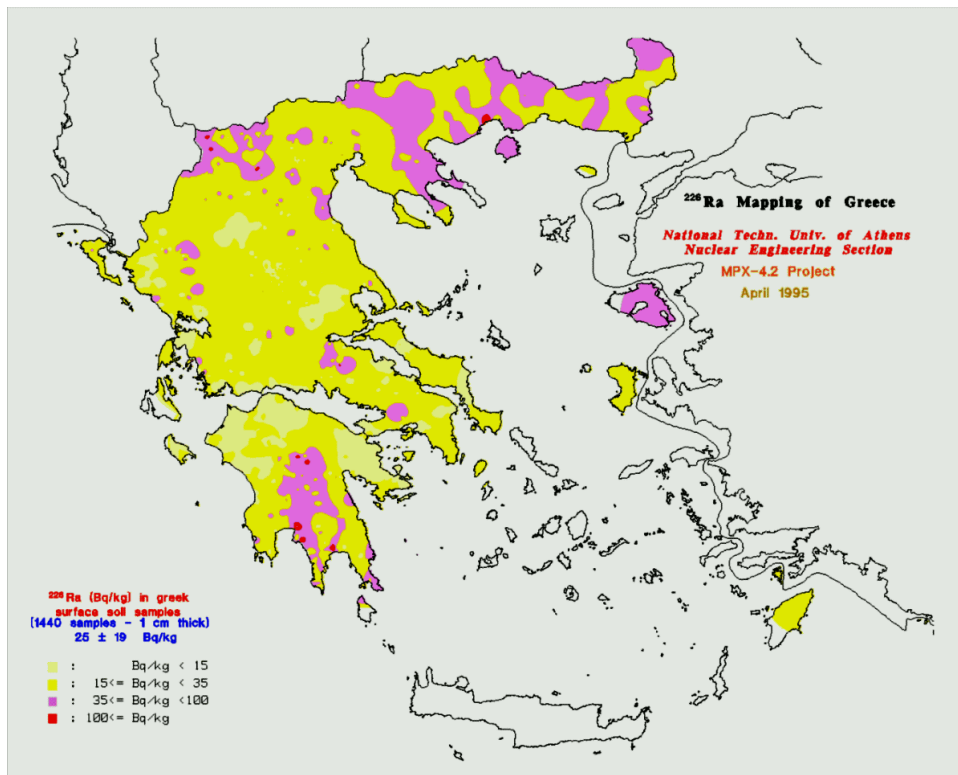
Σχήμα 2-3: Ραδιενεργός σειρά θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ) (Pfennig 1998)



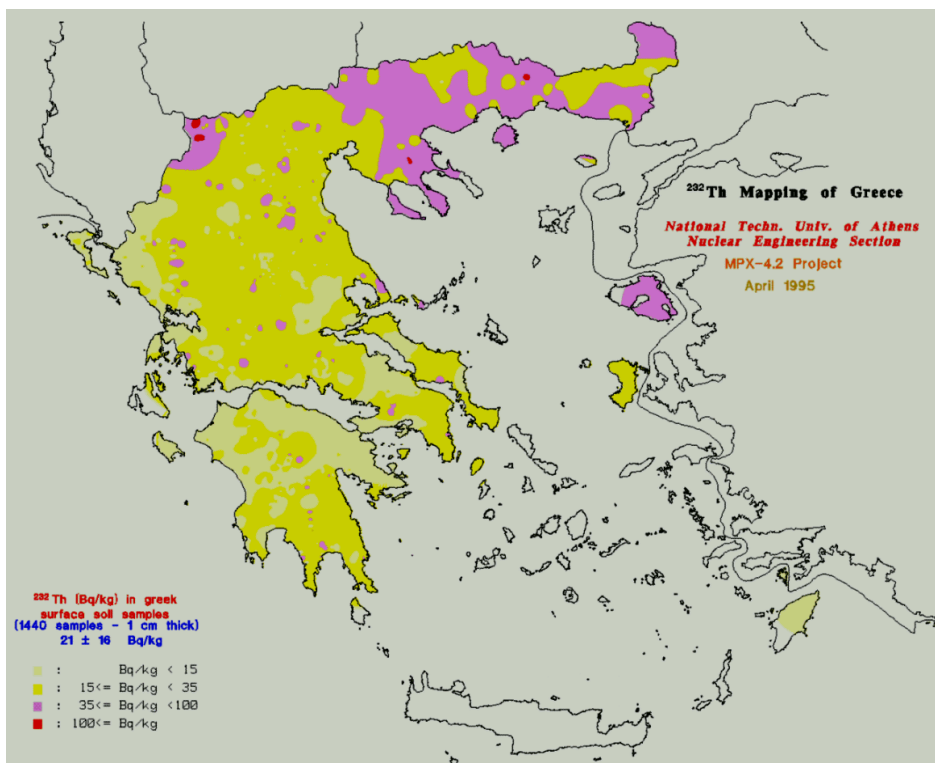
Σχήμα 2-4: Συγκέντρωση  $^{137}\text{Cs}$  στα ελληνικά εδάφη (Petrooulos 1996)



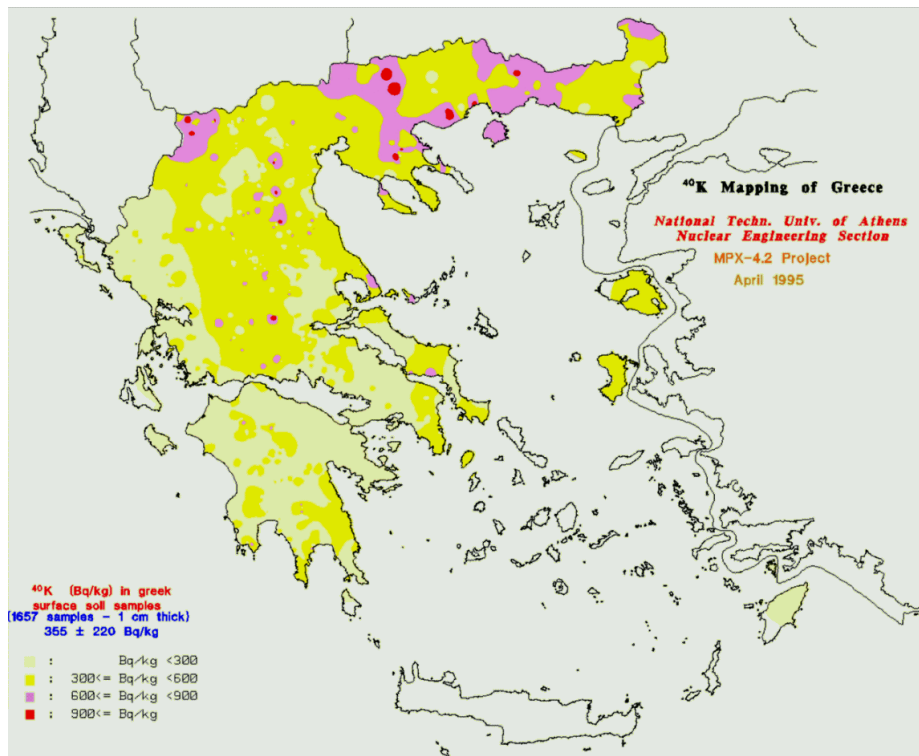
Σχήμα 2-5: Συγκέντρωση  $^{226}\text{Ra}$  στα ελληνικά εδάφη (Anagnostakis 1996)



Σχήμα 2-6: Συγκέντρωση  $^{232}\text{Th}$  στα ελληνικά εδάφη (Anagnostakis 1996)



Σχήμα 2-7: Συγκέντρωση  $^{40}\text{K}$  στα ελληνικά εδάφη (Anagnostakis 1996)



## **3 Μελέτη των μεθόδων προετοιμασίας δείγματος χώματος και σχετική στατιστική ανάλυση**

### **3.1 Εισαγωγή**

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.5, η προετοιμασία ενός δείγματος χώματος ενδεχομένως να επηρεάζει τη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας. Επίσης, ενδέχεται να επιδρά στη συνολική αβεβαιότητα της μέτρησης.

Για να μελετηθεί η επίδραση των διάφορων μεθόδων προετοιμασίας, όπως είναι το κοσκίνισμα, η λειοτρίβιση και η ξήρανση του χώματος, πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ μια σειρά από πειράματα. Σε κάθε περίπτωση, συλλέχθηκε επιφανειακό χώμα και μετά την επεξεργασία και τη συσκευασία του, το κάθε δείγμα αναλύθηκε με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας.

Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν τα ακόλουθα πειράματα:

- Πείραμα για την εκτίμηση της αβεβαιότητας της δειγματοληψίας και της προετοιμασίας των δειγμάτων.
- Πείραμα για τη μελέτη της επίδρασης της αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος (διάμετρος σωματιδίων  $> 2 \text{ mm}$ ) στη μετρούμενη τιμή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας, καθώς και στην αβεβαιότητα της προετοιμασίας.
- Πείραμα για τη μελέτη της επίδρασης της λειοτρίβισης του χώματος στη μετρούμενη τιμή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας, καθώς και στην αβεβαιότητα της προετοιμασίας.
- Πείραμα για τη μελέτη της επίδρασης της ξήρανσης του δείγματος στην πειραματικά μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας.

### **3.2 Οργάνωση δειγματοληψιών εδάφους για τις ανάγκες της ΔΕ**

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο έγινε στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ μια σειρά από δειγματοληψίες επιφανειακού χώματος. Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν ακολουθώντας την τυπική διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.4.2.



Όλες οι δειγματοληψίες που αναφέρονται στο παρόν κεφάλαιο έγιναν στην ίδια θέση δειγματοληψίας, στη νοτιοανατολική πλευρά της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Αυτή η θέση δειγματοληψίας ονομάστηκε «Πολυτεχνειούπολη 1». Στο Σχήμα 3-1 φαίνεται η ακριβής θέση της τοποθεσίας στο χάρτη. Η θέση αυτή επιλέχθηκε ώστε να καλύπτει τις προδιαγραφές που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 2.4.2. Κατά την πρώτη δειγματοληψία σχεδιάστηκε σκαρίφημα της ακριβούς θέσης, ενώ προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια GPS οι συντεταγμένες του σημείου (γεωγραφικό πλάτος: 37.9747°, γεωγραφικό μήκος: 23.7884°).

Στα πλαίσια της ΔΕ σχεδιάστηκε μια φόρμα δειγματοληψίας, η οποία περιλαμβάνει τα βασικά στοιχεία της κάθε δειγματοληψίας. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τον αριθμό δειγματοληψίας, την ημερομηνία και ώρα που πραγματοποιήθηκε, τις συντεταγμένες της θέσης δειγματοληψίας και το αντίστοιχο σκαρίφημα, καθώς και τα ονόματα των δειγματοληπτών. Επίσης, δημιουργήθηκε κατάλογος δειγματοληψιών, ο οποίος περιλαμβάνει τον αριθμό δειγματοληψίας, την ημερομηνία και την ώρα που πραγματοποιήθηκε, τη θέση της δειγματοληψίας, καθώς και τα ληφθέντα δείγματα και τη μάζα τους. Σε κάθε δειγματοληψία, συμπληρωνόταν η αντίστοιχη φόρμα δειγματοληψίας και ο κατάλογος δειγματοληψιών.

Η ονομασία των δειγμάτων αποφασίστηκε να γίνει με δύο αριθμούς, εκ των οποίων ο πρώτος υποδηλώνει τον αριθμό της δειγματοληψίας και ο δεύτερος τον αριθμό του δείγματος.

Στο 1<sup>ο</sup> Παράρτημα παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία κάθε δειγματοληψίας, καθώς και το σύνολο των δειγμάτων που λήφθηκαν. Στο 2<sup>ο</sup> Παράρτημα παρουσιάζονται οι φόρμες δειγματοληψίας που συμπληρώθηκαν σε κάθε θέση δειγματοληψίας.

### **3.3 Μεθοδολογία γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης**

#### **3.3.1 Επιλογή ισοτόπων**

Κατά τον αρχικό σχεδιασμό των πειραμάτων, προτάθηκε ο προσδιορισμός των ακόλουθων ισοτόπων:

- $^{137}\text{Cs}$ : Το  $^{137}\text{Cs}$  πραγματοποιεί  $-\beta$  διάσπαση, παράγοντας  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , το οποίο είναι μετασταθές με χρόνο ημιζωής 2.552 min. Στην πράξη θεωρείται ότι το  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  διασπάται ακαριαία, παράγοντας φωτόνια ενέργειας 661.62 keV με ποσοστό εκπομπής 85.1%. Τα φωτόνια αυτά χρησιμοποιούνται τελικά για την ανίχνευση του  $^{137}\text{Cs}$ .

Το  $^{137}\text{Cs}$  δεν αποτελεί φυσικό ισότοπο. Ελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα κυρίως με το ατύχημα του Chernobyl, οπότε και επικάθισε στο έδαφος. Συνεπώς, η χωρική κατανομή του δεν είναι ομοιόμορφη, ενώ εμφανίζεται και σημαντική ανομοιογένεια ανάλογα με το βάθος συλλογής του χώματος.

- $^{40}\text{K}$ : Είναι ισότοπο β-ραδιενεργό, ενώ εκπέμπει και φωτόνια ενέργειας 1460.75 keV, με ποσοστό εκπομπής 10.7%. Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα.

Το ισότοπο αυτό συμμετέχει στις χημικές διεργασίες των έμβιων οργανισμών, ενώ παράλληλα αποτελεί συστατικό πολλών ορυκτών, άρα σχετίζεται τόσο με το οργανικό όσο και με το ανόργανο κλάσμα του χώματος. Η κατανομή του στο έδαφος θεωρείται ομοιόμορφη και μη εξαρτώμενη από το βάθος συλλογής του χώματος. Κατ' επέκταση, αναμένεται πολύ μικρή διακύμανση της εκτιμώμενης συγκέντρωσης ραδιενέργειας μεταξύ διαφορετικών δειγμάτων.

Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων αποφασίστηκε ο προσδιορισμός και των ακόλουθων ισοτόπων:

- $^{228}\text{Ac}$ : Το  $^{228}\text{Ac}$ , με χρόνο ημιζωής 6.13 hr, ανήκει στη φυσική ραδιενεργό σειρά του θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ), η οποία παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2-3 του 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου. Αποκαθιστά εύκολα ισορροπία με το πατρικό του,  $^{228}\text{Ra}$ . Λόγω του σχετικά μεγάλου χρόνου ημιζωής του  $^{228}\text{Ra}$  (5.75 yr), η ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ  $^{232}\text{Th}$  και  $^{228}\text{Ra}$  σε περιβαλλοντικά δείγματα όπως το χώμα, δεν μπορεί να θεωρηθεί εξασφαλισμένη. Ομοίως, το θυγατρικό ισότοπο του  $^{228}\text{Ac}$ , το  $^{228}\text{Th}$  με χρόνο ημιζωής 1.9 y δεν μπορεί να εξασφαλιστεί ότι θα αποκαταστήσει ισορροπία με τα πατρικά ισότοπα της σειράς σε λογικό χρόνο. Το  $^{228}\text{Th}$  έρχεται πολύ γρήγορα σε ισορροπία με τα θυγατρικά του ισότοπα, τα οποία έχουν χρόνους ημιζωής τάξεως ημερών ή μικρότερους, και θα μπορούσε να προσδιοριστεί από αυτά, εφ' όσον τα δείγματα σφραγιστούν με κατάλληλη ρητίνη, για να μην υπάρχει διαρροή του αέριου  $^{220}\text{Rn}$ . Όμως, στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ, τα δείγματα σε ορισμένες περιπτώσεις δεν σφραγίστηκαν (δείγματα γεωμετρίας 5). Τελικά, από τα ισότοπα της σειράς του θορίου είναι δυνατό να προσδιορισθεί με αξιοπιστία μόνο το ισότοπο  $^{228}\text{Ac}$ , σε ισορροπία με το  $^{228}\text{Ra}$ , χωρίς να

μπορούν να προκύψουν με βεβαιότητα συμπεράσματα για κάποιο άλλο ισότοπο.

Το  $^{228}\text{Ac}$  εκπέμπει μεγάλο πλήθος από φωτόνια διαφορετικών ενεργειών. Για τον προσδιορισμό της ραδιενέργειάς του χρησιμοποιήθηκαν τα φωτόνια ενέργειας 911.07 keV με ποσοστό εκπομπής 5.58%. Σύμφωνα με την τυποποίηση του κώδικα SPUNAL, ο οποίος χρησιμοποιείται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ για τη φασματοσκοπική ανάλυση, η φωτοκορυφή αυτή ονομάζεται Ac-228B.

Το  $^{228}\text{Ac}$  είναι ισότοπο γεωλογικής προέλευσης, σχετίζεται δηλαδή κυρίως με τα ανόργανα μέρη του χώματος.

- $^{210}\text{Pb}$ : Εκπέμπει χαμηλής ενέργειας φωτόνια (46.52 keV) με χαμηλό ποσοστό εκπομπής (2.79%). Για το λόγο αυτό είναι σχετικά δύσκολο στην ανίχνευση.

Η μελέτη του ισότοπου αυτού παρουσιάζει ενδιαφέρον λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του. Πιο συγκεκριμένα, το  $^{210}\text{Pb}$  ανήκει στη φυσική ραδιενεργό σειρά του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ). Στη σειρά αυτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-1 του 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, το  $^{226}\text{Ra}$  διασπάται στο αέριο ισότοπο  $^{222}\text{Rn}$ , μέρος του οποίου διαφεύγει στην ατμόσφαιρα και με τη σειρά του διασπάται διαδοχικά στα στερεά ισότοπα  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$  και τελικά στο  $^{210}\text{Pb}$ . Όλα τα στερεά θυγατρικά του  $^{222}\text{Rn}$ , πλην του  $^{210}\text{Pb}$ , έχουν πολύ μικρούς χρόνους ημιζωής, που κυμαίνονται από ορισμένα δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά. Ως αποτέλεσμα, το  $^{222}\text{Rn}$  που υπάρχει στον αέρα διασπάται τελικά σε  $^{210}\text{Pb}$ , ο οποίος επικάθεται στο έδαφος. Συνεπώς, το ισότοπο αυτό παρουσιάζει μεγάλη ανομοιογένεια στην κατανομή του κατά βάθος. Συγκεκριμένα, παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση στο επιφανειακό χρώμα και έλλειμμα σε μεγαλύτερο βάθος.

- $^{234}\text{Th}$ : Εκπέμπει χαμηλής ενέργειας φωτόνια (63.29 keV) με ποσοστό εκπομπής 5.23%. Συνεπώς, και αυτό το ισότοπο είναι δύσκολο στην ανίχνευση. Όπως και ο  $^{210}\text{Pb}$ , ανήκει στη φυσική ραδιενεργό σειρά του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ).

Πρέπει να επισημανθεί ότι τα ισότοπα  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$  προσδιορίζονται μόνο από ανιχνευτή χαμηλών ενεργειών. Συνεπώς, η ανάλυσή τους παρουσιάζει διάφορες ιδιαιτερότητες, όπως είναι η εμφάνιση του φαινομένου της αυταπορρόφησης και η

συνακόλουθη ευαισθησία της μέτρησης από τη γεωμετρία του δείγματος, την πυκνότητά του κλπ. Για το λόγο αυτό, η επίδραση της προετοιμασίας κατά την ανάλυση φωτονίων χαμηλών ενεργειών κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί ξεχωριστά.

Τέλος, όπως προαναφέρθηκε ορισμένα από τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αυτού του κεφαλαίου δεν σφραγίστηκαν με ρητίνη, ώστε να αποφευχθεί η διαρροή του ραδονίου. Και στις περιπτώσεις, όμως, που τα δείγματα σφραγίστηκαν, ανάμεσα στο σφράγισμα και τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δεν μεσολάβησε σε κάθε περίπτωση αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να εξασφαλιστεί η ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του  $^{226}\text{Ra}$ , του  $^{222}\text{Rn}$  και των θυγατρικών του (διάστημα περίπου 20 ημερών). Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ, δεν προσδιορίστηκε η συγκέντρωση ραδιενέργειας του  $^{226}\text{Ra}$  σε κανένα πείραμα.

### 3.3.2 Επιλογή ανιχνευτών

Για τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας των ισοτόπων που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν δύο ανιχνευτές γερμανίου: ο ανιχνευτής HPGe για τον προσδιορισμό των ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια υψηλής ενέργειας ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ) και ο ανιχνευτής LEGe για τον προσδιορισμό των ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια χαμηλής ενέργειας ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ). Τα βασικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών αυτών παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 2.6.1.

Με τον ανιχνευτή LEGe προσδιορίστηκαν εκ νέου το  $^{137}\text{Cs}$  και το  $^{40}\text{K}$  και πραγματοποιήθηκε σύγκριση των πειραματικών τιμών συγκέντρωσης ραδιενέργειας από τους δύο ανιχνευτές. Η σύγκριση αυτή παρουσιάζεται στο 3<sup>ο</sup> Παράρτημα.

### 3.3.3 Διάρκεια συλλογής φασμάτων

Για τον ανιχνευτή HPGe πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική ανάλυση του υπο-δείγματος MS495 ώστε να επιλεγθεί ο κατάλληλος χρόνος συλλογής φασμάτων. Αρχικά, το υπο-δείγμα αναλύθηκε για 86400 sec (24 ώρες). Τα αποτελέσματα, όμως, που προέκυψαν συνοδεύονταν από τιμές αβεβαιότητας ανάλυσης μεγαλύτερες από το επιθυμητό (6.1% και 3% για το  $^{137}\text{Cs}$  και το  $^{40}\text{K}$  αντίστοιχα). Στη συνέχεια, το ίδιο δείγμα αναλύθηκε για 172800 sec (48 ώρες). Στην περίπτωση αυτή, η αβεβαιότητα ανάλυσης ήταν 4.2% και 2.1% για το  $^{137}\text{Cs}$  και το  $^{40}\text{K}$  αντίστοιχα. Προκειμένου να μην γίνει η διαδικασία ανάλυσης ιδιαίτερα χρονοβόρα, τελικά η διάρκεια συλλογής των φασμάτων ορίστηκε ίση με 172800 sec για όλα τα υπο-δείγματα.

Για τον ανιχνευτή LEGe η διάρκεια συλλογής των δειγμάτων ορίστηκε ίση με 345600 sec για όλα τα υπο-δείγματα. Η μεγαλύτερη διάρκεια συλλογής σε αυτόν τον ανιχνευτή κρίθηκε απαραίτητη λόγω της κακής στατιστικής των φωτοκορυφών των υπό μελέτη ισοτόπων, τα οποία όπως προαναφέρθηκε εκπέμπουν ακτινοβολία χαμηλών ενεργειών με χαμηλά ποσοστά εκπομπής.

### **3.3.4 Μέτρηση υποστρώματος ανιχνευτή HPGe**

Για την πραγματοποίηση μετρήσεων ακριβείας είναι σημαντικό να είναι γνωστό με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το υπόστρωμα των χρησιμοποιούμενων ανιχνευτικών διατάξεων. Το υπόστρωμα κάθε ανιχνευτή του ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει καταχωρηθεί στη βάση δεδομένων του κώδικα SPUNAL μετά από μέτρηση. Περιοδικά, πραγματοποιούνται επαναλαμβανόμενες μετρήσεις για τον έλεγχο του υποστρώματος. Σε περίπτωση που οι μετρούμενες τιμές διαφέρουν σημαντικά από τις καταχωρημένες, η βάση δεδομένων ενημερώνεται με τις καινούριες τιμές του υποστρώματος.

Στα πλαίσια της διαδικασίας ελέγχου του υποστρώματος, στις 26/11/2009 έγινε λήψη υποστρώματος και γ-φασματοσκοπική ανάλυσή του προς επιβεβαίωση των τιμών υποστρώματος του ανιχνευτή HPGe. Για το σκοπό αυτό συλλέχθηκε φάσμα διάρκειας 500000 sec με τον ανιχνευτή HPGe χωρίς δείγμα. Το φάσμα που προέκυψε είναι το BG2260. Στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των φωτοκορυφών του φάσματος. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων, η επιφάνεια φωτοκορυφής, η σχετική επί τοις εκατό αβεβαιότητα ανάλυσης  $r$  σε επίπεδο σημαντικότητας 90% και ο ρυθμός καταμέτρησης (count-rate) σε cps για κάθε μία από τις φωτοκορυφές του υποστρώματος. Επισημαίνεται ότι η ονομασία των φωτοκορυφών αντιστοιχεί στην τυποποίηση του κώδικα SPUNAL.

Στη συνέχεια, έγινε στατιστική σύγκριση με βάση το u-score των τιμών ραδιενέργειας των φωτοκορυφών του υποστρώματος του υπόψη φάσματος, με τις αντίστοιχες τιμές δύο παλαιότερων φασμάτων υποστρώματος του ανιχνευτή HPGe. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι καταχωρημένες στη βάση δεδομένων τιμές από το φάσμα BG2250 (24/4/2002) και οι τιμές από τον αμέσως προηγούμενο επαναληπτικό έλεγχο με το φάσμα BG2259 (18/8/2009). Οι απόλυτες τιμές της μεταβλητής  $u$  όπως αυτές προέκυψαν από τα στατιστικά τεστ φαίνονται στον Πίνακα 3-2. Περισσότερες

πληροφορίες για το τεστ βάση του u-score και τον τρόπο ανάλυσης των αποτελεσμάτων δίνονται στην Παράγραφο 2.8.

Υπενθυμίζεται ότι προκειμένου να θεωρηθεί ότι οι τιμές που συγκρίνονται βάση το u-score ταυτίζονται στατιστικά σε επίπεδο σημαντικότητας 5%, θα πρέπει η απόλυτη τιμή της μεταβλητής  $u$  να είναι μικρότερη από 1.96. Παρατηρείται ότι οι τιμές ραδιενέργειας για το σύνολο των ισοτόπων στατιστικά ταυτίζονται. Εξαιρέση αποτελούν η φωτοκορυφή του  $^{214}\text{Pb}$  με ενέργεια 352.06 keV και η φωτοκορυφή του  $^{214}\text{Bi}$  ενέργειας 609.43 keV. Επισημαίνεται ωστόσο ότι τα δύο αυτά ισότοπα είναι παράγωγα του αερίου  $^{222}\text{Rn}$ , συνεπώς παράγονται στον αέρα και στη συνέχεια επικάθονται στο έδαφος. Η κατανομή τους επομένως επηρεάζεται έντονα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και η παρατήρηση διακυμάνσεων δεν είναι ασυνήθιστη. Τα ισότοπα αυτά χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του  $^{226}\text{Ra}$ , η οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν μελετήθηκε καθόλου στην παρούσα ΔΕ. Για το λόγο αυτό δεν κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί και να αξιολογηθεί περαιτέρω η διακύμανση που παρατηρήθηκε.

Τελικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι τιμές ραδιενέργειας του υποστρώματος δεν διαφοροποιούνται σημαντικά από τις καταχωρημένες τιμές για καμία φωτοκορυφή και συνεπώς δεν απαιτείται ενημέρωση της βάσης με τις καινούριες τιμές.

### 3.3.5 Αβεβαιότητα υποστρώματος

Κατά τον υπολογισμό της ραδιενέργειας ενός ισοτόπου, από τη συνολική επιφάνεια της σχετικής φωτοκορυφής αφαιρείται η συνολική επιφάνεια της αντίστοιχης φωτοκορυφής του υποστρώματος. Η διαδικασία αυτή επηρεάζει τη συνολική αβεβαιότητα της ανάλυσης, αν και συνήθως η επίδραση αυτή θεωρείται πολύ μικρή και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν. Όμως, στην παρούσα μελέτη, κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί κατά πόσο είναι σημαντικός αυτός ο παράγοντας και στη συνέχεια να συνυπολογιστεί στην αβεβαιότητα φασματοσκοπικής ανάλυσης, ώστε να προκύψουν κατά το δυνατό ακριβέστερα τελικά αποτελέσματα.

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιενέργειας ισοτόπου ( $R$ ) σε δείγμα ορισμένης μάζας ( $m$ ), το οποίο εκπέμπει φωτόνια ορισμένης ενέργειας με συγκεκριμένο ποσοστό εκπομπής ( $yield$ ), και το οποίο αναλύθηκε γ-φασματοσκοπικά, με διάρκεια συλλογής φάσματος  $t_1$ , σε ανιχνευτή με ορισμένη

απόδοση φωτοκορυφής (efficiency –  $\varepsilon$ ) για την υπόψη ενέργεια, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$R = \frac{A - B_1}{m \cdot t_1 \cdot yield \cdot \varepsilon} \quad (3.1),$$

όπου  $A$  η επιφάνεια της φωτοκορυφής και  $B_1$  η επιφάνεια της ίδιας φωτοκορυφής που αποδίδεται στο υπόστρωμα κατά τη διάρκεια λήψης του φάσματος. Για τον προσδιορισμό του υποστρώματος η πρακτική που ακολουθείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι να λαμβάνεται φάσμα υποστρώματος διάρκειας  $t_2 = 500$  ksec και να προσδιορίζεται η επιφάνεια της φωτοκορυφής υποστρώματος  $B_2$ , συνοδευόμενη από την αντίστοιχη αβεβαιότητα. Η επιφάνεια της φωτοκορυφής που αποδίδεται στο υπόστρωμα  $B_1$  κατά τη λήψη του φάσματος, διάρκειας  $t_1 = 172800$  sec ή  $345600$  sec για τους ανιχνευτές HPGe και LEGe αντίστοιχα, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{B_1}{t_1} = \frac{B_2}{t_2} \quad (3.2).$$

Η αβεβαιότητα της ραδιενέργειας, σύμφωνα με το νόμο διάδοσης της αβεβαιότητας (JCGM 2008) και τη Σχέση (3.1), δίνεται από τη Σχέση:

$$\delta R^2 = \left( \frac{\delta A}{m \cdot t_1 \cdot yield \cdot \varepsilon} \right)^2 + \left( \frac{\delta B_1}{m \cdot t_1 \cdot yield \cdot \varepsilon} \right)^2 \quad (3.3)$$

Επισημαίνεται ότι στον τύπο αυτό δεν έχουν ληφθεί υπ' όψιν οι αβεβαιότητες τύπου Β των  $m$ ,  $t_1$ ,  $yield$  και  $\varepsilon$ , οι οποίες εκτιμώνται με μη στατιστικές μεθόδους.

Μετά από πράξεις, προκύπτει:

$$\left( \frac{\delta R}{R} \right)^2 = \left( \frac{A}{A - B_1} \right)^2 \left( \frac{\delta A}{A} \right)^2 + \left( \frac{B_1}{A - B_1} \right)^2 \left( \frac{\delta B_1}{B_1} \right)^2 \quad (3.4).$$

Συνήθως, θεωρείται ότι  $B_1 \ll A$ , δηλαδή:

$$\left( \frac{A}{A - B_1} \right) \approx 1 \text{ και } \left( \frac{B_1}{A - B_1} \right) \approx 0.$$

Συνεπώς, η Σχέση (3.3), συνήθως προσεγγίζεται ως:

$$\left( \frac{\delta R}{R} \right)^2 = \left( \frac{\delta A}{A} \right)^2 \quad (3.5).$$

Για να διαπιστωθεί κατά πόσο η παραπάνω παραδοχή δεν εισαγάγει σημαντική αβεβαιότητα στη μέτρηση, υπολογίστηκε η αβεβαιότητα της ραδιενέργειας χρησιμοποιώντας αυτούσια τη Σχέση (3.3).

Για τον υπολογισμό αυτό, πρέπει να είναι γνωστή η συνολική επιφάνεια και η απόλυτη αβεβαιότητα της φωτοκορυφής στο φάσμα του δείγματος και του υποστρώματος αντίστοιχα.

Η επιφάνεια της φωτοκορυφής στο φάσμα του δείγματος  $A_\phi$  αναφέρεται στην εκτύπωση των αποτελεσμάτων του SPUNAL, συνοδευόμενη από τη σχετική επί τοις εκατό αβεβαιότητα  $r_\phi$ , σε στάθμη σημαντικότητας 95%. Η απόλυτη αβεβαιότητα  $s_\phi$  σε επίπεδο 1σ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$s_\phi = \frac{r_\phi \cdot A_\phi}{1.65 \cdot 100} \quad (3.6).$$

Η σχετική αβεβαιότητα της επιφάνειας της φωτοκορυφής υποστρώματος  $r_B$  αναγράφεται στο φάσμα υποστρώματος κατά τρόπο αντίστοιχο με τη Σχέση (3.6) και δεν εξαρτάται από τη διάρκεια λήψης του φάσματος.

Τελικά, η αβεβαιότητα φασματοσκοπικής ανάλυσης, συνυπολογίζοντας και την αβεβαιότητα υποστρώματος, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$s_R = \frac{\sqrt{(r_\phi \cdot A_\phi)^2 + (r_B \cdot B_1)^2}}{1.65 \cdot 100 \cdot (A_\phi - B_1)} \cdot R \quad (3.7).$$

Στα πειράματα που ακολουθούν γίνεται σύγκριση των τιμών της αβεβαιότητας ανάλυσης με και χωρίς την αβεβαιότητα υποστρώματος. Η σύγκριση παρουσιάζεται στην Παράγραφο 3.4.3.2.

### 3.3.6 Ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτικών διατάξεων

Κατά τη διάρκεια της ΔΕ πραγματοποιήθηκε εκ νέου ενεργειακή βαθμονόμηση στους δύο ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, για τον προσδιορισμό της συσχέτισης μεταξύ της ενέργειας των φωτονίων και του κεντροειδούς (κανάλι) και εύρους ημίσειας ύψους της φωτοκορυφής στην οποία αυτά καταγράφονται.

Οι ενεργειακές βαθμονομήσεις έλαβαν χώρα στις 26/11/09 και στις 2/12/09 για τους ανιχνευτές HPGe και LEGe αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε



το μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα γεωμετρίας 2, με κωδική ονομασία MS419, η οποία περιέχει τα ισότοπα:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Y}$  και  $^{60}\text{Co}$ .

Τα πειραματικά σημεία που προκύπτουν προσαρμόστηκαν σε κατάλληλη συνάρτηση αναδρομής, η οποία συσχετίζει την ενέργεια με τα κανάλια. Για τους δύο ανιχνευτές προέκυψαν αντίστοιχα:

- Ανιχνευτής HPGe:

$$E = 1.185484\text{E}+00 + 5.010543\text{E}-01 \cdot \text{ch} - 5.188250\text{E}-08 \cdot \text{ch}^2$$

$$\text{FW.1M} = 5.180360\text{E}+00 + 7.854792\text{E}-04 \cdot \text{ch} + 5.410829\text{E}-08 \cdot \text{ch}^2$$

- Ανιχνευτής LEGe:

$$E = 4.095343+00 + 4.924609\text{E}-01 \cdot \text{ch} - 8.361111\text{E}-08 \cdot \text{ch}^2$$

$$\text{FW.1M} = 2.051339\text{E}+00 + 2.110529\text{E}-03 \cdot \text{ch} - 2.153379\text{E}-07 \cdot \text{ch}^2$$

### 3.3.7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης

Για κάθε δείγμα που αναλύθηκε με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας στο πλαίσιο των πειραμάτων αυτής της ΔΕ, συνοψίστηκαν σε πίνακα τα βασικά μεγέθη από το φάσμα που λήφθηκε, δηλαδή η γεωμετρία του δείγματος, ο ανιχνευτής, καθώς και ο κωδικός, η θέση αποθήκευσης στον κώδικα SPUNAL και η διάρκεια συλλογής του φάσματος.

Επίσης, για κάθε δείγμα, συνοψίστηκαν σε πίνακα τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Συγκεκριμένα, τα μεγέθη που καταγράφονται στους πίνακες είναι:

*R*: Η συγκέντρωση ραδιενέργειας του ισοτόπου, η οποία προκύπτει από τη Σχέση (3.1). Στην περίπτωση που το υπό μελέτη ισότοπο ανιχνεύεται και στο υπόστρωμα στη Σχέση (3.1) πρέπει πρώτα να αφαιρεθεί η επιφάνεια φωτοκορυφής υποστρώματος από την επιφάνεια της φωτοκορυφής του ισοτόπου. Αυτό ισχύει για όλα τα ισότοπα που μελετώνται στα πειράματα που ακολουθούν, δηλαδή τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$  και το  $^{228}\text{Ac}$  (φωτοκορυφή Ac-228B).

*s<sub>φ</sub>*: Η αβεβαιότητα φασματοσκοπικής ανάλυσης χωρίς να ληφθεί υπ' όψιν η αβεβαιότητα του υποστρώματος, όπως προκύπτει από τη Σχέση (3.6) της Παραγράφου 3.3.5. Κατά τη στατιστική ανάλυση το μέγεθος αυτό δεν χρησιμοποιείται. Παρουσιάζεται όμως για να γίνει σύγκριση με την τιμή που εκτιμάται για την αβεβαιότητα στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη και η

αβεβαιότητα του υποστρώματος και να γίνει ξεκάθαρη η επίδραση της αβεβαιότητας υποστρώματος.

*s<sub>R</sub>*: Η αβεβαιότητα ανάλυσης λαμβάνοντας υπ' όψιν την αβεβαιότητα υποστρώματος.  
Ο υπολογισμός αναπτύχθηκε στην Παράγραφο 3.3.5.

Επισημαίνεται ότι, για μια πλήρη ανάλυση της αβεβαιότητας της ανάλυσης, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και συνιστώσες αβεβαιότητας τύπου Β, όπως αυτές που οφείλονται στη βαθμονόμηση του ανιχνευτή και τα χρησιμοποιούμενα ποσοστά εκπομπής. Καθώς όμως στην παρούσα ΔΕ, όλες οι συγκρίσεις γίνονται μεταξύ φασμάτων που έχουν ληφθεί στον ίδιο ανιχνευτή και για την ίδια γεωμετρία μέτρησης, οι συνιστώσες αυτές είναι συσχετισμένες μεταξύ τους και δεν πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν. Για το λόγο αυτό, εκτός αν ρητά αναφέρεται διαφορετικά, οι αβεβαιότητες αυτές δεν έχουν περιληφθεί στους υπολογισμούς.

### **3.4 Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας δείγματος**

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται συχνά η πιθανή επίδραση της διαδικασίας προετοιμασίας του δείγματος στις μετρούμενες συγκεντρώσεις ραδιενεργών στοιχείων, χωρίς όμως να έχει μέχρι στιγμής μελετηθεί αναλυτικά (CITAC 2007, de Zorzi 2002). Στην παρούσα ΔΕ πραγματοποιήθηκε πείραμα με σκοπό να επιδειχθεί πειραματικά η επίδραση αυτή και να διαπιστωθεί εάν προκαλεί στατιστικά σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία δύο δειγμάτων χώματος. Το κάθε δείγμα χωρίστηκε σε τέσσερα υπο-δείγματα, τα οποία συσκευάστηκαν σε δοχεία γεωμετρίας 2, χωρίς να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία. Στη συνέχεια, αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας για τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας μερικών χαρακτηριστικών για το χώμα ραδιενεργών ισοτόπων. Τα πειραματικά αποτελέσματα εν συνεχεία υπέστησαν στατιστική επεξεργασία, με σύγκριση βάση του u-score και με τη χρήση της μεθόδου ANOVA, ώστε να προσδιοριστούν οι επί μέρους συνιστώσες της αβεβαιότητας.

#### **3.4.1 Δειγματοληψία**

Για τις ανάγκες αυτού του πειράματος πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία στις 21/10/2009 στη θέση «Πολυτεχνειούπολη 1». Λήφθηκαν δύο δείγματα επιφανειακού χώματος (δείγμα 1-1 και 1-2) από δύο τυχαία επιλεγμένες κοντινές θέσεις που

απέχαν 3-4 μέτρα, σύμφωνα με την τυπική διαδικασία δειγματοληψίας που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.4.2. Το χώμα συσκευάστηκε σε πλαστικές σακούλες για τη μεταφορά στο εργαστήριο, όπου και ζυγίστηκε άμεσα. Η νωπή μάζα των δύο δειγμάτων κατά την επιστροφή στο εργαστήριο ήταν 2816 και 3270 gr αντίστοιχα.

### **3.4.2 Προετοιμασία δειγμάτων**

Τα δύο δείγματα αφέθηκαν να ξηρανθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς τα αρχικά επίπεδα υγρασίας του χώματος ήταν της τάξης του 20%. Στη συνέχεια, το κάθε δείγμα διαχωρίστηκε σε τέσσερα υπο-δείγματα με τη μέθοδο του κώνου και της υποδιαίρεσης στα τέσσερα. Το κάθε υπο-δείγμα συσκευάστηκε σε δοχείο γεωμετρίας 2, ακολουθώντας την τυπική διαδικασία συσκευασίας που ακολουθεί το ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως αυτή περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.5.2. Τελικά, κάθε υπο-δείγμα καλύφθηκε με ρητίνη.

Στον Πίνακα 3-3 δίνεται ο κωδικός των οκτώ υπο-δειγμάτων που προέκυψαν από την πρώτη δειγματοληψία. Δίνονται επίσης ορισμένα βασικά στοιχεία για κάθε ένα από αυτά, όπως η υγρασία, η νωπή και η ξηρά μάζα, η μάζα των ξένων υλικών που αφαιρέθηκαν και του υλικού που δεν συσκευάστηκε (υπόλοιπο).

### **3.4.3 γ-Φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων**

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 3.3, το κάθε υπο-δείγμα αναλύθηκε γ-φασματοσκοπικά στον ανιχνευτή HPGe με διάρκεια συλλογής φάσματος 172800 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$ . Ακόμα, αναλύθηκε στον ανιχνευτή LEGe με διάρκεια συλλογής φάσματος 345600 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Στον Πίνακα 3-4 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ληφθέντων φασμάτων.

#### **3.4.3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων**

Οι τιμές ραδιενέργειας των υπό μελέτη ισοτόπων για κάθε υπο-δείγμα παρουσιάζονται στους Πίνακες 3-5 ως 3-9. Συγκεκριμένα, στους Πίνακες 3-5, 3-6 και 3-7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης από τον ανιχνευτή HPGe και στους Πίνακες 3-8 και 3-9 από τον ανιχνευτή LEGe.

Οι μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας όπως προέκυψαν από το φάσμα MS495A δεν παρουσιάζονται αναλυτικά, καθώς αυτή η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το μισό χρόνο συλλογής φάσματος Συνεπώς, δεν είναι σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν οι προκύπτουσες τιμές για σύγκριση με αυτές των υπόλοιπων αναλύσεων.

### 3.4.3.2 Αξιολόγηση της συνεισφοράς της αβεβαιότητας υποστρώματος

Οι αβεβαιότητες φασματοσκοπικής ανάλυσης  $s_{\Phi}$  και  $s_R$ , δηλαδή χωρίς και με την αβεβαιότητα υποστρώματος αντίστοιχα, παρουσιάζονται στους Πίνακες 3-5, 3-6, 3-7, 3-8 και 3-9 για κάθε ισότοπο. Στον Πίνακα 3-10 παρουσιάζεται η επί τοις εκατό σχετική απόκλιση των δύο τιμών για κάθε ισότοπο σύμφωνα με τη σχέση:

$$\delta s = \frac{s_R - s_{\Phi}}{s_R} \cdot 100\% \quad (3.8).$$

Παρατηρείται ότι η σχετική απόκλιση κυμαίνεται μεταξύ 8% και 20% για όλα τα ισότοπα, εκτός του  $^{234}\text{Th}$ . Άρα, για τα ισότοπα αυτά η επίδραση του φαινομένου δεν κρίνεται σημαντική και το γεγονός ότι συνήθως δεν λαμβάνεται υπ' όψιν δεν εισαγάγει σημαντικό σφάλμα. Επισημαίνεται ότι η αξιολόγηση αυτή εξαρτάται και από τα επίπεδα ραδιενέργειας του δείγματος, και επομένως μπορεί να μην είναι κατάλληλη για πολύ χαμηλής ενεργότητας δείγματα.

Στο  $^{234}\text{Th}$ , το οποίο προσδιορίζεται στον ανιχνευτή LEGe, η απόκλιση είναι σημαντικά μεγαλύτερη, της τάξης του 75% με 80%. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα επίπεδα  $^{234}\text{Th}$  στο υπόστρωμα του ανιχνευτή LEGe είναι αρκετά υψηλά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στα φάσματα των δειγμάτων που εξετάζονται, ο ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων του δείγματος ισούται με περίπου 40% του ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων του υποστρώματος. Συνεπώς, για το  $^{234}\text{Th}$  η επίδραση της αβεβαιότητας υποστρώματος δεν μπορεί να θεωρείται αμελητέα και καλό θα ήταν να λαμβάνεται υπ' όψιν σε κάθε μελέτη. Επισημαίνεται ότι τα υψηλά επίπεδα  $^{234}\text{Th}$  αποδίδονται κατά πάσα πιθανότητα στο υλικό κατασκευής της θωράκισης, η προμήθεια του οποίου έγινε από την ελληνική αγορά. Η αντικατάσταση της θωράκισης με άλλη, κατασκευασμένη από χαμηλής ραδιενέργειας υλικά θα βελτίωνε σημαντικά τις αναλυτικές ικανότητες του ανιχνευτή LEGe, βεβαίως με αντίστοιχα υψηλό κόστος.

Στην παρούσα ΔΕ η αβεβαιότητα υποστρώματος θα συνυπολογιστεί για κάθε ισότοπο, ώστε να εξασφαλιστεί κατά το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια κατά τη στατιστική ανάλυση.

### **3.4.4 Στατιστική ανάλυση μετρούμενων τιμών συγκέντρωσης ραδιενέργειας**

#### **3.4.4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων με βάση το u-score**

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων με βάση το u-score, ανά δύο για κάθε τετράδα υπο-δειγμάτων που προέκυψαν από τα δύο αρχικά δείγματα. Αναλυτικές πληροφορίες για αυτόν το στατιστικό έλεγχο δόθηκαν στην Παράγραφο 2.8. Σκοπός του ελέγχου ήταν ο εσωτερικός έλεγχος της κάθε τετράδας, δηλαδή να ελεγχθεί κατά πόσο τα τέσσερα υπο-δείγματα που προέκυψαν από το ίδιο αρχικό δείγμα μπορούν να θεωρηθούν ίδια στα πλαίσια της αβεβαιότητας ανάλυσης, δηλαδή ότι δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Στην περίπτωση που ο έλεγχος αποτυγχάνει σε επίπεδο σημαντικότητας 1%, δηλαδή όταν η απόλυτη τιμή της μεταβλητής u είναι μεγαλύτερη από την τιμή 2.58, συμπεραίνεται ότι υπάρχει σημαντική επίδραση της διαδικασίας προετοιμασίας.

Η απόλυτη τιμή της μεταβλητής u για κάθε ζεύγος φασμάτων παρουσιάζεται στους Πίνακες 3-11 έως 3-15 για τα υπό μελέτη ισότοπα αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι στη ραδιενέργεια των  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{234}\text{Th}$  δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των υπο-δειγμάτων της κάθε τετράδας. Συνεπώς, για τα ισότοπα αυτά δεν υπάρχει σημαντική επίδραση της προετοιμασίας. Αντιθέτως, η ραδιενέργεια του  $^{137}\text{Cs}$  εμφανίζει σημαντικές διαφορές μεταξύ ζευγών υπο-δειγμάτων του ίδιου αρχικού δείγματος. Μικρότερη κύμανση παρουσιάζει και η ραδιενέργεια των  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{40}\text{K}$ . Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι τα ισότοπα αυτά επηρεάζονται περισσότερο από τη διαδικασία προετοιμασίας.

#### **3.4.4.2 Περιγραφή λογιστικού φύλλου Excel ANOVA**

Η μέθοδος ANOVA περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.9. Για τον υπολογισμό των βασικών μεγεθών της μεθόδου ANOVA κατά ένα παράγοντα, συντάχθηκε φύλλο Excel βάση των ακόλουθων παραδοχών:

- Η διαδικασία προετοιμασίας που ακολουθείται θεωρείται πανομοιότυπη για κάθε υπο-δείγμα.

- Θεωρείται ως μοναδικός παράγοντας η θέση της δειγματοληψίας. Συνεπώς, βάση της ορολογίας που χρησιμοποιήθηκε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, θα ισχύει:

$$SS_{\text{between}} = SS_{\text{sampling}}$$

$$SS_{\text{within}} = SS_{\text{error}}$$

- Υπάρχουν  $\alpha=2$  αρχικά δείγματα (επίπεδα), κάθε ένα από τα οποία χωρίζονται σε  $n=4$  υπο-δείγματα (παρατηρήσεις).

Πριν από την εκτέλεση του πειράματος πραγματοποιήθηκε δοκιμή για να επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το πρόγραμμα, χρησιμοποιώντας μητρώο τυχαίων αριθμών. Από τη δοκιμή αυτή διαπιστώθηκε ότι το πρόγραμμα κάνει πράγματι σωστή στατιστική επεξεργασία των δεδομένων.

### 3.4.4.3 Εκτέλεση ανάλυσης ANOVA

Το πείραμα που περιγράφηκε στις Παραγράφους 3.4.1 ως 3.4.3 αναλύθηκε με τη μέθοδο ANOVA, χρησιμοποιώντας το λογιστικό φύλλο Excel της Παραγράφου 3.4.4.2. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση μίας παραμέτρου με 7 βαθμούς ελευθερίας. Για την ανάλυση αυτή:

- Ανεξάρτητος παράγων είναι το σημείο δειγματοληψίας. Υπάρχουν δύο επίπεδα του παράγοντα, τις δύο διαφορετικές θέσεις της δειγματοληψίας.
- Παρατηρήσεις σε κάθε επίπεδο είναι τα υπο-δείγματα. Άρα, υπάρχουν 4 παρατηρήσεις σε κάθε επίπεδο.
- Ελεγχόμενη μεταβλητή είναι η ειδική ραδιενέργεια του εξεταζόμενου κάθε φορά ισότοπου.

Στους Πίνακες 3-16 ως και 3-20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$  αντίστοιχα.

Για να γίνει σύγκριση σε επίπεδο σημαντικότητας 95%, με βαθμούς ελευθερίας 1 και 6 από πίνακες βρίσκεται ότι πρέπει:  $F_0 < F_{0,95,1,6} = 5.99$ .

Προκύπτει επομένως ότι:

- Για το  $^{137}\text{Cs}$ ,  $F_0 = 18.572 > F_{0,95,1,6}$ . Άρα, η μηδενική υπόθεση του στατιστικού τεστ δεν επαληθεύεται και οι δύο πληθυσμοί υπο-δειγμάτων από τις δύο διαφορετικές θέσεις δειγματοληψίας διαφέρουν.

- Για το  $^{40}\text{K}$ ,  $F_0 = 0.226 < F_{0.95,1,6}$ . Άρα, η μηδενική υπόθεση του στατιστικού τεστ επαληθεύεται και οι ομάδες υπο-δειγμάτων από τις δύο διαφορετικές θέσεις δειγματοληψίας ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό.

Ομοίως με το  $^{40}\text{K}$  ισχύει και για τα ισότοπα:

- $^{228}\text{Ac}$  ( $F_0 = 5.377 < F_{0.95,1,6}$ ).
- $^{210}\text{Pb}$  ( $F_0 = 3.839 < F_{0.95,1,6}$ ).
- $^{234}\text{Th}$  ( $F_0 = 0.085 < F_{0.95,1,6}$ ).

#### 3.4.4.4 Εκτίμηση αβεβαιότητας λόγω δειγματοληψίας

Η ολική αβεβαιότητα της μέτρησης μπορεί να χωριστεί επί μέρους σε δύο παράγοντες:

$$\sigma_T^2 = \sigma_e^2 + \sigma_{\text{samp}}^2 \quad (3.10),$$

Όπου η  $\sigma_e^2$  είναι η αβεβαιότητα προετοιμασίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης και  $\sigma_{\text{samp}}^2$  η αβεβαιότητα της δειγματοληψίας. Επισημαίνεται ότι: ως προετοιμασία στην ανάλυση αυτή θεωρούνται όλες οι διαδικασίες που υφίσταται το δείγμα από την άφιξή του στο εργαστήριο έως την τοποθέτησή του στον ανιχνευτή. Με την έννοια αυτή, η προετοιμασία περιλαμβάνει διαδικασίες όπως διαχωρισμός σε υποδείγματα, ξήρανση, συσκευασία και λοιπά.

Αποδεικνύεται ότι, εφ' όσον η μηδενική υπόθεση του F test της ANOVA απορρίπτεται, για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας δειγματοληψίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη σχέση (Montgomery 2007):

$$MS_{\text{sampling}} = \sigma_e^2 + n\sigma_{\text{samp}}^2 \Rightarrow$$

$$\sigma_{\text{samp}} = \sqrt{\frac{MS_{\text{sampling}} - \sigma_e^2}{n}} \quad (3.11),$$

Όπου κατά τα γνωστά το  $\sigma_e$  εκτιμάται από τη σχέση

$$\sigma_e = \sqrt{MS_e}.$$

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του Πίνακα 3-16, για το  $^{137}\text{Cs}$  προκύπτει από τη Σχέση (3.11) ότι η απόλυτη αβεβαιότητα δειγματοληψίας είναι ίση με 2.09 Bq/kg, ή σε σχετικούς όρους 15.2%.

Διαπιστώνεται επομένως ότι η αβεβαιότητα λόγω δειγματοληψίας είναι πολύ σημαντικότερη από την όποια αβεβαιότητα λόγω γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, η οποία μπορεί να περιορίζεται σε επίπεδα κάτω του 1% σε καλής ποιότητας μετρήσεις. Αναδεικνύεται με τον τρόπο αυτό ο καθοριστικός ρόλος της δειγματοληψίας για την παραγωγή καλής ποιότητας αποτελεσμάτων.

### 3.4.4.5 Εκτίμηση αβεβαιότητας λόγω προετοιμασίας

Όπως έχει αναφερθεί, μπορεί να θεωρηθεί το μέσο τετράγωνο  $MS_{\text{error}}$  ( $=MS_{\text{within}}$ ) ως ένας εκτιμητής της αβεβαιότητας  $\sigma_e^2$ . Στην τιμή αυτή περιλαμβάνεται η αβεβαιότητα λόγω της φασματοσκοπικής ανάλυσης, συμπεριλαμβάνοντας την αβεβαιότητα υποστρώματος ( $\sigma_R$ ) και την αβεβαιότητα προετοιμασίας του δείγματος ( $\sigma_{prep}$ ). Συνεπώς:

$$\sigma_e^2 = \sigma_R^2 + \sigma_{prep}^2 \quad (3.12)$$

Για να διαπιστωθεί αν η αβεβαιότητα προετοιμασίας είναι στατιστικά διάφορη του μηδενός αρκεί να αποδειχθεί ότι η εκτιμώμενη από την ANOVA τιμή του  $s_e^2$  και η  $s_R^2$  που δίνεται από την φασματοσκοπική ανάλυση διαφέρουν σημαντικά.

Το άθροισμα των τετραγώνων ανεξάρτητων ανηγμένων κανονικών μεταβλητών, ακολουθεί κατανομή  $\chi^2$ . Άρα, και ο λόγος  $\frac{MS_E \alpha(n-1)}{\sigma_e^2} = \frac{SS_E}{\sigma_e^2}$  θα ακολουθεί κατανομή  $\chi^2$  με  $\alpha(n-1)=6$  βαθμούς ελευθερίας. Πραγματοποιείται τεστ  $\chi^2$ , με

$$\chi_0^2 = \frac{MS_E \cdot \nu}{\sigma_B^2}, \quad \nu = 6 \text{ βαθμούς ελευθερίας.}$$

Μηδενική υπόθεση:  $H_0: \sigma_e^2 = \sigma_R^2$ .

Εναλλακτική υπόθεση:  $H_1: \sigma_e^2 > \sigma_R^2$

Δεδομένου ότι δεν είναι γνωστή η ακριβής τιμή της  $\sigma_R^2$ , θα εκτιμηθεί ως αριθμητικός μέσος των  $s_{R,i}^2$  που δίνονται από τον κώδικα SPUNAL σε κάθε φάσμα, όπως αυτή υπολογίστηκε στην Παράγραφο 3.3.5:

$$\sigma_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 s_{R,i}^2}{8} \quad (3.13)$$



Από πίνακες τις κατανομής  $\chi^2$  με 6 βαθμούς ελευθερίας βρίσκεται ότι η μηδενική υπόθεση γίνεται αποδεκτή όταν  $\chi_0^2 < \chi_{0,95,6}^2 = 12.59$  σε στάθμη σημαντικότητας 5% και απορρίπτεται σε στάθμη σημαντικότητας 1% όταν  $\chi_0^2 > \chi_{0,99,6}^2 = 16.81$ .

Στον Πίνακα 3-21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών τεστ, από όπου προκύπτει ότι για τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{210}\text{Pb}$ , η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται. Συνεπώς, για τα ισότοπα αυτά η αβεβαιότητα προετοιμασίας είναι σημαντική. Αντίθετα, στα  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{234}\text{Th}$  η μηδενική υπόθεση γίνεται αποδεκτή. Συμπεραίνεται επομένως ότι η επίδραση της προετοιμασίας στην αβεβαιότητα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, εξαρτάται από το συγκεκριμένο ισότοπο, γεγονός που πιθανόν οφείλεται στη διαφορετική κατανομή και συμπεριφορά των ισοτόπων στα διάφορα συστατικά του χώματος.

Χρησιμοποιώντας τη Σχέση (3.12), είναι δυνατόν από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3-21 να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα προετοιμασίας για τα ισότοπα, όπου αυτή εμφανίζεται στατιστικά σημαντική.

Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-22. Διαπιστώνεται ότι, σε σχετικούς όρους, η αβεβαιότητα προετοιμασίας είναι σημαντικότερη για το  $^{137}\text{Cs}$  (7%). Επίσης, παρατηρείται ότι, για τα τρία ισότοπα του πίνακα, η αβεβαιότητα λόγω προετοιμασίας είναι συγκρίσιμη με την αβεβαιότητα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης και επομένως αποτελεί σημαντική παράλειψη να αγνοείται.

### **3.5 Επίδραση του χονδρόκοκκου κλάσματος (> 2 mm) στη συγκέντρωση ραδιενέργειας και στην αβεβαιότητα ανάλυσης**

Ένα θέμα που απασχόλησε στα πλαίσια της ΔΕ ήταν η επίδραση της κοκκομετρίας στη συγκέντρωση ραδιενέργειας του χώματος. Καταρχήν απασχόλησε το κατά πόσον η παρουσία του πλέον χονδρόκοκκου κλάσματος επιδρά στα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η σχετική διερεύνηση παρουσιάζεται στην παράγραφο αυτή. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι στα πλαίσια της ΔΕ έγινε και ενδεδειγμένη διερεύνηση της επίδρασης της κοκκομετρίας στα αποτελέσματα των αναλύσεων. Τα σχετικά πειράματα και συμπεράσματα περιγράφονται στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται συχνά η αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος, το οποίο ορίζεται ως το κλάσμα άνω του 1 ή των 2 mm, ως μέρος της προετοιμασίας των δειγμάτων χώματος (Van der Perk 2008). Για να μελετηθεί η επίδραση του

χονδρόκοκκου κλάσματος ένα αρχικό ομογενοποιημένο δείγμα χώματος χωρίστηκε σε 8 υπο-δείγματα. Στη συνέχεια, τέσσερα από αυτά υπέστησαν κοσκίνισμα και το κλάσμα άνω των 2 mm αφαιρέθηκε, ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα συσκευάστηκαν ως είχαν. Τα 8 υπο-δείγματα αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας και υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ . Τέλος, με τη μέθοδο ANOVA ελέγχθηκε αν η διαφορά στις μετρούμενες συγκεντρώσεις των δύο ομάδων υπο-δειγμάτων είναι σημαντική και υπολογίστηκε η αβεβαιότητα προετοιμασίας. Δειγματοληψία

Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε το δείγμα 2-1, συνολικής νωπής μάζας 3520 gr, το οποίο λήφθηκε κατά τη δεύτερη δειγματοληψία, στις 30/11/2009, από τη θέση «Πολυτεχνειούπολη 1». Για λόγους πληρότητας του πειράματος, χρειάστηκε να ληφθεί ακόμα ένα δείγμα χώματος. Η τρίτη δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στην ίδια θέση («Πολυτεχνειούπολη 1») στις 18/12/2009, ακολουθώντας την τυπική διαδικασία δειγματοληψίας. Το δείγμα που λήφθηκε, δείγμα 3-1, ζυγίστηκε κατά την επιστροφή στο εργαστήριο και η νωπή του μάζα βρέθηκε ίση με 2980gr. Στη συνέχεια, το δείγμα αφέθηκε να ξηραθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

### **3.5.1 Ομογενοποίηση και διαχωρισμός σε υποδείγματα**

Τα δύο χρησιμοποιούμενα δείγματα προέρχονται από την ίδια θέση δειγματοληψίας, λήφθηκαν όμως σε διαφορετικές δειγματοληψίες. Όπως προέκυψε από το προηγούμενο πείραμα, το  $^{137}\text{Cs}$  έχει ανομοιογενή χωρική κατανομή. Για να αποφευχθεί η εισαγωγή αβεβαιότητας λόγω της δειγματοληψίας, τα δύο δείγματα κατ' αρχήν ομογενοποιήθηκαν. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε πλαστικό δοχείο (βαρέλι), χωρητικότητας 20 L.

Τα δύο δείγματα τοποθετήθηκαν μέσα στο δοχείο, το οποίο περιστράφηκε κατά οριζόντιο και κατά κάθετο άξονα, 20 φορές αντίστοιχα.

Το χώμα τοποθετήθηκε πάνω σε χαρτί και χωρίστηκε σε τέσσερα τμήματα με τη μέθοδο του κώνου και της υποδιαίρεσης στα τέσσερα (cone and quartering). Τα δύο αντιδιαμετρικά τμήματα (I και III) τοποθετήθηκαν εκ νέου στο δοχείο και επαναλήφθηκε η διαδικασία ομογενοποίησης. Στη συνέχεια, χωρίστηκαν σε τέσσερα νέα τμήματα, πάλι με τη μέθοδο του κώνου και της υποδιαίρεσης στα τέσσερα. Όμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα αρχικά αντιδιαμετρικά τμήματα χώματος II και IV, με αποτέλεσμα τελικά να έχουν προκύψει 8 υπο-δείγματα χώματος.

Από τα 8 αυτά υπο-δείγματα επιλέχθηκαν κατά τυχαίο τρόπο 4 που κοσκινίστηκαν (MS514-517), ενώ τα υπόλοιπα συσκευάστηκαν χωρίς περαιτέρω επεξεργασία (MS510-513).

Στη συνέχεια μετρήθηκε η υγρασία του χώματος. Η προκύπτουσα τιμή (6%) ήταν πολύ υψηλή. Γι' αυτό το λόγο, τα 4 υπο-δείγματα που δεν υπέστησαν περαιτέρω επεξεργασία αφέθηκαν εκ νέου σε χαρτί για να ξηρανθούν.

### **3.5.2 Κοσκίνισμα**

#### **3.5.2.1 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός**

Για το κοσκίνισμα του χώματος χρησιμοποιήσαμε τη συσκευή κοκκομετρικής ανάλυσης AS-200 Control του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Η μηχανή αυτή αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα:

- Μηχάνημα δόνησης με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά για όλες τις απαραίτητες ρυθμίσεις.
- Δύο μεταλλικές ράβδοι στήριξης των κόσκινων.
- Κόσκινα με διαφορετικά μεγέθη οπών, που κυμαίνονται από 20 μm έως μερικά mm.
- Συλλέκτη βάσης, που τοποθετείται στο κάτω μέρος της στοίβας των κόσκινων και καπάκι που τοποθετείται στο κόσκινο κορυφής για να αποφευχθεί η απώλεια σκόνης.
- Δύο ασφάλειες για την ακινητοποίηση των κόσκινων και την ασφαλή λειτουργία της συσκευής.

Η διαδικασία λειτουργίας της συσκευής περιγράφεται αναλυτικά στη ΔΕ του Θ. Πέππα (Πέππας 2008). Συνοπτικά, αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Επιλέγονται τα κόσκινα που θα χρησιμοποιηθούν για το κοσκίνισμα.
- Τα κόσκινα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο πάνω στη βάση δόνησης με φθίνουσα σειρά μεγέθους. Τροφοδοτείται η σκόνη στο κόσκινο κορυφής.
- Το καπάκι κατεβαίνει και ασφαλίζει. Στο σημείο αυτό χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε το καπάκι να ασφαλίσει σωστά. Σε διαφορετική περίπτωση η συσκευή δονείται έντονα κάνοντας υπερβολικό θόρυβο και καταπονείται υπερβολικά δημιουργώντας αυλακώσεις στις μεταλλικές ράβδους στήριξης

των κόσκινων. Επιπλέον, υπάρχει κίνδυνος βλάβης της συσκευής ή απώλειας του δείγματος.

- Επιλέγονται οι επιθυμητές ρυθμίσεις για το κοσκίνισμα, είτε απευθείας από τον πίνακα ελέγχου είτε από τον υπολογιστή.
- Ξεκινάει η διαδικασία κοσκίνισματος.
- Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία συνιστάται αναμονή λίγων λεπτών ώστε να κατακαθίσει όλη η σκόνη και να μην υπάρχουν απώλειες κατά το άνοιγμα.
- Το καπάκι ασφαλείας απασφαλίζει και ανεβαίνει με αργές κινήσεις ώστε να μην προκληθεί φθορά στις ράβδους στήριξης.
- Στο τέλος της διαδικασίας κάθε κόσκινο αναποδογυρίζεται προσεκτικά σε ένα λεπτό χαρτί. Τα λεπτόκοκκα σωματίδια που έχουν προσκολληθεί στο κόσκινο αφαιρούνται με ένα μαλακό πινέλο και προστίθενται στην υπόλοιπη ποσότητα.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο καθάρισμα των κόσκινων μετά το τέλος του κοσκίνισματος, έτσι ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του cross-contamination κατά το κοσκίνισμα επόμενων δειγμάτων.

### **3.5.2.2 Πειραματική διαδικασία**

Για το κοσκίνισμα χρησιμοποιήθηκε μόνο το κόσκινο με μέγεθος οπών 2 mm. Αρχικά, ζυγίστηκε η βάση στήριξης (341.46 gr) και το κόσκινο των 2 mm (332.60 gr). Στη συνέχεια, η βάση στήριξης τοποθετήθηκε στη μηχανή και ακριβώς από πάνω τοποθετήθηκε το κόσκινο των 2 mm. Μέσα στο κόσκινο αυτό εισήχθη το χόμα. Πάνω από το κόσκινο των 2 mm τοποθετήθηκαν και τα υπόλοιπα 6 κόσκινα, τα οποία πρακτικά δεν μας ενδιαφέρουν, για λόγους σωστής ζυγοστάθμισης της μηχανής και αποφυγής των κραδασμών κατά τη λειτουργία. (Πέππας 2008).

Για κάθε υπο-δείγμα πραγματοποιήθηκε κοσκίνισμα διάρκειας 20 λεπτών με πλάτος ταλάντωσης 2 mm. Τα κλάσματα άνω των 2 mm αφαιρέθηκαν, ενώ τα κλάσματα κάτω των 2 mm αφέθηκαν και αυτά να ξηραθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στον Πίνακα 3-23 παρουσιάζονται οι μάζες των κλασμάτων άνω και κάτω από 2 mm, για κάθε υπο-δείγμα.

### 3.5.3 Συσκευασία υπο-δειγμάτων

Τα υπο-δείγματα αφέθηκαν δύο μέρες να ξηρανθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, και τα 8 υπο-δείγματα συσκευάστηκαν σε δοχεία γεωμετρίας 2 σύμφωνα με τη συνήθη διαδικασία.

Στον Πίνακα 3-24 παρουσιάζεται η υγρασία, καθώς και η νωπή και η ξηρή μάζα για κάθε συσκευασμένο υπο-δείγμα.

### 3.5.4 γ-Φασματοσκοπική ανάλυση

Το κάθε υπο-δείγμα αναλύθηκε γ-φασματοσκοπικά στον ανιχνευτή HPGe με διάρκεια συλλογής φάσματος 172800 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$ . Ακόμα, αναλύθηκε στον ανιχνευτή LEGe με διάρκεια συλλογής φάσματος 345600 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Στον Πίνακα 3-25 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των φασμάτων που προέκυψαν από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των 8 υπο-δειγμάτων. Στους Πίνακες 3-26 έως 3-30 δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου. Στους ίδιους πίνακες παρουσιάζεται και η αβεβαιότητα ανάλυσης, συνυπολογίζοντας σε κάθε περίπτωση την αβεβαιότητα του υποστρώματος.

### 3.5.5 Στατιστική ανάλυση

#### 3.5.5.1 Εκτέλεση ανάλυσης ANOVA

Το παρόν πείραμα αναλύθηκε με τη μέθοδο ANOVA, η οποία περιγράφηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 2.9. Για τον υπολογισμό των βασικών μεγεθών της ANOVA κατά ένα παράγοντα συντάχθηκε λογιστικό φύλλο σε Excel βάση των ακόλουθων παραδοχών:

- Τα υπο-δείγματα έχουν υποστεί ομογενοποίηση, συνεπώς θεωρείται ότι είναι μεταξύ τους όμοια.
- Θεωρείται ως μοναδικός παράγοντας η επεξεργασία του δείγματος. Συνεπώς, βάση της ορολογίας που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως ισχύει:

$$SS_{\text{between}} = SS_{\text{preparation}}$$

$$SS_{\text{within}} = SS_{\text{error}}$$

- Υπάρχουν  $\alpha=2$  δείγματα (επίπεδα), κάθε ένα από τα οποία χωρίζονται σε  $n=4$  υπο-δείγματα (παρατηρήσεις).

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση μίας παραμέτρου με 7 βαθμούς ελευθερίας. Για την ανάλυση αυτή:

- Ανεξάρτητος παράγων είναι η επεξεργασία του δείγματος. Υπάρχουν δύο επίπεδα του παράγοντα, (α) επεξεργασία που περιλαμβάνει κοσκίνισμα του δείγματος και συνακόλουθη αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος και (β) επεξεργασία χωρίς κοσκίνισμα.
- Παρατηρήσεις σε κάθε επίπεδο είναι τα υπο-δείγματα. Άρα, υπάρχουν 4 παρατηρήσεις σε κάθε επίπεδο.
- Ελεγχόμενη μεταβλητή είναι η ειδική ραδιενέργεια του εξεταζόμενου κάθε φορά ισοτόπου.

Στους Πίνακες 3-31 ως και 3-35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$  αντίστοιχα.

Προκειμένου να συγκριθούν σε επίπεδο σημαντικότητας 95%, με βαθμούς ελευθερίας 1 και 6 από πίνακες βρίσκεται ότι πρέπει:  $F_0 < F_{0.95,1,6} = 5.99$ .

Προκύπτει επομένως ότι:

- Για το  $^{234}\text{Th}$ ,  $F_0 = 1.388 < F_{0.95,1,6}$ . Άρα, η μηδενική υπόθεση του στατιστικού τεστ επαληθεύεται και οι ομάδες υπο-δειγμάτων που υπέστησαν επεξεργασία με διαφορετικές μεθόδους ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό.
- Για το  $^{137}\text{Cs}$ ,  $F_0 = 14.520 > F_{0.95,1,6}$ . Άρα, η μηδενική υπόθεση του στατιστικού τεστ δεν επαληθεύεται και οι δύο πληθυσμοί υπο-δειγμάτων που υπέστησαν επεξεργασία με διαφορετικές μεθόδους διαφέρουν.

Ομοίως με το  $^{137}\text{Cs}$  ισχύει και για τα ισότοπα:

- $^{40}\text{K}$  ( $F_0 = 34.925 > F_{0.95,1,6}$ ).
- $^{228}\text{Ac}$  ( $F_0 = 26.812 > F_{0.95,1,6}$ ).
- $^{210}\text{Pb}$  ( $F_0 = 8.487 > F_{0.95,1,6}$ ).

Συνεπώς, η διαδικασία του κοσκινίσματος και της αφαίρεσης του πλέον χονδρόκοκκου κλάσματος επηρεάζει τη συγκέντρωση της ραδιενέργειας για το σύνολο των υπό μελέτη ισότοπων, εκτός από το  $^{234}\text{Th}$ . Επισημαίνεται ότι η ανάλυση του  $^{234}\text{Th}$  συνοδεύεται από σημαντική αβεβαιότητα λόγω του υψηλού υποστρώματος, όπως έχει εξηγηθεί στην Παράγραφο 3.4.3.2. Ενδέχεται επομένως να υπάρχει επίδραση και στο ισότοπο αυτό, η οποία δε διακρίνεται για στατιστικούς λόγους.

### 3.5.5.2 Εκτίμηση αβεβαιότητας λόγω προετοιμασίας

#### Υπο-δείγματα στα οποία δεν αφαιρέθηκε το χονδρόκοκκο κλάσμα

Δεδομένου ότι η φασματοσκοπική ανάλυση και στα δύο πειράματα πραγματοποιήθηκε με τους ίδιους ανιχνευτές, αναμένεται ότι η αβεβαιότητα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης για κάθε ισότοπο είναι ίδια για τα δύο πειράματα. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει η τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ) της ραδιενέργειας στην τετράδα που δεν υπέστη κοσκίνισμα να είναι και σε αυτό το πείραμα στατιστικά μεγαλύτερη από την αβεβαιότητα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης ( $\sigma_R$ ) για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{210}\text{Pb}$ , κατά τρόπο παρόμοιο με τα όσα διαπιστώθηκαν στην Παράγραφο 3.4.4.5.

Για να επιβεβαιωθεί η υπόθεση αυτή πραγματοποιήθηκε test  $\chi^2$  με  $\chi_0^2 = \frac{\nu \cdot s^2}{\sigma_R^2}$  όπου

$\nu = 4 - 1 = 3$  οι χρησιμοποιούμενοι βαθμοί ελευθερίας και  $s$  η εκτίμηση της τυπικής απόκλισης της ραδιενέργειας της τετράδας υπο-δειγμάτων που δεν υπέστη κοσκίνισμα, όπως υπολογίζεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεών τους.

Μηδενική υπόθεση:  $H_0: \sigma^2 = \sigma_R^2$ .

Εναλλακτική υπόθεση:  $H_1: \sigma^2 > \sigma_R^2$

Για τον υπολογισμό της  $\sigma_R^2$ , χρησιμοποιήθηκε κατά προσέγγιση η Σχέση (3.13) της Παραγράφου 3.4.4.5, λαμβάνοντας σε αυτή την περίπτωση υπ' όψιν μόνο την αβεβαιότητα ανάλυσης των τεσσάρων υπο-δειγμάτων MS510 – MS513.

Για να γίνει σύγκριση σε επίπεδο σημαντικότητας 95%, με 3 βαθμούς ελευθερίας, από πίνακες (Σιμόπουλος 1989) βρίσκεται ότι πρέπει:  $\chi_0^2 < \chi_{0.95,3}^2 = 7.81$ .

Στον Πίνακα 3-36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών τεστ, από όπου προκύπτει ότι η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται μόνο για το  $^{210}\text{Pb}$ , δηλαδή μόνο για

αυτό το ισότοπο η προετοιμασία φαίνεται να επιδρά σημαντικά στην αβεβαιότητα της μέτρησης.

Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε αντίφαση με τα όσα παρατηρήθηκαν στην Παράγραφο 3.4.4.5, όπου είχε παρατηρηθεί σημαντική αβεβαιότητα λόγω προετοιμασίας και για τα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$ . Η μόνη διαφορά που εντοπίζεται μεταξύ των δύο ομάδων δειγμάτων είναι ότι, για το παρόν πείραμα, πραγματοποιήθηκε προσεκτική ομογενοποίηση του αρχικού δείγματος, καθώς ήταν απαραίτητη η συνένωση δύο δειγμάτων από διαφορετικές δειγματοληψίες. Φαίνεται επομένως ότι η καλή ομογενοποίηση παίζει σημαντικό ρόλο για την αβεβαιότητα του αποτελέσματος.

#### Υπο-δείγματα στα οποία αφαιρέθηκε το χονδρόκοκκο κλάσμα

Με όμοιο τρόπο εκτιμήθηκε η αβεβαιότητας λόγω προετοιμασίας για τη δεύτερη τετράδα υπο-δειγμάτων. Υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση των τιμών ραδιενέργειας των υπο-δειγμάτων στα οποία αφαιρέθηκε το χονδρόκοκκο κλάσμα (MS514 –

MS517) για κάθε ισότοπο και στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε test  $\chi^2$  με  $\chi_0^2 = \frac{\nu \cdot s^2}{\sigma_R^2}$

και  $\nu = 4 - 1 = 3$  βαθμούς ελευθερίας.

Μηδενική υπόθεση:  $H_0: \sigma^2 = \sigma_R^2$ .

Εναλλακτική υπόθεση:  $H_1: \sigma^2 > \sigma_R^2$ .

Για τον υπολογισμό της  $\sigma_R^2$ , χρησιμοποιήθηκε κατά προσέγγιση η Σχέση (3.13) της Παραγράφου 3.4.4.5, λαμβάνοντας σε αυτή την περίπτωση υπ' όψιν μόνο την αβεβαιότητα ανάλυσης των τεσσάρων υπο-δειγμάτων MS514 – MS517.

Προκειμένου να συγκριθεί σε επίπεδο σημαντικότητας 95%, με 3 βαθμούς ελευθερίας, από πίνακες (Σιμόπουλος 1989) βρίσκεται ότι πρέπει:  $\chi_0^2 < \chi_{0.95,3}^2 = 7.81$ .

Στον Πίνακα 3-37 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών τεστ, από όπου προκύπτει ότι η μηδενική υπόθεση επαληθεύεται για όλα τα υπό μελέτη ισότοπα, δηλαδή η κύμανση που εμφανίζει η ραδιενέργεια των ισωτόπων φαίνεται να οφείλεται αποκλειστικά στην αβεβαιότητα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.



### 3.5.5.3 Σύγκριση αβεβαιότητας προετοιμασίας των υπο-δειγμάτων με και χωρίς αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος

Από τα δύο test  $\chi^2$  που πραγματοποιήθηκαν στην Παράγραφο 3.5.5.2 δεν προέκυψε ένα ξεκάθαρο συμπέρασμα σχετικά με την επίδραση της αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος στην αβεβαιότητα ανάλυσης. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε F test με  $F_0 = \frac{s_1^2}{s_2^2}$  και  $\nu_1 = \nu_2 = 4 - 1 = 3$ .

Μηδενική υπόθεση:  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ .

Εναλλακτική υπόθεση:  $H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$

Όπου  $s_1^2$  η τυπική απόκλιση της τετράδας των υπο-δειγμάτων που δεν υπέστησαν κοσκίνισμα και  $s_2^2$  η τυπική απόκλιση της τετράδας των υπο-δειγμάτων που υπέστησαν κοσκίνισμα και συνακόλουθη αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος, ενώ  $s_1$  και  $s_2$  οι αντίστοιχες εκτιμήσεις τους.

Από στατιστικούς πίνακες προκύπτει για επίπεδο σημαντικότητας 95% και 99% αντίστοιχα οι τιμές των  $F_{0.95,3,3} = 15.44$  και  $F_{0.99,3,3} = 47.47$ .

Στον Πίνακα 3-38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών τεστ, από όπου προκύπτει ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ της τυπικής απόκλισης των δύο τετράδων υπο-δειγμάτων. Συνεπώς, η αβεβαιότητα δεν επηρεάζεται σημαντικά από την αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.

### 3.5.5.4 Σύγκριση μέσων τιμών των υπο-δειγμάτων με και χωρίς αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος

Για να ολοκληρωθεί η σύγκριση των δύο τετράδων υπο-δειγμάτων πραγματοποιήθηκε για κάθε ισότοπο, δίπλευρο t test, συγκρίνοντας την μέση τιμή της ραδιενέργειας τους.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ως μηδενική υπόθεση:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

Ενώ η εναλλακτική υπόθεση είναι:

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

Όπου  $\mu_2$  η μέση τιμή της συγκέντρωσης κάθε ισότοπου για την τετράδα υπο-δειγμάτων που δεν υπέστησαν επεξεργασία και  $\mu_1$  η μέση τιμή της συγκέντρωσης για

την τετράδα υπο-δειγμάτων που υπέστησαν κοσκίνισμα και αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.

Η τιμή του  $t_0$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{N}}} \quad (3.14).$$

Για  $N_1 = N_2 = N = 4$  παρατηρήσεις, οι βαθμοί ελευθερίας δίνονται από τη σχέση:

$$\nu = \frac{(s_1^2 + s_2^2)^2}{(s_1^4 + s_2^4) \cdot (N - 1)} \quad (3.15).$$

Από στατιστικούς πίνακες προκύπτουν για επίπεδο σημαντικότητας 95% και 99% αντίστοιχα οι τιμές των  $t_{0.95}$  και  $t_{0.99}$ , για κάθε ισότοπο. Δεδομένου ότι οι βαθμοί ελευθερίας είναι δεκαδικοί αριθμοί, οι τιμές των  $t_{0.95}$  και  $t_{0.99}$  προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή σε κατάλληλο πίνακα τιμών (Σιμόπουλος 1989) .

Στον Πίνακα 3-39 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των t test για κάθε ισότοπο.

Παρατηρείται ότι:

- Για τα  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{210}\text{Pb}$  η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται, συνεπώς παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας λόγω της αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος. Η διαφοροποίηση αυτή μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι το χονδρόκοκκο κλάσμα, το οποίο αποτελείται κυρίως από χαλίκια, έχει χαμηλά ποσοστά ραδιενέργειας.
- Για το  $^{234}\text{Th}$  η μηδενική υπόθεση επαληθεύεται, συνεπώς η αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος δεν επιδρά στη συγκέντρωση ραδιενέργειας.
- Για το  $^{137}\text{Cs}$  η τιμή του  $t_0$  βρίσκεται στην περιοχή αβεβαιότητας και συνεπώς δεν μπορούμε να προκύψει κάποιο συμπέρασμα.

### **3.6 Επίδραση της λειοτριβίσης στη συγκέντρωση ραδιενέργειας και στην αβεβαιότητα ανάλυσης**

Στο πείραμα επίδρασης του χονδρόκοκκου κλάσματος προέκυψε ότι η αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος επηρεάζει σημαντικά τη μετρούμενη ραδιενέργεια για το σύνολο των υπό μελέτη ισοτόπων. Στο παρόν πείραμα το πλέον χονδρόκοκκο κλάσμα υπέστη λειοτριβίση, ώστε να μπορεί να συσκευαστεί ομοιόμορφα με τα πιο

λεπτόκοκκα κλάσματα και να μελετηθεί κατά πόσον η λειοτριβίση του δείγματος πριν τη συσκευασία επηρεάζει την ανάλυση. Για το σκοπό αυτό, λήφθηκαν δύο δείγματα χρώματος και διαχωρίστηκαν σε 8 υπο-δείγματα. Στη συνέχεια, ακολουθήθηκε η ακόλουθη διαδικασία:

- Τέσσερα από αυτά υπέστησαν κοσκίνισμα. Το κλάσμα άνω των 2 mm αφαιρέθηκε, ενώ το κλάσμα 125  $\mu\text{m}$  – 2 mm υπέστη λειοτριβίση.
- Τα υπόλοιπα τέσσερα υπο-δείγματα υπέστησαν κοσκίνισμα. Το κλάσμα άνω των 2 mm υπέστη σπάσιμο και μετά λειοτριβίση. Το κλάσμα 125  $\mu\text{m}$  – 2 mm υπέστη και αυτό λειοτριβίση.

Τα 8 υπο-δείγματα αναλύθηκαν με τη μέθοδο της  $\gamma$ -φασματοσκοπίας και υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

### 3.6.1 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός σπασίματος

Για το σπάσιμο του χονδρόκοκκου κλάσματος χρησιμοποιήθηκε ο θραυστήρας Retsch BB51. Η μηχανή αυτή αποτελείται από τα ακόλουθα επιμέρους τμήματα:

- Χώρος άλεσης με τη μορφή χοάνης, ο οποίος στενεύει προς το άκρο εξόδου ανάλογα με το ρυθμισμένο πλάτος της σχισμής ανάμεσα στις σιαγόνες.
- Σταθερό μεταλλικό κέλυφος που περικλείει τον χώρο άλεσης.
- Ένα σταθερό βραχίονα θραύσης και ένα κινητό βραχίονα.
- Συρταρωτό δοχείο συγκέντρωσης του επεξεργασμένου υλικού χωρητικότητας περίπου 1000 ml.
- Οθόνη ένδειξης του ρυθμισμένου πλάτους σχισμής.

Η διαδικασία λειτουργίας της συσκευής περιγράφεται αναλυτικά στη ΔΕ της Λ. Πρέντζα (Πρέντζα 2009). Πριν από κάθε χρήση, είναι απαραίτητος ο μηδενισμός σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρεται στο εγχειρίδιο λειτουργίας, έτσι ώστε να συμφωνεί η ένδειξη της οθόνης με το πραγματικό άνοιγμα των σιαγόνων. Συνοπτικά, η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Στροφή του χειροτροχού προς τα αριστερά κατά δύο ολόκληρες περιστροφές ώστε να απομακρυνθούν οι σιαγόνες μεταξύ τους.
- Εκκίνηση του θραυστήρα με το πλήκτρο START.

- Στροφή του χειροτροχού προς τα δεξιά μέχρι να ακουστεί χαρακτηριστικός ήχος επαφής των σιαγόνων θραύσης, έτσι ώστε να είναι μηδενικό το άνοιγμα των σιαγόνων.
- Τερματισμός της λειτουργίας του θραυστήρα με το πλήκτρο STOP, και πάτημα του πλήκτρου μηδενισμού της ένδειξης οθόνης. Έτσι, η ένδειξη της οθόνης ταυτίζεται με το πραγματικό άνοιγμα των σιαγόνων θραύσης.

Επίσης απαραίτητος είναι και ο τακτικός καθαρισμός του θραυστήρα, ο οποίος πραγματοποιείται με χρήση μαλακού πινέλου καθαρίζοντας εξωτερικά το άνοιγμα τροφοδοσίας αλλά και το συρτάρι συγκέντρωσης υλικού. Για τον καθαρισμό των σιαγόνων θραύσης και του χώρου άλεσης, είναι δυνατή η αφαίρεση του προστατευτικού καπακιού, αλλά και των σιαγόνων. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον καθαρισμό του θραυστήρα αποτελεί η αποσύνδεση του από την ηλεκτρική τροφοδοσία, για λόγους ασφαλείας. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι ο καθαρισμός του θραυστήρα είναι δύσκολος και αρκετά χρονοβόρος. Το γεγονός αυτό καθιστά τη θραύση δειγμάτων χόματος ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία για ένα εργαστήριο που θέλει να επεξεργαστεί με ακρίβεια μεγάλο αριθμό δειγμάτων χόματος.

### **3.6.2 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός λειοτρίβισης**

Για τη λειοτρίβιση του χόματος χρησιμοποιήθηκε ο πλανητικός μύλο Retsch PM100.

Η μηχανή αυτή αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα:

- Δοχείο τοποθέτησης υλικού προς λειοτρίβιση, χωρητικότητας 500 ml.
- Σύστημα συγκράτησης του δοχείου λειοτρίβισης.
- Σύστημα ζυγοστάθμισης του δοχείου με αντίβαρο.
- Προστατευτικό περίβλημα, το οποίο καλύπτει τα κινούμενα μέρη της συσκευής κατά τη λειτουργία.
- Σύστημα Interlock που δεν επιτρέπει την έναρξη της λειοτρίβισης σε περίπτωση που δεν έχει ασφαλιστεί το περίβλημα.
- Διακόπτης έκτακτης απασφάλισης του περιβλήματος σε περίπτωση διακοπής ηλεκτρικής τροφοδοσίας.
- Πλήκτρο για το άνοιγμα του περιβλήματος.

- Διακόπτης έναρξης ή διακοπής λειτουργίας ON-OFF.
- Πλήκτρο εκκίνησης και πλήκτρο διακοπής λειοτρίβισης.
- Οθόνη πολλαπλών επιλογών και πλήκτρο για τη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας.

Τον πλανητικό μύλο PM100 συνοδεύουν σφαίρες λειοτρίβισης και ειδικό κλειδί για ασφάλιση του δοχείου τοποθέτησης υλικού. Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει σφαίρες από κορούνδιο ( $Al_2O_3$ ) το οποίο είναι ένα υλικό με σκληρότητα 9 στην κλίμακα Mohs. Οι σφαίρες διατίθενται σε τρία μεγέθη:

- 20 σφαίρες των 20 mm, συνολικού βάρους 327.40 gr
- 8 σφαίρες των 30 mm (449.75 gr)
- σφαίρες των 40 mm (536.75 gr)

Η διαδικασία λειτουργίας της συσκευής περιγράφεται αναλυτικά στη ΔΕ της Λ. Πρέντζα (Πρέντζα 2009). Συνοπτικά, αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Πλήρωση του δοχείου με το προς λειοτρίβιση υλικό και τις σφαίρες κατάλληλου μεγέθους.
- Ζύγιση του δοχείου συμπεριλαμβανομένου, του καλύμματος, των σφαιρών και του υλικού, όχι όμως της αρπάγης συγκράτησης.
- Μετακίνηση του αντίβαρου στη θέση που αντιστοιχεί στο βάρος που μετρήθηκε στο προηγούμενο βήμα.
- Τοποθέτηση του δοχείου στον περιστρεφόμενο φορέα στην κατάλληλη υποδοχή, ευθυγραμμίζοντας την οπή στο κάτω μέρος του δοχείου με τον αντίστοιχο άξονα του φορέα.
- Τοποθέτηση της αρπάγης συγκράτησης στις αντίστοιχες εγκοπές.
- Ασφάλιση της αρπάγης, τραβώντας τον ειδικό δακτύλιο προς τα πάνω και περιστρέφοντας τη χειρολαβή με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Για τη διευκόλυνση της ασφάλισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το ειδικό εργαλείο
- Ασφάλιση του προστατευτικού περιβλήματος.
- Ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας μέσω της οθόνης πολλαπλών επιλογών και του πλήκτρου ρύθμισης.

- Εκκίνηση του μύλου λειοτρίβισης.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, ακολουθείται η αντίστροφη σειρά βημάτων για την απασφάλιση του δοχείου και την παραλαβή του υλικού.

Ο καθαρισμός του μύλου και των σφαιριδίων μπορεί να γίνει με την τοποθέτηση θραυσμάτων γυαλιού και τη λειτουργία του για μικρό χρονικό διάστημα (10 min). Αυτή η μέθοδος καθαρισμού ακολουθήθηκε και στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Από τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας της Λ. Πρέντζα για άμμο θαλάσσης, αποφασίστηκε η ποσότητα χώματος που θα εισάγεται κάθε φορά στον πλανητικό μύλο να μην υπερβαίνει τα 180 gr. Επίσης, επιλέχθηκε η χρήση των μεσαίων σφαιριδίων (διαμέτρου 30 mm) και η ρύθμιση των στροφών στις 200 rpm.

### **3.6.3 Δοκιμή λειοτρίβισης**

Πριν την πραγματοποίηση του πειράματος, έγινε μια δοκιμή λειοτρίβισης, για να υπολογισθεί το βέλτιστο χρόνο λειοτρίβισης για το χώμα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η υπόλοιπη ποσότητα από τα υπο-δείγματα MS510 και MS511. Η συνολική ποσότητα χώματος κοσκινίστηκε στη μηχανή AS-200 Control για 40 min, με πλάτος ταλάντωσης 2 mm, χρησιμοποιώντας μόνο τα κόσκινα των 125 μm και 2 mm και τη βάση στήριξης. Συνεπώς, προέκυψαν τρία κλάσματα:

- Κλάσμα  $> 2$  mm, το οποίο συσκευάστηκε σε σακούλα και δεν χρησιμοποιήθηκε περαιτέρω.
- Κλάσμα  $< 125$  μm, το οποίο συσκευάστηκε σε σακούλα και δεν χρησιμοποιήθηκε περαιτέρω.
- Κλάσμα 125 μm – 2 mm, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή λειοτρίβισης.

Το κλάσμα 125 μm – 2 mm είχε συνολική μάζα 386.30 gr. Η ποσότητα αυτή χωρίστηκε σε τρία τμήματα των 120 gr, κάθε ένα από τα οποία υπέστη λειοτρίβιση με τις ίδιες ρυθμίσεις, αλλά για διαφορετικά χρονικά διαστήματα (30, 20 και 10 min). Πιο αναλυτικά, η λειοτρίβιση έγινε με τις ακόλουθες ρυθμίσεις:

- Φορτίο: 120 gr

- Σφαίρες: 8 σφαίρες, διαμέτρου 30 mm
- Στροφές: 200 rpm
- Χωρίς διακοπή λειτουργίας

Σε κάθε περίπτωση, στο τέλος της λειοτρίβισης το χώμα κοσκινίστηκε και πάλι για 10 min με πλάτος ταλάντωσης 2 mm. Αυτή τη φορά χρησιμοποιήθηκε μόνο το κόσκινο των 125 μm και η βάση στήριξης. Στο τέλος του κοσκινίσματος, ζυγίστηκε η ποσότητα του χώματος που παρέμεινε πάνω από 125 μm μετά τη λειοτρίβιση. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο λόγος της ποσότητας αυτής προς την αρχική ποσότητα του χώματος (120 gr). Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-40. Παρατηρείται ότι στα 10 min λειοτρίβισης το ποσοστό του χώματος που παραμένει πάνω από 125 μm είναι πολύ υψηλό. Επίσης, μετά από 30 min λειοτρίβισης το ποσοστό άνω των 125 μm μειώνεται πολύ λίγο συγκριτικά με το αντίστοιχο ποσοστό για 20 min λειοτρίβισης. Συνεπώς, επιλέγεται ως βέλτιστος χρόνος λειοτρίβισης τα 20 min, για δείγμα χώματος με μάζα μεταξύ 120 και 180 gr.

#### **3.6.4 Δειγματοληψία**

Η 5<sup>η</sup> δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, στη θέση «Πολυτεχνειούπολη 1», στις 31/3/2010. Λήφθηκαν, με τη συνήθη διαδικασία, δύο δείγματα επιφανειακού χώματος. Κατά την επιστροφή στο εργαστήριο τα δείγματα 5-1 και 5-2 ζυγίστηκαν και η νωπή τους μάζα βρέθηκε ίση με 2568 gr και 2368 gr αντίστοιχα.

Στη συνέχεια τα δείγματα αφέθηκαν να ξηρανθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

#### **3.6.5 Προετοιμασία δειγμάτων**

Αρχικά, κάθε δείγμα χωρίστηκε σε τέσσερα υπο-δείγματα με τη μέθοδο του κώνου και της υποδιαίρεσης στα τέσσερα. Το κάθε υπο-δείγμα συσκευάστηκε προσωρινά σε σακούλα.

Στη συνέχεια, η κάθε τετράδα υπο-δειγμάτων υπέστη διαφορετική προετοιμασία.

##### **3.6.5.1 Προετοιμασία υπο-δειγμάτων με αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος και λειοτρίβιση**

Για κάθε υπο-δείγμα ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Κοσκίνισμα για 20 min με διακοπές ανά 30 sec, πλάτος ταλάντωσης 2 mm και χρήση μόνο των κόσκινων των 125 μm και 2 mm.

- Αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος (άνω των 2 mm) και συσκευασία σε σακούλα. Το κλάσμα αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια.
- Πρόχειρη συσκευασία σε σακούλα του λεπτόκοκκου κλάσματος (κάτω από 125 μm).
- Λειοτριβίση του κλάσματος 125 μm – 2 mm στον πλανητικό μύλο για 20 min, στις 200 rpm. Στις περιπτώσεις όπου το εν λόγω κλάσμα υπερέβαινε τα 180 gr, χωριζόταν σε μικρότερα τμήματα τα οποία εισάγονταν διαδοχικά στο μύλο.
- Πρόχειρη συσκευασία του χώματος μετά τη λειοτριβίση στην ίδια σακούλα μαζί με το λεπτόκοκκο κλάσμα.
- Ομογενοποίηση του χώματος.
- Μέτρηση της υγρασίας.
- Συσκευασία σε δοχείο γεωμετρίας 2 κατά τα γνωστά.

Τα βασικά στοιχεία των υπο-δειγμάτων που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-41.

### **3.6.5.2 Προετοιμασία υπο-δειγμάτων με λειοτριβίση του συνόλου του δείγματος**

Για κάθε υπο-δείγμα ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Κοσκίνισμα για 20 min με διακοπές ανά 30 sec, πλάτος ταλάντωσης 2 mm και χρήση μόνο των κόσκινων των 125 μm και 2 mm.
- Πρόχειρη συσκευασία σε σακούλα του λεπτόκοκκου κλάσματος (κάτω από 125 μm).
- Θραύση του χονδρόκοκκου κλάσματος (άνω των 2 mm) στο θραυστήρα για περίπου 5 min. Κατά την επεξεργασία του πρώτου υπο-δείγματος αυτής της τετράδας ελέγχθηκε κατά πόσο το χονδρόκοκκο κλάσμα πρέπει να εισαχθεί και στο μύλο μετά το θραυστήρα. Για να γίνει αυτός ο έλεγχος, μετά το σπάσιμο το χώμα κοσκινίστηκε για 10 min, με πλάτος ταλάντωσης 2 mm, μόνο με το κόσκινο των 125 μm. Προέκυψε ότι, μετά το σπάσιμο, από τα αρχικά 258.44 gr μόνο τα 130 gr ήταν μικρότερα από 125 μm. Συνεπώς κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή και αυτού του κλάσματος στον πλανητικό



μύλο. Συνεπώς, στη συνέχεια το κλάσμα αυτό ενώνεται με το κλάσμα 125  $\mu\text{m}$  – 2 mm.

- Λειοτριβίση των δύο χονδρόκοκκων κλασμάτων στον πλανητικό μύλο για 20 min, στις 200 rpm. Στις περιπτώσεις όπου τα εν λόγω κλάσματα υπερέβαιναν συνολικά τα 180 gr, χωρίζονταν σε μικρότερα τμήματα τα οποία εισάγονταν διαδοχικά στο μύλο.
- Πρόχειρη συσκευασία του χώματος μετά τη λειοτριβίση στην ίδια σακούλα μαζί με το λεπτόκοκκο κλάσμα.
- Ομογενοποίηση του χώματος.
- Μέτρηση της υγρασίας.
- Συσκευασία σε δοχείο γεωμετρίας 2 κατά τα γνωστά.

Τα βασικά στοιχεία των υπο-δειγμάτων που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-41.

### 3.6.6 $\gamma$ -Φασματοσκοπική ανάλυση

Το κάθε υπο-δείγμα αναλύθηκε  $\gamma$ -φασματοσκοπικά στον ανιχνευτή HPGe με διάρκεια συλλογής φάσματος 172800 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$ . Ακόμα, αναλύθηκε στον ανιχνευτή LEGe με διάρκεια συλλογής φάσματος 345600 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Στον Πίνακα 3-42 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των φασμάτων που προέκυψαν από τη  $\gamma$ -φασματοσκοπική ανάλυση των 8 υπο-δειγμάτων. Στους Πίνακες 3-43 έως 3-47 δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου. Στους ίδιους πίνακες παρουσιάζεται και η αβεβαιότητα της ανάλυσης, συνυπολογίζοντας σε κάθε περίπτωση την αβεβαιότητα του υποστρώματος.

### 3.6.7 Στατιστική ανάλυση

#### 3.6.7.1 Εκτέλεση ανάλυσης ANOVA

Για την ανάλυση ANOVA μίας παραμέτρου με 7 βαθμούς ελευθερίας χρησιμοποιήθηκε το ίδιο Excel όπως και στην Παράγραφο 3.5.5.1. Για την ανάλυση αυτή:

- Ανεξάρτητος παράγων είναι η προετοιμασία του δείγματος. Έχουμε δύο επίπεδα του παράγοντα, επεξεργασία που περιλαμβάνει αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος και λειοτριβίση του δείγματος και επεξεργασία χωρίς αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος και λειοτριβίση.
- Παρατηρήσεις σε κάθε επίπεδο είναι τα υπο-δείγματα. Άρα, έχουμε 4 παρατηρήσεις σε κάθε επίπεδο.
- Ελεγχόμενη μεταβλητή είναι η ειδική ραδιενέργεια του εξεταζόμενου κάθε φορά ισότοπου.

Στους Πίνακες 3-48 έως και 3-52 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$  αντίστοιχα.

Από πίνακες προκύπτει ότι για να γίνει αποδεκτή η μηδενική υπόθεση σε επίπεδο σημαντικότητας 95%, με βαθμούς ελευθερίας 1 και 6 πρέπει:  $F_0 < F_{0.95,1,6} = 5.99$ , ενώ, για να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση σε επίπεδο σημαντικότητας 99%, με βαθμούς ελευθερίας 1 και 6 πρέπει:  $F_0 > F_{0.99,1,6} = 13.75$ .

Προκύπτει επομένως ότι:

- Για το  $^{137}\text{Cs}$ ,  $F_0 = 546.04 > F_{0.95,1,6}$ . Άρα, η μηδενική υπόθεση του στατιστικού τεστ δεν επαληθεύεται και οι δύο πληθυσμοί υπο-δειγμάτων που υπέστησαν επεξεργασία με διαφορετικές μεθόδους διαφέρουν.

Ομοίως με το  $^{137}\text{Cs}$  ισχύει και για τα ισότοπα:

- $^{40}\text{K}$  ( $F_0 = 128.40 > F_{0.95,1,6}$ ).
- $^{228}\text{Ac}$  ( $F_0 = 25.14 > F_{0.95,1,6}$ ).
- $^{210}\text{Pb}$  ( $F_0 = 365.76 > F_{0.95,1,6}$ ).
- $^{234}\text{Th}$  ( $F_0 = 14.13 > F_{0.95,1,6}$ ).

Συνεπώς, η διαδικασία της λειοτριβίσης του πλέον χονδρόκοκκου κλάσματος και ενσωμάτωσής του στο τελικό δείγμα επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη συγκέντρωση της ραδιενέργειας, για όλα τα υπό μελέτη ισότοπα.

Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς δείχνει ότι η μη τυποποιημένη διαδικασία προετοιμασίας και συσκευασίας του δείγματος επιτρέπει σημαντικό

περιθώριο αλλοίωσης του αποτελέσματος, ανάλογα με την υποκειμενική κρίση του ερευνητή για το ποια από τα χονδρόκοκκα υλικά, όπως χαλίκια και άλλα, πρέπει να συμπεριληφθούν στο δείγμα και σε τι ποσοστό.

### 3.6.7.2 Εκτίμηση αβεβαιότητας λόγω προετοιμασίας

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας λόγω προετοιμασίας ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.5.5.2.

Υπολογίστηκε για κάθε ισότοπο η τυπική απόκλιση των τιμών ραδιενέργειας των υπο-δειγμάτων στα οποία αφαιρέθηκε το χονδρόκοκκο κλάσμα (MS526 – MS529) και ξεχωριστά η τυπική απόκλιση των τιμών ραδιενέργειας των υπο-δειγμάτων στα οποία το χονδρόκοκκο κλάσμα υπέστη σπάσιμο και λειοτρίβιση (MS530 – MS533). Στη συνέχεια, για να ελεγχθεί εάν οι τιμές αυτές είναι στατιστικά διαφορετικές από την αβεβαιότητα ανάλυσης  $s_R$ , πραγματοποιήθηκε για κάθε τετράδα τεστ  $\chi^2$  με

$$\chi_0^2 = \frac{\nu \cdot s^2}{\sigma_R^2} \text{ και } \nu = 4 - 1 = 3 \text{ βαθμούς ελευθερίας.}$$

Μηδενική υπόθεση:  $H_0: \sigma^2 = \sigma_R^2$ .

Εναλλακτική υπόθεση:  $H_1: \sigma^2 > \sigma_R^2$ .

Για τον υπολογισμό της  $\sigma_R^2$ , χρησιμοποιήθηκε κατά προσέγγιση η Σχέση (3.13) της Παραγράφου 3.4.4.5, ξεχωριστά για κάθε τετράδα υπο-δειγμάτων.

Για να συγκριθεί σε επίπεδο σημαντικότητας 95%, με 3 βαθμούς ελευθερίας, από πίνακες (Σιμόπουλος 1989) βρίσκεται ότι πρέπει:  $\chi_0^2 < \chi_{0,95,3}^2 = 7.81$ .

Στους Πίνακες 3-53 και 3-54 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών τεστ για τις δύο τετράδες υπο-δειγμάτων.

- Στη τετράδα υπο-δειγμάτων που υπέστη λειοτρίβιση και αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος (MS526-529) η μηδενική υπόθεση επαληθεύεται για όλα τα υπό μελέτη ισότοπα, δηλαδή η κύμανση που εμφανίζει η ραδιενέργεια των ισωτόπων φαίνεται να οφείλεται αποκλειστικά στην αβεβαιότητα ανάλυσης.
- Στη τετράδα υπο-δειγμάτων που υπέστη λειοτρίβιση χωρίς να προηγηθεί αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος (MS530-533) η μηδενική

υπόθεση επαληθεύεται για τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ . Αντιθέτως, για τα  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$  η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται.

- Για τα  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$  μπορεί να υπολογιστεί η αβεβαιότητα προετοιμασίας για τα υπο-δείγματα που υπέστησαν λειοτριβίση χωρίς να προηγηθεί αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος (MS530-533) από τη σχέση:

$$s^2 = s_{prep}^2 + s_R^2 \quad (3.16),$$

Όπου  $s^2$  η τυπική απόκλιση.

Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-55. Παρατηρείται ότι, σε σχετικούς όρους, η αβεβαιότητα προετοιμασίας έχει αυξηθεί και για τα δύο ισότοπα εν συγκρίσει με τις τιμές που είχαν προκύψει από το πείραμα εκτίμησης της αβεβαιότητας προετοιμασίας δείγματος. Συνεπώς, για τα ισότοπα αυτά η συσκευασία του χονδρόκοκκου κλάσματος μετά από λειοτριβίση επηρεάζει δυσμενώς την αβεβαιότητα της μέτρησης.

### 3.6.7.3 Σύγκριση μέσων τιμών

Για να υπάρξει μια πιο πλήρης εικόνα της επίδρασης των δύο μεθόδων επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν πείραμα, πραγματοποιήθηκε δίπλευρο t test για να συγκριθεί η μέση τιμή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας κάθε μίας από τις τετράδες αυτού του πειράματος με την τετράδα MS510-513 του πειράματος επίδρασης του χονδρόκοκκου κλάσματος, η οποία δεν είχε υποστεί περαιτέρω επεξεργασία και περιγράφεται στην Παράγραφο 3.5. Σε κάθε περίπτωση, η τιμή του  $t_0$  υπολογίζεται από τη σχέση (3.14), οι βαθμοί ελευθερίας από τη σχέση (3.15) και η μηδενική υπόθεση και η εναλλακτική υπόθεση αντίστοιχα είναι:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

Όπου ο δείκτης '2' δηλώνει την τετράδα υπο-δειγμάτων που δεν υπέστησαν επεξεργασία και ο δείκτης '1' δηλώνει την εκάστοτε υπο-μελέτη τετράδα υπο-δειγμάτων του παρόντος πειράματος, που υπέστησαν περαιτέρω επεξεργασία.

Για επίπεδο σημαντικότητας 95% και 99% αντίστοιχα οι τιμές των  $t_{0,95}$  και  $t_{0,99}$ , για κάθε ισότοπο έχουν υπολογιστεί στην Παράγραφο 3.5.5.4.

Για τα υπο-δείγματα που υπέστησαν λειοτρίβιση και αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος τα αποτελέσματα των t test παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-56. Παρατηρείται ότι:

- Για τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ , και  $^{210}\text{Pb}$  η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται, συνεπώς παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας λόγω επεξεργασίας του δείγματος.
- Για το  $^{234}\text{Th}$  η μηδενική υπόθεση επαληθεύεται, συνεπώς η συγκεκριμένη μέθοδος επεξεργασίας δεν επιδρά στη συγκέντρωση ραδιενέργειας.
- Για το  $^{228}\text{Ac}$  η τιμή του  $t_0$  βρίσκεται στην περιοχή αβεβαιότητας και συνεπώς δεν μπορούμε να προκύψει συμπέρασμα.
- Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι οι συγκρίσεις για τη μέση τιμή ραδιενέργειας δειγμάτων που υπέστησαν διαφορετική επεξεργασία, πραγματοποιήθηκαν για δείγματα που λήφθηκαν από την ίδια θέση δειγματοληψίας, αλλά από διαφορετικές δειγματοληψίες. Από το πείραμα εκτίμησης της αβεβαιότητας προετοιμασίας προέκυψε ότι η αβεβαιότητα δειγματοληψίας για το  $^{137}\text{Cs}$  είναι 15%. Αλλά και για τα υπόλοιπα ισότοπα ενδεχομένως να παρατηρείται μικρότερη χωρική κύμανση της ραδιενέργειας. Συνεπώς, τα παραπάνω συμπεράσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν απολύτως ασφαλή, αφού δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η χωρική κύμανση της ραδιενέργειας και η διαφοροποίηση που ενδεχομένως αυτή προκαλεί στη μέση τιμή της ραδιενέργειας των διαφορετικών ομάδων υπο-δειγμάτων.

Για τα υπο-δείγματα που υπέστησαν λειοτρίβιση χωρίς να προηγηθεί αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος τα αποτελέσματα των t test παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-57. Παρατηρούμε ότι:

- Για τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ , και  $^{210}\text{Pb}$  η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται, συνεπώς παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας λόγω της μεθόδου επεξεργασίας του δείγματος.
- Για τα  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{234}\text{Th}$  η μηδενική υπόθεση επαληθεύεται, συνεπώς η συγκεκριμένη μέθοδος επεξεργασίας δεν επιδρά στη συγκέντρωση ραδιενέργειας.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι οι συγκρίσεις για τη μέση τιμή ραδιενέργειας δειγμάτων που υπέστησαν διαφορετική επεξεργασία, πραγματοποιήθηκαν για δείγματα που λήφθηκαν από την ίδια θέση δειγματοληψίας, αλλά από διαφορετικές δειγματοληψίες. Από το πείραμα εκτίμησης της αβεβαιότητας προετοιμασίας προέκυψε ότι η αβεβαιότητα δειγματοληψίας για το  $^{137}\text{Cs}$  είναι της τάξης 15%. Αλλά και για τα υπόλοιπα ισότοπα ενδεχομένως να παρατηρείται μικρότερη χωρική κύμανση της ραδιενέργειας. Συνεπώς, τα παραπάνω συμπεράσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν απολύτως ασφαλή, αφού δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η χωρική κύμανση της ραδιενέργειας και η διαφοροποίηση που ενδεχομένως αυτή προκαλεί στη μέση τιμή της ραδιενέργειας των διαφορετικών ομάδων υπο-δειγμάτων.

### **3.7 Σύγκριση των δύο μεθόδων προετοιμασίας που περιλαμβάνουν αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος**

Για να διαπιστωθεί ποιος είναι ο πλέον κατάλληλος τρόπος επεξεργασίας των δειγμάτων στα οποία έχει αφαιρεθεί το χονδρόκοκκο κλάσμα, κρίθηκε απαραίτητο να γίνει πιο αναλυτικά η σύγκριση μεταξύ των δύο ομάδων υπο-δειγμάτων στα οποία αυτό αφαιρέθηκε (δείγματα MS514-517: αφαίρεση χονδρόκοκκου κλάσματος, δείγματα MS526-529: αφαίρεση χονδρόκοκκου κλάσματος και λειοτριβίση του δείγματος).

#### **3.7.1 Σύγκριση μέσων τιμών**

Αρχικά, πραγματοποιήσαμε δίπλευρο t test για τη σύγκριση των μέσων τιμών των δύο ομάδων υπο-δειγμάτων, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.14) και (3.15).

Μηδενική υπόθεση:  $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Εναλλακτική υπόθεση:  $H_1: \mu_1 > \mu_2$

Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων για κάθε ισότοπο φαίνονται στον Πίνακα 3-58.

Από τον πίνακα παρατηρείται ότι:

- Η αρχική υπόθεση γίνεται αποδεκτή για τα ισότοπα  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{234}\text{Th}$ . Συνεπώς, στα ισότοπα αυτά οι δύο υπό μελέτη μέθοδοι προετοιμασίας δεν μεταβάλλουν σημαντικά την τιμή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των δειγμάτων.

- Η αρχική υπόθεση απορρίπτεται για το ισότοπο  $^{210}\text{Pb}$ . Συνεπώς, στο ισότοπο αυτό οι δύο υπό μελέτη μέθοδοι προετοιμασίας μεταβάλλουν σημαντικά την τιμή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των δειγμάτων.
- Η τιμή του  $t_0$  βρίσκεται στην περιοχή αβεβαιότητας για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$ . Συνεπώς, για τα ισότοπα αυτά δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα.

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 3.6.7.3, οι συγκρίσεις για τη μέση τιμή ραδιενέργειας δειγμάτων που υπέστησαν διαφορετική επεξεργασία, πραγματοποιήθηκαν για δείγματα που λήφθηκαν από διαφορετικές δειγματοληψίες. Συνεπώς, τα παραπάνω συμπεράσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν απολύτως ασφαλή, αφού δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η χωρική κύμανση της ραδιενέργειας και η διαφοροποίηση που ενδεχομένως αυτή προκαλεί στη μέση τιμή της ραδιενέργειας των διαφορετικών ομάδων υπο-δειγμάτων.

### 3.7.2 Σύγκριση τυπικών αποκλίσεων

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε F test για τη σύγκριση των τυπικών αποκλίσεων των δύο ομάδων υπο-δειγμάτων.

Μηδενική υπόθεση:  $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ .

Εναλλακτική υπόθεση:  $H_1: \sigma_1 > \sigma_2$ .

Η τιμή του  $F_0$  υπολογίζεται από τη σχέση  $F_0 = \frac{s_1^2}{s_2^2}$ , ενώ για  $N_1 = N_2 = N = 4$

παρατηρήσεις, οι βαθμούς ελευθερίας θα είναι:  $\nu_1 = \nu_2 = N - 1 = 3$ .

Από στατιστικούς πίνακες προκύπτει για επίπεδο σημαντικότητας 95% και 99% αντίστοιχα οι τιμές των  $F_{0,95} = 15.44$  και  $F_{0,99} = 47.47$ .

Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων για κάθε ισότοπο φαίνονται στον Πίνακα 3-59.

Παρατηρείται ότι για όλα τα ισότοπα η τυπική απόκλιση δεν διαφέρει σημαντικά. Συνεπώς, οι μέθοδοι προετοιμασίας που δοκιμάστηκαν και συμπεριλαμβάνουν την αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος, δεν επιδρούν σημαντικά στην αβεβαιότητα της προετοιμασίας και άρα, εφ' όσον το χονδρόκοκκο κλάσμα αφαιρεθεί από το δείγμα, η περαιτέρω επεξεργασία της υπόλοιπης ποσότητας δεν φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο.

### **3.8 Επίδραση της θερμοκρασίας ξήρανσης στη συγκέντρωση ραδιενέργειας**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σύμφωνα με την τυπική διαδικασία προετοιμασίας δειγμάτων χώματος που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, η αεροξήρανση του χώματος πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ζητούμενο είναι η υγρασία να μειωθεί μέχρι μέγιστη τιμή 5%. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει ιδιαίτερα χρονοβόρα, ειδικά όταν το δείγμα έχει μεγάλη μάζα. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η ξήρανση του δείγματος 2-2 (μάζας 10 kg) διήρκεσε 9 μέρες.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται σε αρκετές περιπτώσεις η ξήρανση του χώματος με θέρμανση σε φούρνο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα από τη βιβλιογραφία δόθηκαν στην Παράγραφο 2.5.1.2.

Στο παρόν πείραμα ζητούμενο ήταν να ελεγχθεί κατά πόσον η θέρμανση ενός δείγματος χώματος επηρεάζει τη συγκέντρωση ραδιενέργειας. Ιδιαίτερα ενδιαφέρει η μελέτη των ισοτόπων που εμφανίζουν πτητική συμπεριφορά, όπως είναι το  $^{137}\text{Cs}$  και ο  $^{210}\text{Pb}$  (Αναγνωστάκης 2005). Για το σκοπό αυτό, ξηράθηκαν τρία υπο-δείγματα χώματος σε διαφορετικές θερμοκρασίες, 50, 100 και 150 °C, ενώ ένα τέταρτο υπο-δείγμα, προερχόμενο από το ίδιο αρχικό δείγμα, αφέθηκε να αεροξηρανθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, τα τέσσερα υπο-δείγματα αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας και υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ . Στη συνέχεια, τα πειραματικά αποτελέσματα απεικονίστηκαν γραφικά σε διαγράμματα συγκέντρωσης ραδιενέργειας – θερμοκρασίας. Τέλος, για κάθε ισότοπο υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης και πραγματοποιώντας κατάλληλο στατιστικό test αξιολογήθηκε κατά πόσο υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών.

#### **3.8.1 Δειγματοληψία**

Η 4<sup>η</sup> δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, στη «Θέση Πολυτεχνειούπολη 1», στις 11/1/2010. Λήφθηκε το δείγμα επιφανειακού χώματος 4-1.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η 5<sup>η</sup> δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στις 31/3/2010. Τα δείγματα που συλλέχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση του πειράματος επίδρασης της λειοτρίβισης, που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.6. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι κατά την εκπόνηση της παρούσης ΔΕ ορισμένα



πειράματα πραγματοποιήθηκαν παράλληλα. Η σειρά με την οποία περιγράφονται εδώ, δεν είναι απαραίτητα και η χρονολογική σειρά με την οποία εκτελέστηκαν.

### **3.8.2 Αρχική προεργασία**

Κατά την επιστροφή στο εργαστήριο και πριν τη ξήρανση των υπο-δειγμάτων πραγματοποιήθηκε η ακόλουθη προεργασία του δείγματος:

- Ζυγίστηκε και η νωπή του μάζα βρέθηκε ίση με 3002 gr.
- Μετρήθηκε η υγρασία του. Μετά από 5 λεπτά, η ένδειξη του μετρητή δεν είχε σταθεροποιηθεί. Μετά από 5 επιπλέον λεπτά προέκυψε ότι η τιμή της υγρασίας του δείγματος είναι 20%.
- Το δείγμα ομογενοποιήθηκε. Για την ομογενοποίηση χρησιμοποιήθηκε πλαστικό βαρέλι ενώ η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.5.1.
- Αφαιρέθηκαν με το χέρι τα χόρτα και άλλα ξένα υλικά.
- Διαχωρίστηκε σε τέσσερα υπο-δείγματα με τη μέθοδο του κώνου και της υποδιαίρεσης στα τέσσερα. Από τα τέσσερα υπο-δείγματα, το ένα αφέθηκε σε χαρτί για να αεροξηρανθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ τα άλλα τρία υπέστησαν περαιτέρω επεξεργασία.

### **3.8.3 Ξήρανση**

Αποφασίστηκε η θέρμανση των τριών υπο-δειγμάτων σε φούρνο σε θερμοκρασίες 50, 100 και 150 °C. Χρησιμοποιήθηκε ο κλίβανος Ka 120P του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ο οποίος διαθέτει δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας με θερμοστάτη στην περιοχή 0-350 °C.

Τα τρία υπο-δείγματα τοποθετήθηκαν διαδοχικά σε γυάλινο πυρέξ, βάρους 2138 gr, μετρήθηκε η αρχική τους μάζα και τοποθετήθηκαν στον κλίβανο. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα τα δείγματα αφαιρούνταν από τον κλίβανο και ζυγίζονταν ώστε να ελέγχεται η μεταβολή της μάζα τους. Προς το τέλος της διαδικασίας, το ζύγισμα γινόταν ανά δεκάλεπτο και η ξήρανση σε κάθε περίπτωση τερματίστηκε όταν η μάζα του δείγματος παρέμεινε σταθερή σε δύο διαδοχικές μετρήσεις.

### **3.8.3.1 Θέρμανση στους 150 °C**

Το πρώτο υπο-δείγμα θερμάνθηκε στους 150 °C. Ο φούρνος δεν είχε αρχικά προθερμανθεί. Μετά από 40 λεπτά η θερμοκρασία στο φούρνο έφτασε πράγματι στους 150 °C. Συνολικά, η θέρμανση διήρκεσε 130 λεπτά. Το αρχικό μεικτό βάρος ήταν 2776 gr ενώ το τελικό 2654 gr. Δηλαδή, η συνολική σχετική απώλεια μάζας κατά τη θέρμανση ήταν της τάξης του 19%. Στη συνέχεια το χώμα αφέθηκε να κρυώσει.

Η τελική μέτρηση της υγρασίας του υπο-δείγματος πραγματοποιήθηκε ακριβώς πριν από τη συσκευασία του. Αυτό έγινε για να εξασφαλιστεί ο σωστός υπολογισμός της υγρασίας, καθώς από τη στιγμή που το δείγμα βγήκε από το φούρνο έως τη συσκευασία του, πιθανόν να απορρόφησε υγρασία από τον αέρα του περιβάλλοντος.

### **3.8.3.2 Θέρμανση στους 100 °C**

Το δεύτερο υπο-δείγμα θερμάνθηκε στους 100 °C. Συνολικά, η θέρμανση διήρκεσε 203 λεπτά. Το αρχικό μεικτό βάρος του υπο-δείγματος ήταν 2982 gr, ενώ το τελικό 2820 gr, άρα η συνολική σχετική απώλεια μάζας ήταν 19%.

### **3.8.3.3 Θέρμανση στους 50 °C**

Το τρίτο υπο-δείγμα θερμάνθηκε στους 50 °C. Το υπο-δείγμα αφέθηκε στο φούρνο όλο το βράδυ. Συνολικά, η θέρμανση διήρκεσε 900 λεπτά (15 ώρες). Το αρχικό μεικτό βάρος του υπο-δείγματος ήταν 2980 gr, ενώ το τελικό 2838 gr, άρα η συνολική σχετική απώλεια μάζας ήταν 17%.

## **3.8.4 Κοσκίνισμα**

Καθώς από τα προηγούμενα πειράματα προέκυψε στατιστικά σημαντική επίδραση της αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος (> 2 mm) στις τελικές τιμές της συγκέντρωσης των εξεταζόμενων ισοτόπων, αποφασίστηκε η αφαίρεσή του και στα υπο-δείγματα αυτού του πειράματος. Για το λόγο αυτό, μετά τη ξήρανση τα τρία υπο-δείγματα κοσκινίστηκαν για το διαχωρισμό του χονδρόκοκκου κλάσματος. Χρησιμοποιήθηκε η μηχανή AS-200 Control. Πάνω από τη βάση στήριξης τοποθετήθηκε το κόσκινο των 2 mm, στο οποίο εισήχθη το χώμα. Από πάνω τοποθετήθηκαν και τα υπόλοιπα κόσκινα, για να περιοριστούν οι κραδασμοί κατά τη λειτουργία της μηχανής. Τα τρία υπο-δείγματα κοσκινίστηκαν διαδοχικά επί 20 λεπτά, με πλάτος ταλάντωσης 2 mm. Η ποσότητα του χώματος πάνω από 2 mm αφαιρέθηκε.

Το τέταρτο υπο-δείγμα, που είχε αφεθεί να αεροξηρανθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, κοσκινίστηκε με τις ίδιες παραμέτρους λειτουργίας μετά από 3 μέρες.

### **3.8.5 Συσκευασία υπο-δειγμάτων**

Στις 12/1/2010 συσκευάστηκαν τα υπο-δείγματα MS518-520, σε πλαστικά δοχεία γεωμετρίας 2, ακολουθώντας την γνωστή διαδικασία, αφού πρώτα μετρήθηκε η υγρασία τους.

Στις 15/1/2010 συσκευάστηκε με όμοιο τρόπο και το υπο-δείγμα MS521.

Τα τέσσερα δοχεία δεν σφραγίστηκαν άμεσα με ρητίνη. Η διαδικασία αυτή έγινε κατά τα γνωστά στις 22/2/2010.

Στον Πίνακα 3-60 φαίνεται η ονομασία κάθε υπο-δείγματος, καθώς και ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά τους.

### **3.8.6 γ-φασματοσκοπική ανάλυση**

Το κάθε υπο-δείγμα αναλύθηκε γ-φασματοσκοπικά στον ανιχνευτή HPGe με διάρκεια συλλογής φάσματος 172800 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$ . Ακόμα, αναλύθηκαν στον ανιχνευτή LEGe με διάρκεια συλλογής φάσματος 345600 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Στον Πίνακα 3-61 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των φασμάτων που προέκυψαν. Στους Πίνακες 3-62 έως 3-66 δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου. Στους ίδιους πίνακες παρουσιάζεται και η αβεβαιότητα της ανάλυσης, συνυπολογίζοντας την αβεβαιότητα του υποστρώματος.

### **3.8.7 Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων**

#### **3.8.7.1 Διάγραμμα ραδιενέργειας – θερμοκρασίας**

Βάση των πειραματικών δεδομένων χαράχθηκαν τα διαγράμματα συγκέντρωσης ραδιενέργειας – θερμοκρασίας για κάθε ισότοπο (Σχήματα 3-2 έως **Error! Reference source not found.**).

Από τα διαγράμματα αυτά δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια συσχέτιση των δύο μεγεθών για κανένα από τα ισότοπα. Στα διαγράμματα του  $^{137}\text{Cs}$ , του  $^{228}\text{Ac}$  και του  $^{234}\text{Th}$  δεν υπάρχει κύμανση των τιμών της ραδιενέργειας. Η κύμανση που

παρατηρείται για το  $^{40}\text{K}$  και το  $^{210}\text{Pb}$  δεν φαίνεται να είναι σημαντική και εξηγείται από τη φυσιολογική χωρική κύμανση των ισοτόπων στο χώμα.

### 3.8.7.2 Υπολογισμός συντελεστή συσχέτισης

Για να επιβεβαιωθεί ότι πράγματι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών υπολογίστηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης βάση της σχέσης:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum ((x_i - \bar{x})^2) \cdot \sum ((y_i - \bar{y})^2)}} \quad (3.17)$$

Για τα τέσσερα υπό μελέτη ισότοπα προέκυψαν οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης, όπως αυτές φαίνονται στον Πίνακα 3-67.

Η τιμή του  $r$  κυμαίνεται μεταξύ  $-1$  και  $1$ . Όσο πλησιάζει στο μηδέν η συσχέτιση των δύο μεγεθών είναι χαμηλότερη. Για να διαπιστωθεί κατά πόσον η τιμή του  $r$  είναι στατιστικά ίση με το μηδέν, και άρα δεν υπάρχει συσχέτιση, πραγματοποιήθηκε μονόπλευρο  $t$ -test με μηδενική και εναλλακτική υπόθεση αντίστοιχα:

$$H_0: r=0$$

$$H_1: r>0$$

Η τιμή του  $t_0$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t_0 = r \frac{\sqrt{v}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3.18)$$

Ενώ για  $N = 4$  παρατηρήσεις, και άρα  $v = N - 2 = 2$  βαθμούς ελευθερίας, από στατιστικούς πίνακες προκύπτει για επίπεδο σημαντικότητας 95% και 99% αντίστοιχα:

$$t_{0,95}=4.303$$

$$t_{0,99}=9.925$$

Στον Πίνακα 3-68 φαίνονται οι τιμές του  $t_0$  για κάθε ισότοπο. Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής συσχέτισης μπορεί να θεωρηθεί μηδενικός, ακόμα και με επίπεδο σημαντικότητας 99%, για όλα τα ισότοπα. Άρα, πράγματι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ραδιενέργειας και τη θερμοκρασία ξήρανσης του δείγματος. Συνεπώς, η χρονοβόρος διαδικασία της αεροξήρανσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος θα μπορούσε να αντικατασταθεί από την ξήρανση των δειγμάτων σε

φούρνο. Το συμπέρασμα αυτό είναι πολύ σημαντικό, ειδικά στην περίπτωση που ένα εργαστήριο θέλει να διαχειριστεί μεγάλο αριθμό δειγμάτων χώματος σε περιορισμένο χρονικό διάστημα.

### **3.9 Συμπεράσματα**

Στις παραγράφους που προηγήθηκαν παρουσιάστηκαν οι αναλύσεις που έγιναν και τα αποτελέσματά τους για μία σειρά πειραμάτων που σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν, με στόχο τη διερεύνηση των αβεβαιοτήτων που εισάγονται κατά τη δειγματοληψία και γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χώματος. Από τις αναλύσεις και τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους κατέστη δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις αβεβαιότητες που εισάγονται στα διάφορα στάδια της δειγματοληψίας, της προετοιμασίας των δειγμάτων και της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης τους.

Από το πείραμα εκτίμησης της αβεβαιότητας προετοιμασίας προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Για το  $^{137}\text{Cs}$  διαπιστώθηκε ότι εισάγεται σημαντική αβεβαιότητα λόγω της θέσης δειγματοληψίας, η οποία προκαλεί σημαντικές αποκλίσεις στη μετρούμενη τιμή της ραδιενέργειας, ακόμα και μεταξύ δειγμάτων που λήφθηκαν από κοντινές θέσεις. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται σε πραγματική χωρική ανομοιογένεια στην κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$ . Ενδέχεται, όμως, να σχετίζεται και με ιδιαιτερότητες της δειγματοληψίας, όπως παραδείγματος χάριν είναι η μη αυστηρή τήρηση των ορίων βάθους δειγματοληψίας ανάλογα με τον δειγματολήπτη, ειδικά για μικρού πάχους επιφανειακά δείγματα.
2. Για τα υπόλοιπα ισότοπα που εξετάστηκαν ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ ) δεν διαπιστώθηκε σημαντική συνεισφορά της δειγματοληψίας στην αβεβαιότητα.
3. Για τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{210}\text{Pb}$  διαπιστώθηκε ότι εισάγεται σημαντική αβεβαιότητα λόγω της προετοιμασίας του δείγματος με τη μέχρι σήμερα χρησιμοποιούμενη στο ΕΠΤ-ΕΜΠ μέθοδο. Η τιμή της αβεβαιότητας προετοιμασίας εμφανίζει μεγάλη διαφοροποίηση ανάλογα με την ιδιαίτερη συμπεριφορά κάθε ισότοπου.
4. Προέκυψε αριθμητική εκτίμηση της αβεβαιότητας λόγω προετοιμασίας του δείγματος και της αβεβαιότητας λόγω της δειγματοληψίας. Η αβεβαιότητα

λόγω προετοιμασίας εκτιμήθηκε σε επίπεδο 1σ ίση με 1.1% για το  $^{40}\text{K}$ , 2.7% για το  $^{210}\text{Pb}$  και 7% για το  $^{137}\text{Cs}$  για τα δείγματα που εξετάστηκαν στην παρούσα ΔΕ. Η αβεβαιότητα λόγω δειγματοληψίας εκτιμήθηκε ίση με 15.2% για το  $^{137}\text{Cs}$ , ενώ δεν ήταν μετρήσιμη για τα υπόλοιπα ισότοπα.

Από το πείραμα επίδρασης του χονδρόκοκκου κλάσματος του χώματος προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα αναφορικά με τα επίπεδα ραδιενέργειας των διαφόρων ισotόπων που προσδιορίστηκαν:

1. Η αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος (άνω των 2 mm) αυξάνει σημαντικά τη συγκέντρωση ραδιενέργειας για τα ισότοπα  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{210}\text{Pb}$ . Η αύξηση αυτή ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι το χονδρόκοκκο κλάσμα αποτελείται κυρίως από χαλίκια και αναμένεται να έχει χαμηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας. Υπενθυμίζουμε ότι, όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.2.1, το κλάσμα άνω των 2 mm θεωρείται ότι είναι θραύσματα ορυκτών και όχι χώμα (Παναγιωτόπουλος 1984)
2. Η συγκέντρωση ραδιενέργειας δεν μεταβάλλεται σημαντικά για το  $^{234}\text{Th}$  με την αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.
3. Για τη μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του  $^{137}\text{Cs}$  λόγω της αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος δεν προέκυψε σαφές συμπέρασμα, καθώς η τιμή σύγκρισης του σχετικού test βρισκόταν στην περιοχή αβεβαιότητας.
4. Όσον αφορά στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων, δεν διαπιστώθηκε σημαντική επίδραση της αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος. Μάλιστα διαπιστώθηκε ότι η καλή ομογενοποίηση του αρχικού δείγματος ήταν επαρκής για την αντιπροσωπευτική συσκευασία των δειγμάτων, ακόμα και χωρίς την αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.
5. Η αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος θα πρέπει να εφαρμόζεται στις περιπτώσεις που ενδιαφέρει η επαναληψιμότητα της μέτρησης σε μία συγκεκριμένη θέση δειγματοληψίας, ώστε να εφαρμόζονται αντικειμενικά κριτήρια για τον αποκλεισμό υλικών όπως πέτρες και χαλίκια από το δείγμα.

Από το πείραμα που έγινε για τη διερεύνηση της επίδρασης της λειοτριβίσης προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η λειοτριβίση του δείγματος μετά από αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος (άνω των 2 mm) επηρεάζει σημαντικά τη συγκέντρωση ραδιενέργειας για τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{210}\text{Pb}$ , ενώ δεν επιδρά στη συγκέντρωση ραδιενέργειας του  $^{234}\text{Th}$ . Για το  $^{228}\text{Ac}$  δεν κατέστη δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων. Παρόλα αυτά, στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε δεν συνυπολογίστηκε η χωρική κύμανση της ραδιενέργειας και η διαφοροποίηση που ενδεχομένως αυτή προκαλεί στη μέση τιμή της ραδιενέργειας των διαφορετικών ομάδων υπο-δειγμάτων. Συνεπώς, τα συμπεράσματα που σχετίζονται με τη μέση τιμή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας δεν μπορούν να θεωρηθούν απολύτως ασφαλή.
2. Η λειοτριβίση του δείγματος μετά από αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος (άνω των 2 mm) δεν μειώνει σημαντικά την αβεβαιότητα προετοιμασίας, σε σχέση με τη μέθοδο επεξεργασίας που περιλαμβάνει μόνο αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος. Δεδομένου ότι η διαδικασία της λειοτριβίσης είναι χρονοβόρα, θα μπορούσε να παραληφθεί, στη περίπτωση που εφαρμόζεται αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.
3. Η λειοτριβίση του δείγματος χωρίς πρώτα να υπάρξει αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας για τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{210}\text{Pb}$ , προκαλώντας σημαντική υποεκτίμησή της. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής θα πρέπει να εξετάζεται κατά περίπτωση, ανάλογα με τους σκοπούς της δειγματοληψίας.
4. Η λειοτριβίση του δείγματος χωρίς πρώτα να υπάρξει αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος δεν επηρεάζει σημαντικά τη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας για τα  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Από το πείραμα επίδρασης της θερμοκρασίας ξήρανσης προέκυψε το συμπέρασμα ότι η ξήρανση του δείγματος σε φούρνο, ακόμα και στους 150 °C, δεν επιδρά σημαντικά στη μετρούμενη ραδιενέργεια, για κανένα από τα υπό μελέτη ισότοπα. Συνεπώς, η χρονοβόρα διαδικασία της αεροξήρανσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να αντικατασταθεί από την πολύ πιο σύντομη διαδικασία της ξήρανσης του χώματος με θέρμανση σε φούρνο.

Επισημαίνεται ότι τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική μελέτη που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τις

ιδιότητες του εδάφους και τη συμπεριφορά των ισοτόπων στη συγκεκριμένη κάθε φορά θέση δειγματοληψίας. Άρα, οι προκύπτουσες τιμές για την αβεβαιότητα δειγματοληψίας και προετοιμασίας δεν μπορούν να μεταφερθούν αυτούσια σε άλλες θέσεις. Μπορούν όμως να αξιοποιηθούν ποιοτικά για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας δειγματοληψίας και να χρησιμεύσουν για τον εντοπισμό πιθανών πηγών προβλημάτων, καθώς και το βέλτιστο σχεδιασμό της διαδικασίας δειγματοληψίας και ανάλυσης.

Τέλος, άλλο ένα θέμα που διερευνήθηκε στο παρόν Κεφάλαιο ήταν η σημασία που έχει η αβεβαιότητα του υποστρώματος της ανιχνευτικής διάταξης στην αβεβαιότητα των τελικών αποτελεσμάτων της  $\gamma$ -φασματοσκοπικής ανάλυσης. Από το σχετικό έλεγχο που έγινε, διαπιστώθηκε ότι αυτή δεν είναι σημαντική στις περισσότερες περιπτώσεις ισοτόπων που ανιχνεύονται στο υπόστρωμα. Εντοπίστηκε ωστόσο σημαντική επίδραση στη φωτοκορυφή του  $^{234}\text{Th}$  περί τα 63.29 keV στον ανιχνευτή LEGe, λόγω των υψηλών επιπέδων του ραδιοϊσοτόπου στη θωράκιση. Η αβεβαιότητα αυτή καλό θα είναι να λαμβάνεται υπ' όψιν στη συγκεκριμένη ανάλυση, ειδικά κατά την περίπτωση ανάλυσης δειγμάτων χαμηλής ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$ . Φυσικά, το ιδανικό θα ήταν η θωράκιση του ανιχνευτή να αντικατασταθεί από άλλη, κατασκευασμένη από υλικό υψηλής καθαρότητας.



## Πίνακες κεφαλαίου

Πίνακας 3-1: Φάσμα υποστρώματος ανιχνευτή HPGe (BG2260)

<i>Φωτοκορυφή</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Επιφάνεια φωτοκορυφής</i>	<i>Σχετική αβεβαιότητα (1.65σ, %)</i>	<i>Ρυθμός καταμέτρησης (cps)</i>
Ac-228B	911.07	907	22.9	$0.181 \cdot 10^{-2}$
Ac-228H	968.90	455	45.4	$0.909 \cdot 10^{-3}$
Bi-214A	609.32	1410	1.4	$0.282 \cdot 10^{-2}$
Bi-214B	1120.28	587	30.1	$0.117 \cdot 10^{-2}$
Bi-214C	1764.51	926	13.9	$0.185 \cdot 10^{-2}$
Cs-137	661.62	571	40.9	$0.114 \cdot 10^{-2}$
K-40	1460.75	3166	5.3	$0.633 \cdot 10^{-2}$
Pb-212B	238.63	3166	17.1	$0.633 \cdot 10^{-2}$
Pb-214A	295.22	666	67.6	$0.133 \cdot 10^{-2}$
Pb-214B	351.99	1582	24.6	$0.316 \cdot 10^{-2}$
Tl-208A	583.14	1009	26.1	$0.202 \cdot 10^{-2}$

**Πίνακας 3-2: Αποτελέσματα σύγκρισης βάση του u-score - Σύγκριση ραδιενέργειας υποστρώματος τριών φασμάτων**

<i>Φωτοκορυφή</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόλυτη τιμή μεταβλητής σύγκρισης u</i>	
		<i>BG2259 - BG2260</i>	<i>BG2250 - BG2260</i>
Ac-228B	911.07	0.090	0.682
Ac-228H	968.90	0.001	0.355
Bi-214A	609.32	3.642	0.255
Bi-214B	1120.28	0.988	0.476
Bi-214C	1764.51	0.163	0.349
Cs-137	661.62	0.099	0.370
K-40	1460.75	0.933	0.094
Pb-212B	238.63	0.616	1.026
Pb-214A	295.22	1.527	0.507
Pb-214B	351.99	4.926	2.451
Tl-208A	583.14	0.714	0.341

**Πίνακας 3-3: Κατάλογος υπο-δειγμάτων πειραματικής εκτίμησης αβεβαιότητας προετοιμασίας**

Δείγμα	Κωδικός	Υγρασία		Μάζα (gr)			Υπόλοιπο
		(%)	Συνολική	Ξένα Υλικά	Συσκευασμένο δείγμα	Νωπό Ξηρό	
1-1	MS489	3.0	504.30	49.00	225.80	219.03	229.50
	MS490	3.0	624.00	62.00	255.00	247.35	307.00
	MS491	3.5	545.20	60.80	238.40	230.06	246.00
	MS492	3.0	591.10	84.90	243.30	236.00	262.90
1-2	MS493	3.0	652.00	107.20	254.40	246.77	290.40
	MS494	3.0	739.30	98.80	258.50	250.75	382.00
	MS495	3.5	621.80	61.90	252.70	243.86	307.20
	MS496	3.0	705.70	54.70	245.20	237.84	405.80

**Πίνακας 3-4: Κατάλογος φασμάτων πειραματικής εκτίμησης αβεβαιότητας προετοιμασίας**

<i>Κωδικός</i>	<i>Θέση SPUNAL</i>	<i>Ανιχνευτής</i>	<i>Γεωμετρία</i>	<i>Χρόνος συλλογής (sec)</i>
MS495A	11/2.271	2	2	86400
MS495B	11/2.272	2	2	172800
MS496A	11/2.273	2	2	172800
MS494A	11/2.274	2	2	172800
MS493A	11/2.275	2	2	172800
MS489A	11/2.276	2	2	172800
MS491A	11/2.277	2	2	172800
MS490A	11/2.278	2	2	172800
MS492A	11/2.279	2	2	172800
MS492C	11/2.283	3	2	345600
MS491B	11/2.286	3	2	345600
MS490B	14/6.259	3	2	345600
MS489B	11/2.287	3	2	345600
MS493B	11/2.288	3	2	345600
MS494B	11/2.290	3	2	345600
MS495C	11/2.292	3	2	345600
MS496B	11/2.294	3	2	345600

**Πίνακας 3-5: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$  (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

$^{137}\text{Cs}$				
<i>Δείγμα</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R</i> (Bq/kg)	<i>s<sub>φ</sub></i> (Bq/kg)	<i>s<sub>R</sub></i> (Bq/kg)
1-1	MS489A	13.79	0.36	0.40
	MS490A	15.77	0.34	0.38
	MS491A	16.14	0.36	0.40
	MS492A	15.29	0.35	0.39
1-2	MS493A	12.79	0.33	0.36
	MS494A	11.26	0.29	0.32
	MS495B	13.25	0.34	0.37
	MS496A	11.55	0.34	0.37

**Πίνακας 3-6: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$  (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

$^{40}\text{K}$				
<i>Δείγμα</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R</i> (Bq/kg)	<i>s<sub>φ</sub></i> (Bq/kg)	<i>s<sub>R</sub></i> (Bq/kg)
1-1	MS489A	283.58	3.95	4.82
	MS490A	290.72	3.88	4.61
	MS491A	313.88	4.00	4.76
	MS492A	279.86	3.73	4.51
1-2	MS493A	286.84	3.83	4.56
	MS494A	283.39	3.78	4.50
	MS495B	291.40	3.71	4.44
	MS496A	291.44	3.89	4.65

**Πίνακας 3-7: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ac}$  (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

$^{228}\text{Ac}$				
<i>Δείγμα</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R</i> (Bq/kg)	<i>s<sub>φ</sub></i> (Bq/kg)	<i>s<sub>R</sub></i> (Bq/kg)
1-1	MS489A	23.02	1.02	1.30
	MS490A	21.87	0.92	1.16
	MS491A	23.82	1.00	1.25
	MS492A	21.96	0.93	1.19
1-2	MS493A	24.11	0.96	1.20
	MS494A	22.98	0.92	1.15
	MS495B	24.53	0.97	1.20
	MS496A	24.54	0.97	1.21

**Πίνακας 3-8: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$  (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

$^{210}\text{Pb}$				
<i>Δείγμα</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R</i> (Bq/kg)	<i>s<sub>φ</sub></i> (Bq/kg)	<i>s<sub>R</sub></i> (Bq/kg)
1-1	MS489B	120.35	2.04	2.56
	MS490B	101.46	1.91	2.43
	MS491B	115.16	2.02	2.54
	MS492C	107.84	1.96	2.48
1-2	MS493B	104.80	1.97	2.48
	MS494B	94.97	1.90	2.43
	MS495B	108.43	1.97	2.48
	MS496B	89.78	1.85	2.41

**Πίνακας 3-9: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$  (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

$^{234}\text{Th}$				
<i>Δείγμα</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R</i> (Bq/kg)	<i>S<sub>φ</sub></i> (Bq/kg)	<i>S<sub>R</sub></i> (Bq/kg)
1-1	MS489B	14.68	0.45	2.36
	MS490B	18.36	0.56	2.29
	MS491B	19.10	0.57	2.35
	MS492C	19.54	0.57	2.30
1-2	MS493B	17.53	0.54	2.31
	MS494B	19.71	0.57	2.24
	MS495B	18.96	0.58	2.33
	MS496B	16.97	0.51	2.30

**Πίνακας 3-10: Σχετική επί τοις εκατό απόκλιση αβεβαιότητας λόγω υποστρώματος**

<i>Φάσμα</i>	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
MS489B	9.70	16.13	19.27	20.27	80.78
MS490B	9.67	16.07	19.96	21.43	75.70
MS491B	10.09	16.48	19.87	20.30	75.90
MS492C	9.37	16.34	19.34	20.96	75.25
MS493B	10.04	18.05	21.67	20.72	76.50
MS494B	8.95	16.11	20.50	21.91	74.42
MS495B	8.61	15.87	20.78	20.63	75.32
MS496B	9.02	17.29	21.58	23.34	77.63

**Πίνακας 3-11: Αποτελέσματα U test - Σύγκριση ραδιενέργειας <sup>137</sup>Cs (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

Απόλυτη τιμή μεταβλητής σύγκρισης U για το <sup>137</sup> Cs									
	MS489	MS490	MS491	MS492		MS493	MS494	MS495	MS496
MS489	-	3.589	4.154	2.685	MS493	-	3.176	0.891	2.402
MS490	-	-	0.671	0.882	MS494	-	-	4.068	0.593
MS491	-	-	-	1.522	MS495	-	-	-	3.249
MS492	-	-	-	-	MS496	-	-	-	-

**Πίνακας 3-12: Αποτελέσματα U test-Σύγκριση ραδιενέργειας <sup>40</sup>K (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

Απόλυτη τιμή μεταβλητής σύγκρισης U για το <sup>40</sup> K									
	MS489	MS490	MS491	MS492		MS493	MS494	MS495	MS496
MS489	-	1.071	4.473	0.564	MS493	-	0.539	0.716	0.706
MS490	-	-	3.495	1.684	MS494	-	-	1.267	1.244
MS491	-	-	-	5.188	MS495	-	-	-	0.006
MS492	-	-	-	-	MS496	-	-	-	-

**Πίνακας 3-13: Αποτελέσματα U test - Σύγκριση ραδιενέργειας <sup>228</sup>Ac (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

Απόλυτη τιμή μεταβλητής σύγκρισης U για το <sup>228</sup> Ac									
	MS489	MS490	MS491	MS492		MS493	MS494	MS495	MS496
MS489	-	0.660	0.444	0.601	MS493	-	0.680	0.247	0.252
MS490	-	-	1.143	0.054	MS494	-	-	0.933	0.935
MS491	-	-	-	1.078	MS495	-	-	-	0.006
MS492	-	-	-	-	MS496	-	-	-	-

**Πίνακας 3-14: Αποτελέσματα U test - Σύγκριση ραδιενέργειας <sup>210</sup>Pb (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

Απόλυτη τιμή μεταβλητής σύγκρισης U για το <sup>210</sup> Pb									
	MS489	MS490	MS491	MS492		MS493	MS494	MS495	MS496
MS489	-	5.352	1.439	3.510	MS493	-	2.831	1.035	4.343
MS490	-	-	3.897	1.838	MS494	-	-	3.877	1.113
MS491	-	-	-	2.062	MS495	-	-	-	5.393
MS492	-	-	-	-	MS496	-	-	-	-

**Πίνακας 3-15: Αποτελέσματα U test - Σύγκριση ραδιενέργειας <sup>234</sup>Th (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

Απόλυτη τιμή μεταβλητής σύγκρισης U για το <sup>234</sup> Th									
	MS489	MS490	MS491	MS492		MS493	MS494	MS495	MS496
MS489	-	1.119	1.327	1.475	MS493	-	0.677	0.436	0.172
MS490	-	-	0.226	0.364	MS494	-	-	0.232	0.853
MS491	-	-	-	0.134	MS495	-	-	-	0.608
MS492	-	-	-	-	MS496	-	-	-	-



**Πίνακας 3-16: Ανάλυση ANOVA για <sup>137</sup>Cs (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Δειγματοληψία	18.42	1	18.422	18.572
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	5.95	6	0.992	
Ολικό	24.37	7		

**Πίνακας 3-17: Ανάλυση ANOVA για <sup>40</sup>K (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Δειγματοληψία	28.01	1	28.013	0.226
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	744.35	6	124.059	
Ολικό	772.37	7		

**Πίνακας 3-18: Ανάλυση ANOVA για <sup>228</sup>Ac (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Δειγματοληψία	3.77	1	3.768	5.372
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	4.21	6	0.701	
Ολικό	7.98	7		

**Πίνακας 3-19: Ανάλυση ANOVA για  $^{210}\text{Pb}$  (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (<math>Bq^2/kg^2</math>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (<math>Bq^2/kg^2</math>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Δειγματοληψία	274.13	1	274.131	3.839
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	428.40	6	71.399	
Ολικό	702.53	7		

**Πίνακας 3-20: Ανάλυση ANOVA για  $^{234}\text{Th}$  (πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (<math>Bq^2/kg^2</math>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (<math>Bq^2/kg^2</math>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Δειγματοληψία	0.28	1	0.278	0.085
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	19.49	6	3.249	
Ολικό	19.77	7		

**Πίνακας 3-21: Αποτελέσματα τεστ  $\chi^2$  (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$MS_E (Bq^2/kg^2)$	0.99	124.06	0.70	71.40	3.25
$s_R^2 (Bq^2/kg^2)$	0.14	21.24	1.46	6.14	5.33
$x_0^2$	42.59	35.05	2.89	69.76	3.65
$x_{0.95,6}^2$	12.59	12.59	12.59	12.59	12.59

**Πίνακας 3-22: Αβεβαιότητα προετοιμασίας (Πειραματική εκτίμηση αβεβαιότητας προετοιμασίας)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{210}\text{Pb}$
Απόλυτη αβεβαιότητα (Bq/kg)	0.92	10.14	8.08
Σχετική αβεβαιότητα (%)	7.0	1.1	2.7

**Πίνακας 3-23: Μάζα κλασμάτων άνω και κάτω από 2 mm (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

A/A	Μάζα (gr)	
	Κλάσμα < 2 mm	Κλάσμα > 2 mm (αφαιρούμενη ποσότητα)
1	547.46	179.59
2	415.98	242.13
3	457.89	190.09
4	468.92	220.77

**Πίνακας 3-24: Κατάλογος υπο-δειγμάτων (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

Κωδικός Υπο-δείγματος	Υγρασία (%)	Νωπή μάζα (gr)	Ξηρή μάζα (gr)
MS510	2.4	298.7	291.53
MS511	2.4	290.9	283.92
MS512	2.4	309.8	302.36
MS513	2.4	307.0	299.63
MS514	2.3	336.8	329.05
MS515	2.3	339.8	331.98
MS516	2.3	347.5	336.82
MS517	2.3	344.9	336.97

**Πίνακας 3-25: Κατάλογος φασμάτων (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

<i>Κωδικός</i>	<i>Θέση SPUNAL</i>	<i>Ανιχνευτής</i>	<i>Γεωμετρία</i>	<i>Χρόνος συλλογής (sec)</i>
MS510A	11/3.73	2	2	172800
MS511A	14/6.286	2	2	172800
MS512A	11/3.74	2	2	172800
MS513A	11/3.75	2	2	172800
MS514A	11/3.77	2	2	172800
MS515A	11/3.79	2	2	172800
MS516A	16/0.2	2	2	172800
MS517A	16/0.5	2	2	172800
MS510B	16/0.6	3	2	345600
MS511B	16/0.11	3	2	345600
MS512B	16/0.13	3	2	345600
MS513B	11/3.81	3	2	345600
MS514B	11/3.82	3	2	345600
MS515B	11/3.85	3	2	345600
MS516B	11/3.86	3	2	345600
MS517B	11/3.87	3	2	345600

**Πίνακας 3-26: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$  (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

$^{137}\text{Cs}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Χωρίς επεξεργασία	MS510A	10.24	0.32
	MS511A	9.26	0.31
	MS512A	10.06	0.30
	MS513A	10.36	0.31
Αφαίρεση χονδρ. κλάσματος	MS514A	11.05	0.30
	MS515A	10.72	0.30
	MS516A	11.03	0.31
	MS517A	11.26	0.32

**Πίνακας 3-27: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$  (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

$^{40}\text{K}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Χωρίς επεξεργασία	MS510A	292.39	4.11
	MS511A	284.38	4.04
	MS512A	284.59	4.00
	MS513A	287.46	4.04
Αφαίρεση χονδρ. κλάσματος	MS514A	299.05	3.73
	MS515A	311.21	3.85
	MS516A	307.10	3.80
	MS517A	305.68	3.78

**Πίνακας 3-28: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ac}$  (επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

$^{228}\text{Ac}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Χωρίς επεξεργασία	MS510A	22.63	1.05
	MS511A	22.53	1.11
	MS512A	22.89	0.99
	MS513A	22.94	1.01
Αφαίρεση χονδρ. κλάσματος	MS514A	24.04	0.95
	MS515A	24.01	0.95
	MS516A	25.40	0.96
	MS517A	24.58	0.92

**Πίνακας 3-29: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$  (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

$^{210}\text{Pb}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Χωρίς επεξεργασία	MS510B	73.79	2.30
	MS511B	63.81	2.30
	MS512B	68.45	2.26
	MS513B	71.58	2.29
Αφαίρεση χονδρ. κλάσματος	MS514B	79.63	2.29
	MS515B	73.89	2.32
	MS516B	75.18	2.34
	MS517B	79.14	2.28

**Πίνακας 3-30: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$  (επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

$^{234}\text{Th}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Χωρίς επεξεργασία	MS510B	19.45	2.17
	MS511B	18.67	2.17
	MS512B	18.84	2.15
	MS513B	19.01	2.17
Αφαίρεση χονδρ. κλάσματος	MS514B	18.89	2.15
	MS515B	15.48	2.17
	MS516B	18.74	2.17
	MS517B	18.84	2.13

**Πίνακας 3-31: Ανάλυση ANOVA για  $^{137}\text{Cs}$  (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Επεξεργασία	2.14	1	2.142	14.520
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	0.89	6	0.148	
Ολικό	3.03	7		

**Πίνακας 3-32: Ανάλυση ANOVA για <sup>40</sup>K (επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Επεξεργασία	688.58	1	688.576	34.925
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	118.30	6	19.716	
Ολικό	806.87	7		

**Πίνακας 3-33: Ανάλυση ANOVA για <sup>228</sup>Ac (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Επεξεργασία	6.20	1	6.195	26.812
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	1.39	6	0.231	
Ολικό	7.58	7		

**Πίνακας 3-34: Ανάλυση ANOVA για <sup>210</sup>Pb (επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Επεξεργασία	114.08	1	114.081	8.487
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	80.65	6	13.442	
Ολικό	114.08	7		



**Πίνακας 3-35: Ανάλυση ANOVA για  $^{234}\text{Th}$  (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (<math>Bq^2/kg^2</math>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (<math>Bq^2/kg^2</math>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Επεξεργασία	2.02	1	2.020	1.388
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	8.73	6	1.455	
Ολικό	10.75	7		

**Πίνακας 3-36: Αποτελέσματα τεστ  $\chi^2$  δειγμάτων MS510-MS513 (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$s^2 (Bq^2/kg^2)$	0.25	13.92	0.04	18.72	0.11
$s_R^2 (Bq^2/kg^2)$	0.10	16.38	1.08	5.23	4.68
$\chi_o^2$	7.72	2.55	0.11	10.73	0.07
$\chi^2_{0.95,3}$	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81

**Πίνακας 3-37: Αποτελέσματα τεστ  $\chi^2$  δειγμάτων MS514-MS517 (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$s^2 (Bq^2/kg^2)$	0.05	25.51	0.42	8.16	2.80
$s_R^2 (Bq^2/kg^2)$	0.09	14.36	0.89	5.32	4.65
$\chi_o^2$	1.59	5.33	1.43	4.60	1.80
$\chi^2_{0.95,3}$	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81

**Πίνακας 3-38: Αποτελέσματα F τεστ (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$F_{0,95}$	15.44	15.44	15.44	15.44	15.44
$F_{0,99}$	47.47	47.47	47.47	47.47	47.47
$F_0$	4.96	0.55	0.09	2.30	0.04

**Πίνακας 3-39: Αποτελέσματα t test (Επίδραση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$\nu$	4.16	5.52	3.56	5.20	3.38
$t_{0,95}$	2.74	2.51	2.95	2.55	3.03
$t_{0,99}$	4.51	3.86	5.15	3.97	4.27
$t_0$	3.81	5.91	5.18	5.91	0.74

**Πίνακας 3-40: Επίδραση χρόνου στη διαδικασία λειοτρίβισης (Δοκιμή λειοτρίβισης)**

<i>Χρόνος λειοτρίβισης (min)</i>	10	20	30
<i>Λόγος κλάσματος άνω των 125 μm προς την αρχική μάζα</i>	0.671	0.085	0.058

**Πίνακας 3-41: Κατάλογος υπο-δειγμάτων (Επίδραση λειοτριβίσης)**

<i>Κωδικός Υπο-δείγματος</i>	<i>Αρχικό δείγμα</i>	<i>Υγρασία (%)</i>	<i>Νωπή μάζα (gr)</i>	<i>Ξηρή μάζα (gr)</i>
MS526	5-1	3.0	312.20	302.83
MS527		3.0	305.50	296.34
MS528		2.7	305.30	298.27
MS529		2.2	310.60	303.77
MS530	5-2	2.0	347.01	340.07
MS531		2.5	334.79	329.14
MS532		2.0	346.24	339.32
MS533		2.0	344.25	337.36

**Πίνακας 3-42: Κατάλογος φασμάτων (Επίδραση λειοτριβίσης)**

<i>Κωδικός</i>	<i>Θέση SPUNAL</i>	<i>Ανιχνευτής</i>	<i>Γεωμετρία</i>	<i>Χρόνος συλλογής (sec)</i>
MS526A	11/3.99	2	2	172800
MS527A	11.3/94	2	2	172800
MS528A	11/3.96	2	2	172800
MS529A	11/3.97	2	2	172800
MS530A	11/3.100	2	2	172800
MS531A	11/3.103	2	2	172800
MS532A	14/7.18	2	2	172800
MS533A	11/3.106	2	2	172800
MS526B	11/3.104	3	2	345600
MS527B	11/3.101	3	2	345600
MS528B	14/7.21	3	2	345600
MS529B	11/3.108	3	2	345600
MS530B	11/3.113	3	2	345600
MS531B	11.3.116	3	2	345600
MS532B	11/3.119	3	2	345600
MS533B	11/3.121	3	2	345600

Πίνακας 3-43: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$  (Επίδραση λειοτριβίσης)

$^{137}\text{Cs}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Λειοτριβίση, αφαίρεση χονδρ. κλάσματος	MS526A	11.18	0.334
	MS527A	11.93	0.35
	MS528A	12.18	0.34
	MS529A	11.62	0.34
Λειοτριβίση	MS530A	6.43	0.28
	MS531A	6.54	0.29
	MS532A	6.38	0.29
	MS533A	6.22	0.28

Πίνακας 3-44: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$  (Επίδραση λειοτριβίσης)

$^{40}\text{K}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Λειοτριβίση, αφαίρεση χονδρ. κλάσματος	MS526A	308.89	4.08
	MS527A	319.39	4.21
	MS528A	318.09	3.99
	MS529A	312.84	4.12
Λειοτριβίση	MS530A	237.88	3.38
	MS531A	240.05	3.42
	MS532A	259.58	3.46
	MS533A	254.77	3.58

Πίνακας 3-45: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ac}$  (Επίδραση λειοτριβίσης)

$^{228}\text{Ac}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Λειοτριβίση, αφαίρεση χονδρ. κλάσματος	MS526A	23.56	1.03
	MS527A	25.87	1.03
	MS528A	24.91	1.02
	MS529A	23.99	1.03
Λειοτριβίση	MS530A	19.00	0.87
	MS531A	18.50	0.91
	MS532A	22.05	0.88
	MS533A	19.95	0.90

Πίνακας 3-46: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$  (Επίδραση λειοτριβίσης)

$^{210}\text{Pb}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Λειοτριβίση, αφαίρεση χονδρ. κλάσματος	MS526B	94.40	2.37
	MS527B	93.08	2.41
	MS528B	98.63	2.39
	MS529B	90.44	2.36
Λειοτριβίση	MS530B	60.91	2.14
	MS531B	55.78	2.11
	MS532B	57.60	2.14
	MS533B	57.24	2.14



Πίνακας 3-47: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$  (Επίδραση λειοτριβίσης)

$^{234}\text{Th}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Λειοτριβίση, αφαίρεση χονδρ. κλάσματος	MS526B	20.43	2.20
	MS527B	22.93	2.21
	MS528B	18.14	2.21
	MS529B	21.79	2.19
Λειοτριβίση	MS530B	15.54	2.06
	MS531B	16.60	2.02
	MS532B	17.54	2.05
	MS533B	16.90	2.01

Πίνακας 3-48: Ανάλυση ANOVA για  $^{137}\text{Cs}$  (Επίδραση λειοτριβίσης)

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Επεξεργασία	56.71	1	56.71	546.04
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	0.62	6	0.10	
Ολικό	57.33	7		

**Πίνακας 3-49: Ανάλυση ANOVA για <sup>40</sup>K (Επίδραση λειοτριβίσης)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Επεξεργασία	8906.45	1	8906.45	128.40
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	416.19	6	69.37	
Ολικό	9322.64	7		

**Πίνακας 3-50: Ανάλυση ANOVA για <sup>228</sup>Ac (Επίδραση λειοτριβίσης)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Επεξεργασία	44.40	1	44.40	25.14
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	10.60	6	1.77	
Ολικό	55.00	7		

**Πίνακας 3-51: Ανάλυση ANOVA για <sup>210</sup>Pb (Επίδραση λειοτριβίσης)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (Bq<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Επεξεργασία	2658.30	1	2658.30	365.76
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	44.71	6	7.451	
Ολικό	2703.01	7		

**Πίνακας 3-52: Ανάλυση ANOVA για  $^{234}\text{Th}$  (Επίδραση λειοτριβίσης)**

<i>Πηγές Διακύμανσης</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων (<math>\text{Bq}^2/\text{kg}^2</math>)</i>	<i>Βαθμοί Ελευθερίας</i>	<i>Μέση τιμή τετραγώνων (<math>\text{Bq}^2/\text{kg}^2</math>)</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Επεξεργασία	34.90	1	34.90	14.13
Μη ελεγχόμενη διακύμανση	14.82	6	2.47	
Ολικό	49.72	7		

**Πίνακας 3-53: Αποτελέσματα τεστ  $\chi^2$  MS526-MS529 (Επίδραση λειοτριβίσης)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$s^2(\text{Bq}^2/\text{kg}^2)$	0.19	23.55	1.07	11.68	4.24
$s_R^2(\text{Bq}^2/\text{kg}^2)$	0.12	16.82	1.05	5.37	4.69
$\chi_o^2$	4.80	4.20	3.05	6.52	2.72
$\chi^2_{0.95,3}$	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81

**Πίνακας 3-54: Αποτελέσματα τεστ  $\chi^2$  MS530-MS533 (Επίδραση λειοτριβίσης)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$s^2(\text{Bq}^2/\text{kg}^2)$	0.02	115.18	2.46	3.22	0.70
$s_R^2(\text{Bq}^2/\text{kg}^2)$	0.08	11.98	0.79	4.69	4.22
$\chi_o^2$	0.82	28.83	9.31	2.06	0.50
$\chi^2_{0.95,3}$	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81

**Πίνακας 3-55: Αβεβαιότητα προετοιμασίας (Επίδραση λειοτριβίσης)**

	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$
<i>Απόλυτη αβεβαιότητα (<math>\text{Bq}/\text{kg}</math>)</i>	10.16	1.29
<i>Σχετική αβεβαιότητα (%)</i>	4.1	6.5

**Πίνακας 3-56: Αποτελέσματα t test (σύγκριση δειγμάτων χωρίς επεξεργασία και δειγμάτων με αφαίρεση χονδρόκοκκου κλάσματος και λειοτρίβιση)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$\nu$	5.89	5.63	3.22	5.69	4.87
$t_{0.95}$	2.46	2.49	3.09	2.49	2.60
$t_{0.99}$	3.74	3.83	5.57	4.99	4.11
$t_0$	5.32	9.62	3.51	8.97	1.67

**Πίνακας 3-57: Αποτελέσματα t test (σύγκριση δειγμάτων χωρίς επεξεργασία και δειγμάτων με λειοτρίβιση, χωρίς αφαίρεση χονδρόκοκκου κλάσματος)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$\nu$	3.43	3.79	3.07	4.41	3.34
$t_{0.95}$	3.01	2.86	3.15	2.08	2.28
$t_{0.99}$	5.31	4.86	5.75	3.59	4.27
$t_0$	13.98	6.60	2.87	4.76	0.45

**Πίνακας 3-58: Αποτελέσματα t test (σύγκριση μέσης τιμής δειγμάτων με αφαίρεση χονδρόκοκκου κλάσματος και με αφαίρεση χονδρόκοκκου κλάσματος και λειοτρίβιση)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$\nu$	4.49	5.99	5.07	5.82	4.05
$t_{0.95}$	2.68	2.45	2.56	2.47	2.77
$t_{0.99}$	4.32	3.71	4.01	3.77	4.58
$t_0$	2.94	2.58	0.12	7.71	1.83

**Πίνακας 3-59: Αποτελέσματα F test (σύγκριση τυπικής απόκλισης δειγμάτων με αφαίρεση χονδρόκοκκου κλάσματος και με αφαίρεση χονδρόκοκκου κλάσματος και λειοτριβίση)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
$F_{0.95}$	15.44	15.44	15.44	15.44	15.44
$F_{0.99}$	47.47	47.47	47.47	47.47	47.47
$F_0$	0.27	1.08	0.40	0.70	0.18

**Πίνακας 3-60: Κατάλογος υπο-δειγμάτων (Επίδραση θερμοκρασίας ξήρανσης)**

Κωδικός Υπο-δείγματος	Θερμοκρασία Θέρμανσης (°C)	Υγρασία (%)	Μάζα (gr)			
			Αρχική	> 2 mm	Συσκευασμένο δείγμα	
					Νωπή	Ξηρή
MS518	50	1.1	706.49	256.13	354.73	350.83
MS519	100	0.7	683.50	265.30	332.83	330.50
MS520	150	1.0	517.30	213.38	303.60	300.56
MS521	23	1.5	472.14	199.04	273.10	269.00
	(θερμ. περιβάλ.)					

**Πίνακας 3-61: Κατάλογος φασμάτων (Επίδραση θερμοκρασίας ξήρανσης)**

<i>Κωδικός</i>	<i>Θέση SPUNAL</i>	<i>Ανιχνευτής</i>	<i>Γεωμετρία</i>	<i>Χρόνος συλλογής (sec)</i>
MS518A	16/0.8	2	2	172800
MS519A	16/0.10	2	2	172800
MS520A	16/0.12	2	2	172800
MS521A	11/3.80	2	2	172800
MS518B	11/3.89	3	2	345600
MS519B	11/3.92	3	2	345600
MS520B	11/3.95	3	2	345600
MS521B	11/3.98	3	2	345600

**Πίνακας 3-62: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$  (Επίδραση θερμοκρασίας ξήρανσης)**

$^{137}\text{Cs}$			
<i>Μέθοδος επεξεργασίας</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>R (Bq/kg)</i>	<i>s<sub>R</sub> (Bq/kg)</i>
Θέρμανση στους 50°C	MS518A	11.89	0.31
Θέρμανση στους 100°C	MS519A	13.02	0.32
Θέρμανση στους 150°C	MS520A	13.10	0.34
Θέρμανση σε θερμ. περιβάλ.	MS521A	13.82	0.38

**Πίνακας 3-63: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$  (Επίδραση θερμοκρασίας ξήρανσης)**

$^{40}\text{K}$			
Μέθοδος επεξεργασίας	Φάσμα	$R(\text{Bq/kg})$	$s_R(\text{Bq/kg})$
Θέρμανση στους 50°C	MS518A	278.53	3.48
Θέρμανση στους 100°C	MS519A	284.42	3.76
Θέρμανση στους 150°C	MS520A	297.90	3.96
Θέρμανση σε θερμ. περιβάλ.	MS521A	299.46	4.26

**Πίνακας 3-64: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ac}$  (Επίδραση θερμοκρασίας ξήρανσης)**

$^{228}\text{Ac}$			
Μέθοδος επεξεργασίας	Φάσμα	$R(\text{Bq/kg})$	$s_R(\text{Bq/kg})$
Θέρμανση στους 50°C	MS518A	24.76	0.90
Θέρμανση στους 100°C	MS519A	22.94	0.95
Θέρμανση στους 150°C	MS520A	24.72	1.04
Θέρμανση σε θερμ. περιβάλ.	MS521A	26.10	1.13

**Πίνακας 3-65: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$**

$^{210}\text{Pb}$			
Μέθοδος επεξεργασίας	Φάσμα	$R(\text{Bq/kg})$	$s_R(\text{Bq/kg})$
Θέρμανση στους 50°C	MS518B	71.63	2.25
Θέρμανση στους 100°C	MS519B	80.91	2.26
Θέρμανση στους 150°C	MS520B	75.75	2.27
Θέρμανση σε θερμ. περιβάλ.	MS521B	75.08	2.34

**Πίνακας 3-66: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$**

$^{234}\text{Th}$			
Μέθοδος επεξεργασίας	Φάσμα	$R$ (Bq/kg)	$s_R$ (Bq/kg)
Θέρμανση στους 50°C	MS518B	19.15	2.10
Θέρμανση στους 100°C	MS519B	22.01	2.12
Θέρμανση στους 150°C	MS520B	18.04	2.20
Θέρμανση σε θερμ. περιβάλ.	MS521B	22.93	2.25

**Πίνακας 3-67: Συντελεστής συσχέτισης (Επίδραση θερμοκρασίας ξήρανσης)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$
$r$	-0,044	0,143	-0,528

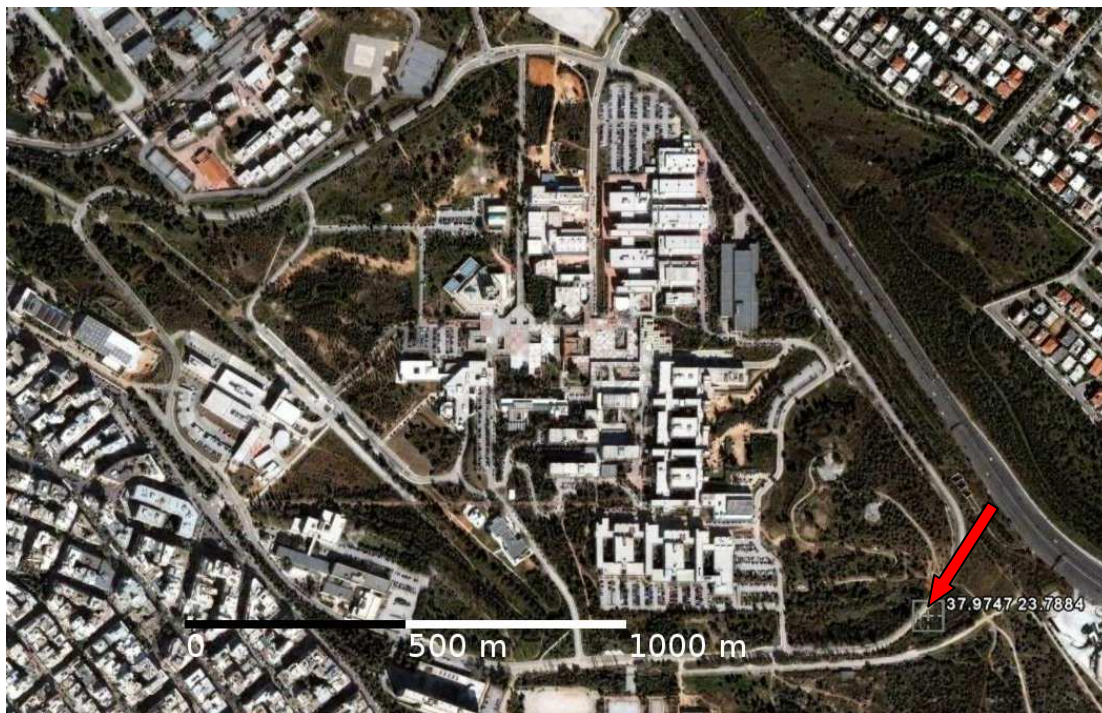
**Πίνακας 3-68: Αποτελέσματα t-test (Επίδραση θερμοκρασίας ξήρανσης)**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$
$t_{0.95}$	4.303	4.303	4.303
$t_{0.99}$	9.925	9.925	9.925
$t_0$	-0,063	0,204	-0,879

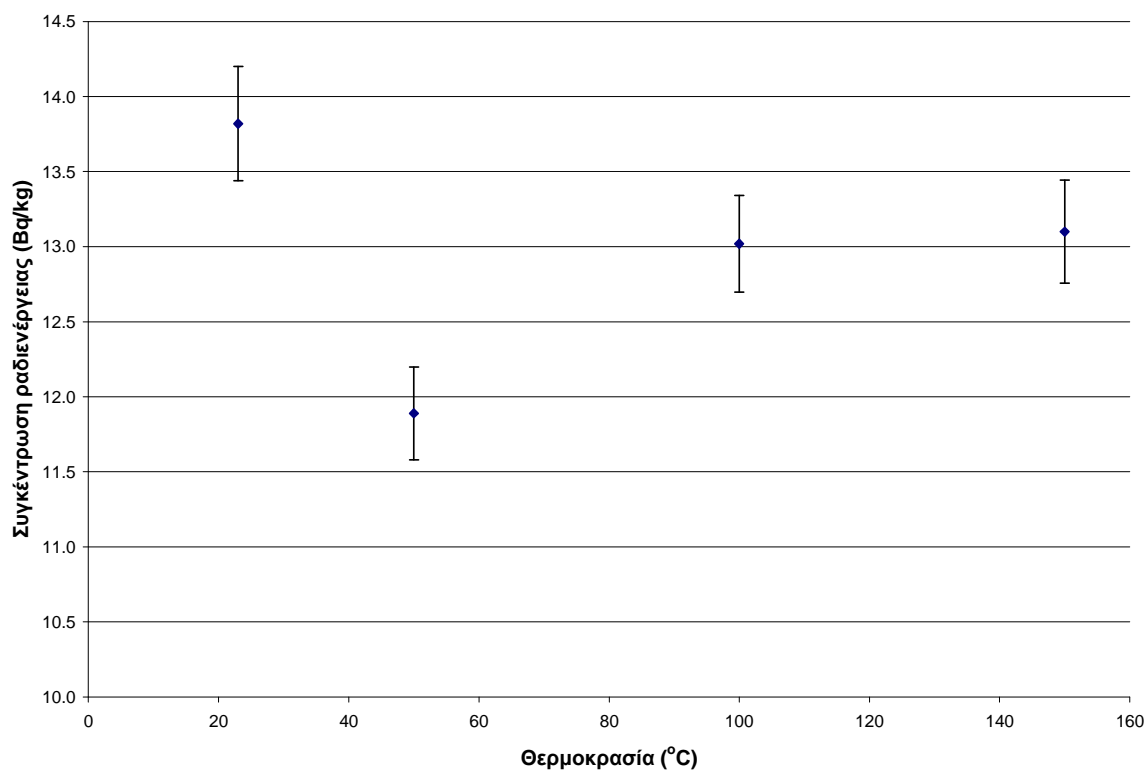


## Σχήματα κεφαλαίου

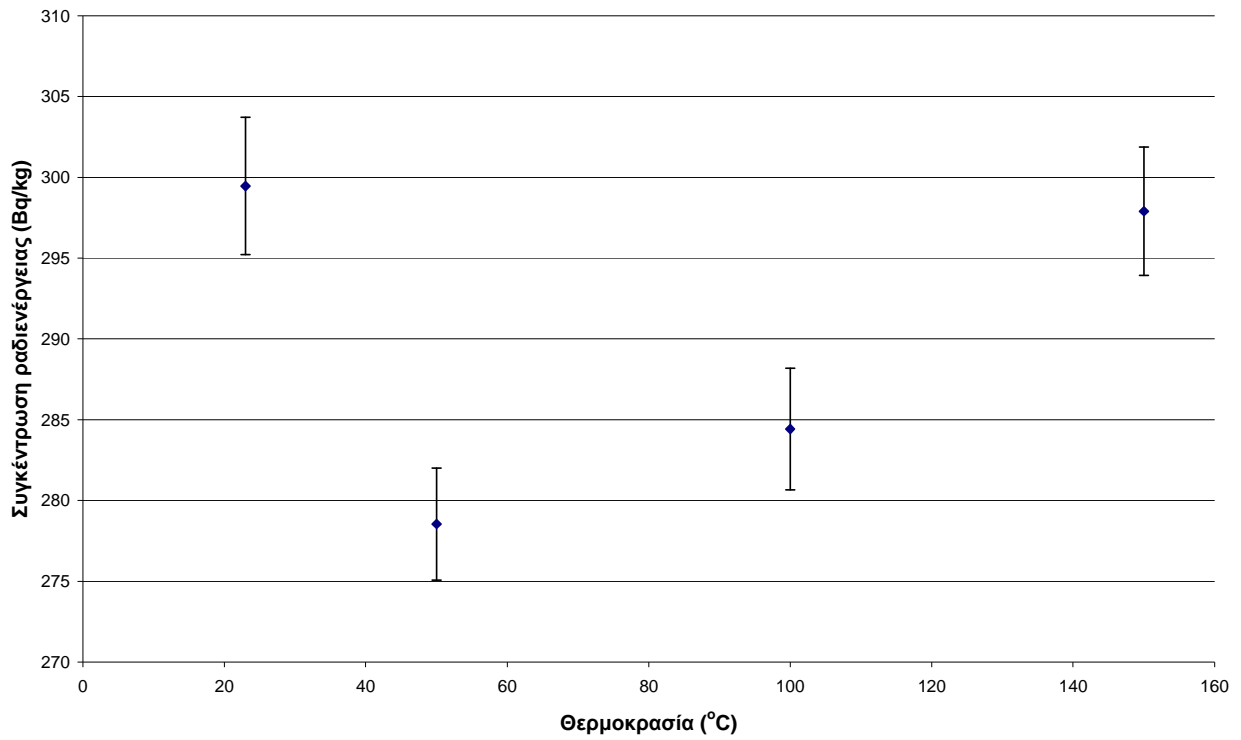
Σχήμα 3-1: Θέση δειγματοληψίας



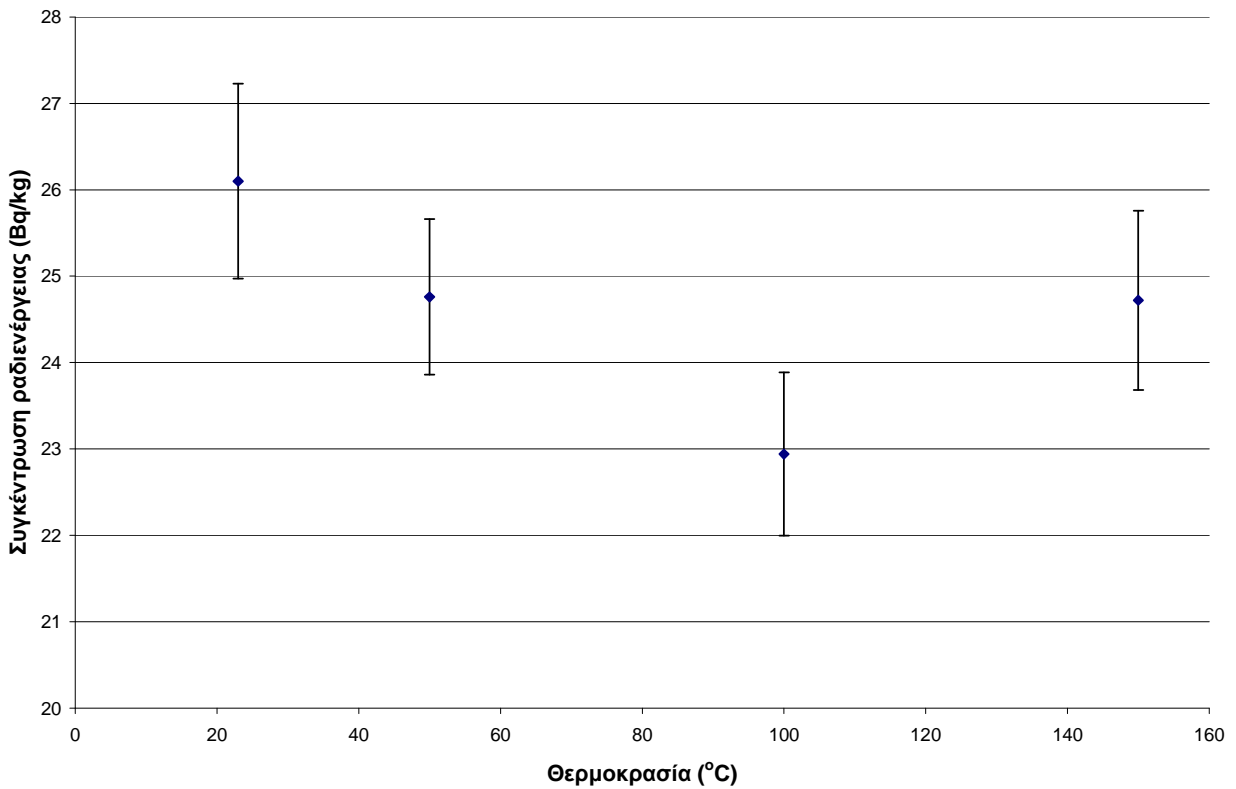
Σχήμα 3-2: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) - Θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )



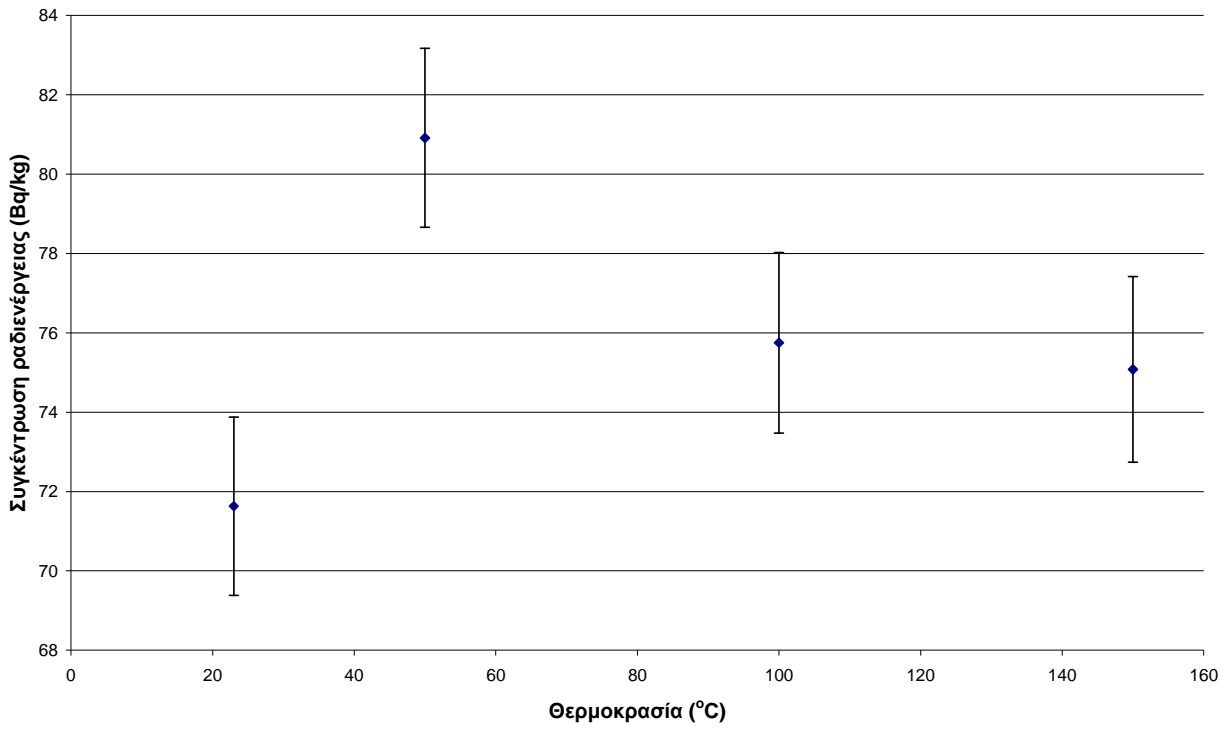
Σχήμα 3-3: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$  (Bq/kg) - Θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )



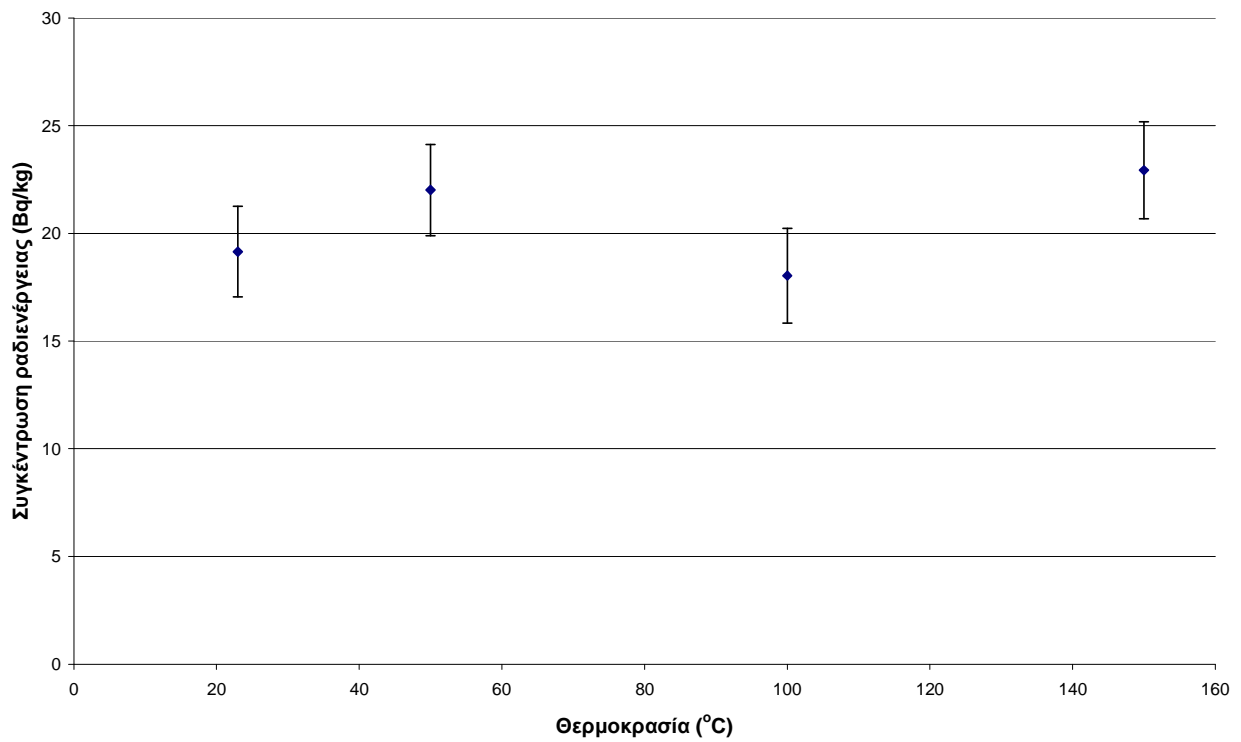
Σχήμα 3-4: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ac}$  (Bq/kg) - Θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )



Σχήμα 3-5: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$  (Bq/kg) - Θερμοκρασία(°C)



Σχήμα 3-6: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$  (Bq/kg) - Θερμοκρασία(°C)



## **4 Μελέτη της διακύμανσης της συγκέντρωσης φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του χώματος**

Όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία, λόγω της συμπεριφοράς ορισμένων ραδιενεργών ισοτόπων στο περιβάλλον, είναι δυνατό να παρατηρούνται διαφορές στη συγκέντρωσή τους στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του χώματος. Για παράδειγμα, τα ισότοπα,  $^7\text{Be}$  και  $^{210}\text{Pb}$  παράγονται στον αέρα, ενώ το  $^{137}\text{Cs}$  απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα από διάφορες πηγές ραδιενεργού ρύπανσης (Αναγνωστάκης 2005α). Τα τρία αυτά ισότοπα στη συνέχεια επικάθονται στο έδαφος και προσκολλώνται στα σωματίδια του χώματος. Τα πιο λεπτόκοκκα σωματίδια του χώματος έχουν μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια από τα χονδρόκοκκα και κατά συνέπεια θα μπορούσαν να εμφανίζουν αυξημένη ειδική ραδιενέργεια.

Το πείραμα επίδρασης του χονδρόκοκκου κλάσματος, που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.5, έδειξε πως τέτοια φαινόμενα είναι δυνατό να παρατηρηθούν σε γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις, καθώς για τα ισότοπα  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{210}\text{Pb}$  η συγκέντρωση ραδιενέργειας του πλέον χονδρόκοκκου κλάσματος είναι σημαντικά μικρότερη από τη συγκέντρωση του υπόλοιπου δείγματος.

Για την περαιτέρω διερεύνηση της εξάρτησης της συγκέντρωσης ραδιενέργειας από το μέγεθος των κόκκων ενός δείγματος χώματος σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε πείραμα κοκκομετρικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, λήφθηκε μεγάλο δείγμα χώματος το οποίο κοσκινίστηκε ώστε να διαχωριστεί σε 8 κοκκομετρικά κλάσματα. Από κάθε κλάσμα προέκυψε ένα υπο-δείγμα. Τα 8 υπο-δείγματα αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας και προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ . Στη συνέχεια, τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν στατιστικά με βάση το u-score και απεικονίστηκαν γραφικά σε διαγράμματα συγκέντρωσης ραδιενέργειας – μεγέθους κόκκων.

### **4.1 Δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης χώματος**

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ποσότητα χώματος που έπρεπε να συλλεχθεί από τη συγκεκριμένη θέση δειγματοληψίας, έτσι ώστε μετά την κατανομή στα επιμέρους κλάσματα να προκύψουν δείγματα επαρκούς ποσότητας, χρειάστηκε να γίνει μία προκαταρκτική εκτίμηση της κοκκομετρίας του χώματος της περιοχής. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική ανάλυση κοκκομετρίας μικρής ποσότητας

χώματος, η οποία είχε συλλεχθεί σε προγενέστερη δειγματοληψία και δεν είχε συσκευαστεί. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι υπόλοιπες ποσότητες των υποδειγμάτων MS493, MS494, MS495 και MS496, οι οποίες προέρχονται από το αρχικό δείγμα 1-2. Η ποσότητα αυτή κοσκινίστηκε και διαχωρίστηκε σε 8 κοκκομετρικά κλάσματα. Από τη διαδικασία προέκυψαν διαγράμματα που παρουσιάζουν τη μάζα του χώματος για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα.

#### **4.1.1 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός**

Για τη δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε η μηχανή AS-200 Control. Η μηχανή και η διαδικασία λειτουργίας της περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.5.2.1.

Για το διαχωρισμό του χώματος σε 8 κοκκομετρικά κλάσματα, χρησιμοποιήθηκαν τα κόσκινα με το ακόλουθο μέγεθος οπών:

- 2 mm
- 1 mm
- 500 μm
- 250 μm
- 125 μm
- 63 μm
- 45 μm

Η χρήση κόσκινου μικρότερο από 45 μm δεν κρίθηκε σκόπιμη για το χώμα, καθώς το κλάσμα του χώματος που είναι μικρότερο από 45 μm αναμένεται να είναι πολύ μικρό.

#### **4.1.2 Διαδικασία κοσκίνισματος**

Η διαδικασία κοσκίνισματος πραγματοποιήθηκε διαδοχικά για κάθε μία από τις τέσσερις ποσότητες χώματος. Σε κάθε περίπτωση ακολουθήθηκε η ακόλουθη διαδικασία:

- Ζυγίστηκε διαδοχικά κάθε ένα από τα χρησιμοποιούμενα κόσκινα και καταγράφηκε η μάζα τους.
- Ζυγίστηκε η ποσότητα του χώματος.
- Πραγματοποιήθηκε κοσκίνισμα για 20 λεπτά, με πλάτος ταλάντωσης 2 mm. Η τυποποιημένη διαδικασία επιβάλλει τη συνέχιση του κοσκίνισματος για

διαδοχικά διαστήματα 5 λεπτών, έως ότου να πληρείται το επιλεγμένο κριτήριο διακοπής της διαδικασίας (Πέππας 2008). Παρ' όλα αυτά, σε αυτή τη φάση δεν συνεχίστηκε περαιτέρω η διαδικασία. Αυτό έγινε γιατί στη συγκεκριμένη δοκιμή αυτό που ενδιέφερε ήταν μία πρώτη εκτίμηση της κοκκομετρίας του χώματος χωρίς ανάλυση σε βάθος.

- Αφαιρέθηκαν διαδοχικά τα κόσκινα και ζυγίστηκαν εκ νέου.

#### **4.1.3 Αποτελέσματα δοκιμής κοκκομετρικής ανάλυσης χώματος**

Από τη δοκιμαστική ανάλυση κοκκομετρίας προέκυψαν τα ποσοστά επί τοις εκατό της μάζας κάθε κλάσματος επί της αρχικής μάζας ( $P_i$ ), για κάθε μία από τις τέσσερις ποσότητες που κοσκινίστηκαν. Τα ποσοστά αυτά αποθηκεύτηκαν στα αρχεία INITIAL 36-39 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

Από τα ποσοστά που καταγράφονται στον Πίνακα παρατηρείται ότι οι κατανομές των τεσσάρων υπο-δειγμάτων δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-1 η κατανομή κοκκομετρίας που προέκυψε από την ανάλυση του πρώτου δείγματος. Από το Σχήμα αυτό, αλλά και τα δεδομένα του Πίνακα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Στα τρία κλάσματα κάτω από 0.125 mm περιλαμβάνεται περίπου το 8% της ολικής μάζας του χώματος.
- Στα δύο κλάσματα πάνω από 1 mm περιλαμβάνεται πάνω από το 50% της ολικής μάζας του χώματος.
- Στα ενδιάμεσα κλάσματα το χόμα φαίνεται να είναι κατανεμημένο ομοιογενώς, χωρίς να υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση σε κάποιο από αυτά.

Τέλος, εξετάζοντας οπτικά το περιεχόμενο των κόσκινων γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι στα κόσκινα 1 και 2 mm έχουν συγκεντρωθεί αποκλειστικά ξένα υλικά (πέτρες, ρίζες κτλ.)

## 4.2 Σύγκριση συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα διάφορα κλάσματα χώματος

### 4.2.1 Δειγματοληψία

#### 4.2.1.1 Υπολογισμός απαιτούμενης μάζας αρχικού δείγματος

Κατά το σχεδιασμό του πειράματος υπολογίστηκε η απαιτούμενη μάζα του αρχικού δείγματος, έτσι ώστε σε κάθε ένα από τα κλάσματα που θα προέκυπταν από το κοσκίνισμα να αντιστοιχεί αρκετή μάζα για τη σωστή πλήρωση δοχείου γεωμετρίας 2.

Το δοχείο γεωμετρίας 2 έχει σχεδόν κυλινδρική μορφή, με ακτίνα βάσης  $r = 36\text{mm}$  και ύψος  $h = 69\text{mm}$ . Θεωρώντας ότι το δοχείο είναι απόλυτα κυλινδρικό, ο όγκος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_2 = r^2 \cdot \pi \cdot h \quad (4.1)$$

Από τη Σχέση (4.1) προκύπτει ότι ο όγκος δείγματος για γεωμετρία 2 είναι:

$V_2 = 280.9\text{cm}^3$ . Λαμβάνοντας υπ' όψιν και τη μικρή κωνικότητα που εμφανίζει το δοχείο, ο ακριβής όγκος του έχει προσδιοριστεί ίσος με  $V_2 = 282\text{cm}^3$ .

Η πυκνότητα του χώματος ισούται με το λόγο της μάζας του συσκευασμένου χώματος προς τον όγκο του δοχείου. Η ακριβής πυκνότητα του χώματος διαφοροποιείται σημαντικά από την εκάστοτε διάμετρο των κόκκων του κλάσματος. Κατά τη δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης υπολογίστηκε μια μέση τιμή της πυκνότητας του χώματος. Προέκυψε η τιμή  $\rho = 0.87\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Συνεπώς, για την πλήρωση της γεωμετρίας 2 απαιτείται μάζα χώματος ίση με:

$$M_2 = V_2 \cdot \rho \Rightarrow M_2 = 245.3\text{gr}.$$

Για τη σωστή πλήρωση των δοχείων αρκεί να εξασφαλιστεί ότι το κλάσμα με τη μικρότερη μάζα έχει κατ' ελάχιστο μάζα ίση με  $M_2$ . Όπως προαναφέρθηκε, από τη δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης προέκυψαν τα ποσοστά, επί τοις εκατό, της μάζας κάθε κλάσματος επί της αρχικής μάζας ( $P_i$ ). Από τα στοιχεία του Πίνακα 4-1 παρατηρείται ότι το πλέον λεπτόκοκκο κλάσμα ( $< 45\ \mu\text{m}$ ) έχει το μικρότερο ποσοστό μάζας. Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι απαιτείται ο υπολογισμός της αρχικής μάζας για τη δυσμενέστερη περίπτωση, θα χρησιμοποιηθεί το χαμηλότερο ποσοστό

( $P_{min} = 3.1\%$ ), το οποίο εμφανίζεται για τη δεύτερη ποσότητα χώματος που κοσκινίστηκε.

Υπενθυμίζεται ότι από τα πειράματα που περιγράφηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο προέκυψε ότι το αρχικό ποσοστό υγρασίας των δειγμάτων χώματος ήταν ~20%, δηλαδή σε κάθε περίπτωση υπάρχει απώλεια περίπου 20% επί της αρχικής μάζας.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω προέκυψε η ακόλουθη σχέση υπολογισμού της επιθυμητής αρχικής μάζας:

$$M_{ολ} = \frac{M_2}{0.8 \cdot P_{min}} \quad (4.2).$$

Από τη σχέση αυτή, προκύπτει ότι η ελάχιστη απαιτούμενη αρχική μάζα του δείγματος είναι:  $M_{ολ} = 9891.1gr$ . Τελικά, αποφασίσθηκε η συλλογή δείγματος αρχικής μάζας όχι μικρότερης από 10 kg.

#### **4.2.1.2 Διαδικασία δειγματοληψίας**

Η 2<sup>η</sup> δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στη θέση «Πολυτεχνειούπολη 1», στις 30/11/2009, σύμφωνα με την τυπική διαδικασία δειγματοληψίας που ακολουθεί το ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως αυτή περιγράφεται στην Παράγραφο 2.4.2. Τα βασικά στοιχεία της δειγματοληψίας παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1. Από τα δύο δείγματα επιφανειακού χώματος που λήφθηκαν (2-1 και 2-2), μόνο το δείγμα 2-2 χρησιμοποιήθηκε στο παρόν πείραμα. Το δείγμα 2-1 χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα επίδρασης του χονδρόκοκκου κλάσματος, το οποίο περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.5.

Λόγω του μεγάλου όγκου του δείγματος 2-2, και προκειμένου να μην συλλεχθεί χώμα από μεγαλύτερο βάθος από το επιθυμητό 1cm, το χώμα συλλέχθηκε από τέσσερις διαφορετικές γειτονικές θέσεις, που απέχουν μεταξύ τους λιγότερο από 4 m.

Στο εργαστήριο το δείγμα 2-2 ζυγίστηκε και η νωπή του μάζα βρέθηκε ίση με 10.3 kg. Στη συνέχεια, αφέθηκε να ξηραθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Λόγω του μεγάλου του όγκου, η διαδικασία αεροξήρανσης διήρκεσε 9 μέρες.

#### **4.2.2 Κοσκίνισμα**

Για την κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος χώματος χρησιμοποιήθηκε η μηχανή AS-200 Control. Όπως και στη δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκαν



7 κόσκινα με μέγεθος οπών: 2 mm, 1 mm, 500 μm, 250 μm, 125 μm, 63 μm και 45 μm.

Βάση των προδιαγραφών του μηχανήματος, η μέγιστη ποσότητα υλικού που μπορεί να κοσκινιστεί είναι 3 kg. Λόγω της υφής του χώματος, και για να αποφευχθεί η δημιουργία συσσωματωμάτων που παρεμποδίζουν τη σωστή διαδικασία του κοσκινίσματος, αποφασίστηκε η επεξεργασία του δείγματος να γίνει ανά 1 kg.

#### **4.2.2.1 Κριτήριο διακοπής**

Στα πειράματα που περιγράφηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο η διαδικασία του κοσκινίσματος πραγματοποιήθηκε χωρίς να χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένο κριτήριο διακοπής. Αυτό έγινε γιατί δεν ενδιέφερε ο ακριβής διαχωρισμός των κοκκομετρικών κλασμάτων, αλλά μόνο η αφαίρεση του πλέον χονδρόκοκκου κλάσματος.

Στο παρόν πείραμα, όμως, ενδιέφερε ο κατά το δυνατό ακριβής διαχωρισμός του αρχικού δείγματος στα επιμέρους κλάσματά του. Για το λόγο αυτό, για το κοσκίνισμα ακολουθήθηκε το ακόλουθο κριτήριο διακοπής: Η επεξεργασία τερματίζεται εφ' όσον η μεταβολή στη μάζα που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο δεν υπερβαίνει το 0.5% της συνολικής αρχικής μάζας (Allen 1997). Συνεπώς, στο συγκεκριμένο πείραμα, δεδομένου ότι το κοσκίνισμα γινόταν ανά ποσότητες χώματος μάζας περίπου 1 kg, η μεταβολή της μάζας κάθε κλάσματος δεν έπρεπε να υπερβαίνει τα 5 gr.

#### **4.2.2.2 Πειραματική διαδικασία**

Αρχικά, λήφθηκε ποσότητα χώματος περίπου 1 kg (συγκεκριμένα 999.12 gr). Πραγματοποιήθηκε κοσκίνισμα για 20 λεπτά, με πλάτος ταλάντωσης 2 mm, χωρίς διακοπή λειτουργίας. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές δεκάλεπτες επαναλήψεις με το ίδιο πλάτος ταλάντωσης, έως ότου να ικανοποιηθεί το κριτήριο διακοπής για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα. Σημειώνεται ότι μεταξύ των διαδοχικών δεκάλεπτων επαναλήψεων λάμβανε χώρα η ζύγιση των κόσκινων και γινόταν έλεγχος του κριτηρίου διακοπής.

Μετά από 4 επαναλήψεις το κριτήριο διακοπής ικανοποιήθηκε για όλα τα κλάσματα εκτός από το πιο χονδρόκοκκο (κλάσμα > 2 mm). Για να μην γίνει η διαδικασία υπερβολικά χρονοβόρα αποφασίστηκε η διακοπή της επεξεργασίας. Τελικά, ο συνολικός χρόνος κοσκινίσματος ορίστηκε ίσος με 1 hr (20+4·10 min).

Στη συνέχεια, το κάθε κλάσμα χόματος συσκευάστηκε ανεξάρτητα και τα κόσκινα καθαρίστηκαν με προσοχή.

Η διαδικασία επαναλήφθηκε 9 φορές, με τις ίδιες ρυθμίσεις διάρκειας κοσκίνισματος και πλάτους ταλάντωσης, έως ότου ολοκληρώθηκε το κοσκίνισμα όλης της ποσότητας του δείγματος 2-2.

#### **4.2.2.3 Ιδιαιτερότητες στο κοσκίνισμα του κλάσματος των 125 $\mu\text{m}$**

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι κατά τη διάρκεια του κοσκίνισματος προέκυψαν ορισμένα προβλήματα όσον αφορά στο κόσκινο των 125  $\mu\text{m}$ . Συγκεκριμένα, στο κόσκινο αυτό δημιουργούνταν συσσωματώματα που εμπόδιζαν τη ροή του χόματος δια μέσου των οπών. Ως αποτέλεσμα, ενδέχεται η μάζα που συλλέχθηκε στα τρία κλάσματα κάτω από τα 125  $\mu\text{m}$  να είναι μικρότερη από την πραγματική μάζα των κλασμάτων αυτών.

Για την αντιμετώπιση του σχηματισμού συσσωματωμάτων διατίθενται από την εταιρεία κατασκευής της χρησιμοποιούμενης μηχανής κοσκίνισματος πλαστικοί μικροί κύβοι ή μεταλλικές αλυσίδες. Ο βοηθητικός αυτός εξοπλισμός εισάγεται στο κόσκινο μαζί με την ποσότητα του υλικού και με την ανατάραξη του κόσκινου βοηθάει να σπάσουν τα σχηματιζόμενα συσσωματώματα. Όμως, το ΕΠΤ-ΕΜΠ δεν διαθέτει τον εξοπλισμό αυτό. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος δοκιμάστηκαν οι ακόλουθες μέθοδοι:

- Εισήχθησαν στο κόσκινο των 125  $\mu\text{m}$  μικρά μεταλλικά παξιμάδια. Διαπιστώθηκε ότι δεν επαρκούν για το σπάσιμο των συσσωματωμάτων.
- Δοκιμάστηκε η λειτουργία της μηχανής με διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης. Η αυξομείωση αυτή δεν είχε κάποιο αποτέλεσμα.
- Δοκιμάστηκε η λειτουργία της μηχανής με διακοπές. Ούτε σε αυτήν την περίπτωση παρατηρήθηκε κάποια αισθητή βελτίωση στη διαδικασία του κοσκίνισματος.

Τελικά, δεν εφαρμόστηκε μία συγκεκριμένη διαδικασία για την αντιμετώπιση των συσσωματωμάτων στο κόσκινο των 125  $\mu\text{m}$ . Όμως, μετά από κάθε κοσκίνισμα δινόταν μεγάλη προσοχή στο καθάρισμα του κόσκινου αυτού, ώστε να αποφεύγεται κατά το δυνατό το κλείσιμο των οπών του κόσκινου.

#### **4.2.2.4 Κοκκομετρική ανάλυση**

Με το πέρας της διαδικασίας κοσκινίσματος της πρώτης ποσότητας χώματος προέκυψε διάγραμμα (Σχήμα 4-2) στο οποίο απεικονίζεται η ποσότητα του χώματος που συλλέχθηκε σε κάθε κόσκινο. Από το διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι:

- Στα τρία πιο λεπτόκοκκα κλάσματα ( $< 0.125 \mu\text{m}$ ) συγκρατήθηκε συνολικά ποσοστό μικρότερο του 6% της ολικής ποσότητας χώματος.
- Σε καθένα από τα επόμενα τρία κλάσματα (0.125 - 0.25 mm, 0.25 - 0.5 mm, 0.5 – 1 mm,) συγκρατήθηκε ποσοστό μικρότερο από 15%.
- Στα δύο πιο χονδρόκοκκα κλάσματα ( $> 1 \text{ mm}$ ) συγκρατήθηκε συνολικά πάνω από το 56% της ολικής ποσότητας χώματος.

#### **4.2.3 Θραύση χονδρόκοκκου κλάσματος**

Για τη σωστή συσκευασία και ανάλυση του χονδρόκοκκου κλάσματος ( $> 2 \text{ mm}$ ), το οποίο αποτελείται κυρίως από μικρούς λίθους, κρίθηκε απαραίτητη η θραύση του. Όπως και στο πείραμα επίδρασης της λειοτρίβισης, που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.6, για τη θραύση χρησιμοποιήθηκε ο θραυστήρας με σιαγόνες, τύπου BB51. Περιγραφή της μηχανής και ανάλυση της διαδικασίας λειτουργίας δόθηκε στην Παράγραφο 3.6.1.

Από το πιο χονδρόκοκκο κλάσμα λήφθηκε ποσότητα χώματος 200 gr και τοποθετήθηκε στο θραυστήρα. Η επεξεργασία διήρκεσε περίπου 2 λεπτά, ενώ το πλάτος της σχισμής μεταξύ των σιαγόνων ρυθμίστηκε στα 0.5 mm.

#### **4.2.4 Συσκευασία δειγμάτων**

Η συνολική ποσότητα χώματος για κάθε κλάσμα αναμίχθηκε σε μια σακούλα, ώστε να εξασφαλιστεί η ομοιογένεια των υπο-δειγμάτων. Στη συνέχεια, από κάθε κλάσμα προέκυψε ένα υπο-δείγμα γεωμετρίας 5. Αναλυτικές πληροφορίες για τη γεωμετρία 5 δόθηκαν στην Παράγραφο 2.5.2.

Με το υλικό που περίσσεψε από κάθε κλάσμα πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της υγρασίας. Για το πιο χονδρόκοκκο κλάσμα δεν κρίθηκε απαραίτητη, καθώς το κλάσμα αποτελείται κυρίως από πέτρες, οι οποίες αναμένεται να έχουν μηδενική υγρασία.

Στον Πίνακα 4-2 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των 8 υπο-δειγμάτων, δηλαδή ο κωδικός τους, το ποσοστό υγρασίας, η ξηρή και νωπή μάζα, καθώς και το κλάσμα από το οποίο προέρχονται.

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι ο αρχικός σχεδιασμός του πειράματος προέβλεπε τη συσκευασία του χρώματος σε υπο-δείγματα γεωμετρίας 2, ενώ βάση της γεωμετρίας 2 έγινε και η εκτίμηση της απαιτούμενης αρχικής μάζας του δείγματος, η οποία περιγράφεται στην Παράγραφο 4.2.1.1. Όμως, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συσκευασίας διαπιστώθηκε ότι η μάζα χρώματος των δύο πλέον λεπτόκοκκων κλασμάτων δεν επαρκούσε τελικά για τη σωστή πλήρωση δοχείου γεωμετρίας 2.

Στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζονται συγκριτικά τα διαγράμματα μάζας ανά κοκκομετρικό κλάσμα που προέκυψαν από την 1<sup>η</sup> ποσότητα που κοσκινίστηκε κατά τη δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης, με κόκκινη γραμμή, και από το κοσκίνισμα του δείγματος 2-2, με πράσινη γραμμή. Από το διάγραμμα αυτό γίνεται εμφανές ότι τα λεπτόκοκκα κλάσματα του δείγματος 2-2 έχουν σημαντικά μικρότερη μάζα, από τα αντίστοιχα των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης, παρ' όλο που το κοσκίνισμα διήρκησε πολύ περισσότερο. Η απόκλιση αυτή εξηγεί το γεγονός ότι παρά τον αρχικό σχεδιασμό του πειράματος, τελικά η ποσότητα χρώματος σε ορισμένα κλάσματα δεν επαρκούσε για την πλήρωση δοχείων γεωμετρίας 2. Υπενθυμίζουμε ότι τα δείγματα 1-2 και 2-2 που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω πειράματα αντίστοιχα, συλλέχθηκαν από την ίδια θέση δειγματοληψίας αλλά από διαφορετικά σημεία (απόσταση λίγων μέτρων), γεγονός που ενδεχομένως εξηγεί τη διαφορετική κοκκομετρική τους σύσταση.

## **4.2.5 γ-Φασματοσκοπική ανάλυση**

### **4.2.5.1 Επιλογή ισοτόπων**

Όπως και στα πειράματα του 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων του παρόντος πειράματος προσδιορίστηκε η συγκέντρωση των ισοτόπων <sup>137</sup>Cs, <sup>40</sup>K, <sup>228</sup>Ac, <sup>210</sup>Pb και <sup>234</sup>Th. Τα εκπεμπόμενα φωτόνια σε κάθε περίπτωση αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 3.3.1.

Σε αυτό το πείραμα, αποφασίστηκε επιπλέον ο προσδιορισμός του <sup>7</sup>Be. Το ισότοπο αυτό εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 477.59 keV, με ποσοστό εκπομπής 10.4%. Είναι φυσικό ραδιενεργό ισότοπο και παράγεται στην ατμόσφαιρα με τη διαδικασία του spallation, δηλαδή του κατακερματισμού ελαφρών ατμοσφαιρικών πυρήνων, όπως

είναι ο άνθρακας, το άζωτο και το οξυγόνο, όταν αυτοί απορροφήσουν πρωτόνια ή νετρόνια προερχόμενα από την κοσμική ακτινοβολία. Μετά το σχηματισμό του, συνδέεται με το αεροζόλ της ατμόσφαιρας, μεγέθους μικρότερου των 2 μm. Στη συνέχεια, επικάθεται στη γη είτε κατευθείαν από τον αέρα λόγω βαρύτητας, είτε μέσω των κατακρημνισμάτων.

Το  ${}^7\text{Be}$  έχει μικρό χρόνο ημιζωής ( $T_{1/2} = 53.44d$ ). Δεδομένου και του μηχανισμού παραγωγής του, στο έδαφος ανιχνεύεται μόνο επιφανειακά, μέχρι βάθος περίπου 2 cm (Παπανδρέου 2009). Ακόμα, η συγκέντρωση της ραδιενέργειας του  ${}^7\text{Be}$  αναμένεται να παρουσιάζει έντονη χωρική κύμανση, καθώς ο τρόπος με τον οποίο επικάθεται στο έδαφος εξαρτάται σημαντικά από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

#### **4.2.5.2 Επιλογή ανιχνευτών και διάρκεια συλλογής φασμάτων**

Για τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας των ισοτόπων που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν δύο ανιχνευτές γερμανίου: ο ανιχνευτής HPGe για τον προσδιορισμό των ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια υψηλής ενέργειας ( ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{228}\text{Ac}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ) και ο ανιχνευτής LEGe για τον προσδιορισμό των ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια χαμηλής ενέργειας ( ${}^{210}\text{Pb}$ ,  ${}^{234}\text{Th}$ ). Τα χαρακτηριστικά των δύο ανιχνευτών παρουσιάζονται στις Παραγράφους 2.6.1.1 και 2.6.1.2, αντίστοιχα.

Λόγω της μικρής μάζας των δειγμάτων γεωμετρίας 5, ο χρόνος συλλογής ορίστηκε ίσος με 345600 sec (3 ημέρες) και για τους δύο ανιχνευτές, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια στις μετρήσεις.

#### **4.2.5.3 Διόρθωση της απόδοσης ανιχνευτή HPGe για τα δείγματα γεωμετρίας 5 λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης**

Ως πραγματική σύμπτωση (True coincidence) ορίζεται το φαινόμενο της διαδοχικής εκπομπής δύο ή και περισσότερων φωτονίων, από τον ίδιο κλάδο διάσπασης του πυρήνα ενός ισοτόπου και η ταυτόχρονη ανίχνευσή τους ως ένα φωτόνιο, ενέργειας ίσης με το άθροισμα των ενεργειών των επί μέρους φωτονίων. Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης επηρεάζει το μηχανισμό ανίχνευσης φωτονίων, επιδρώντας στο μέγεθος της επιφάνειας φωτοκορυφής ( $A$ ). Λόγω της συμμετοχής της επιφάνειας φωτοκορυφής στη σχέση υπολογισμού της συγκέντρωσης ραδιενέργειας (Σχέση 3.1), το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης αποτελεί πηγή σημαντικού συστηματικού σφάλματος στον προσδιορισμό της ραδιενέργειας ενός δείγματος (Gilmore 1995).

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι. Ένας ιδιαίτερα απλός τρόπος αντιμετώπισης του κατά τον υπολογισμό της ραδιενέργειας ενός ισοτόπου, είναι ο πειραματικός προσδιορισμός της τιμής της απόδοσης με τη βοήθεια πρότυπης πηγής του ίδιου ισοτόπου ( $\epsilon_s$ ), αντί αυτής που προκύπτει από την καμπύλη προσαρμογής ( $\epsilon_f$ ) που εκτιμάται κατά τη βαθμονόμηση απόδοσης της διάταξης. Επισημαίνεται ότι λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, κατά τον προσδιορισμό της καμπύλης βαθμονόμησης απόδοσης, είναι δυνατόν να εισάγεται σφάλμα το οποίο τελικά μεταφέρεται στην εκτιμώμενη από την καμπύλη τιμή της απόδοσης ( $\epsilon_f$ ). Το πρόβλημα αυτό είναι σημαντικό κατά τη μελέτη φωτονίων υψηλών ενεργειών, καθώς πολλά από τα ισότοπα που επιλέγονται συνήθως για τη βαθμονόμηση ανιχνευτών γ-φασματοσκοπίας στην περιοχή των υψηλών ενεργειών, όπως το  $^{60}\text{Co}$  και το  $^{88}\text{Y}$ , εμφανίζουν έντονο το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Προφανές μειονέκτημα της μεθόδου που βασίζεται στον προσδιορισμό της τιμής της απόδοσης με τη βοήθεια πρότυπης πηγής του ίδιου ισοτόπου ( $\epsilon_s$ ) είναι ότι απαιτείται η ύπαρξη κατάλληλης πρότυπης πηγής για τον προσδιορισμό κάθε ισοτόπου.

Για την ανάλυση των δειγμάτων γεωμετρίας 2 οι διαθέσιμες στο ΕΠΤ-ΕΜΠ πειραματικές τιμές απόδοσης είναι ήδη καταχωρημένες στον κώδικα SPUNAL και χρησιμοποιούνται αυτόματα. Για τη γεωμετρία 5, παρ' όλο που υπάρχουν από διάφορα πειράματα διαθέσιμες τιμές απόδοσης για αρκετά ισότοπα, αυτές δεν έχουν καταχωρηθεί στο σύστημα, με αποτέλεσμα ο κώδικας να δίνει αποτελέσματα για τη ραδιενέργεια  $R_f$  χρησιμοποιώντας την απόδοση από προσαρμογή  $\epsilon_f$  και τον κλασικό τύπο:

$$R_f = \frac{A - B}{m \cdot t \cdot \text{yield} \cdot \epsilon_f}.$$

Η ακριβέστερη τιμή της ραδιενέργειας  $R$  μπορεί να υπολογιστεί από τα αποτελέσματα του κώδικα εφαρμόζοντας την απλή διόρθωση:

$$R = \frac{A - B}{m \cdot t \cdot \text{yield} \cdot \epsilon_s} = \frac{A - B}{m \cdot t \cdot \text{yield} \cdot \epsilon_f} \cdot \frac{\epsilon_f}{\epsilon_s} = R_f \frac{\epsilon_f}{\epsilon_s} \quad (4.3).$$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η διόρθωση αυτή επηρεάζει ιδιαίτερα τη μετρούμενη ραδιενέργεια των ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια υψηλών ενεργειών.

Στην παρούσα ΔΕ τα ισότοπα υψηλών ενεργειών που μελετούνται είναι τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$ . Για τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  υπάρχουν προσδιορισμένες πειραματικά τιμές της απόδοσης, και επομένως η διόρθωση της εξίσωσης (4.3) εφαρμόστηκε στα αποτελέσματα των αναλύσεων του ανιχνευτή 5. Πιο συγκεκριμένα, για το  $^{137}\text{Cs}$  από την καταχωρημένη στον κώδικα προσαρμογή προκύπτει η τιμή  $\varepsilon_f = 1.891 \cdot 10^{-2}$ , ενώ από το αντίστοιχο πειραματικό σημείο προκύπτει  $\varepsilon_s = 1.952 \cdot 10^{-2}$  (Καράγγελος 2008). Αντίστοιχα, για το  $^{40}\text{K}$  υπάρχουν οι τιμές:  $\varepsilon_f = 0.976 \cdot 10^{-2}$  και  $\varepsilon_s = 1.061 \cdot 10^{-2}$  (Βασιλοπούλου 2008).

Για το  $^{228}\text{Ac}$  δεν πραγματοποιήθηκε καμία διόρθωση, καθώς δεν υπήρχε διαθέσιμο κατάλληλο πειραματικό σημείο. Για την αντιμετώπιση του θέματος σε τέτοιες περιπτώσεις στο ΕΠΤ-ΕΜΠ εφαρμόζεται άλλη, πιο σύνθετη πειραματική-αριθμητική μεθοδολογία, η εφαρμογή της οποίας ξεφεύγει από τα όρια της παρούσης ΔΕ (Καρφόπουλος 2010).

#### 4.2.5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 4-3 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των φασμάτων που προέκυψαν. Στους Πίνακες 4-4 έως 4-9 δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας κάθε ισότοπου. Στους ίδιους Πίνακες παρουσιάζεται και η αβεβαιότητα της ανάλυσης, συνυπολογίζοντας την αβεβαιότητα του υποστρώματος, όπως αυτή υπολογίστηκε στην Παράγραφο 3.3.5. Η αβεβαιότητα υποστρώματος δεν λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο στην περίπτωση του  $^7\text{Be}$ , καθώς το ισότοπο αυτό έχει πολύ μικρό χρόνο ημιζωής και δεν ανιχνεύεται στο υπόστρωμα.

Επίσης, λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής του  $^7\text{Be}$  ( $T_{1/2} = 53.44d$ ) είναι απαραίτητη η αναγωγή της εκάστοτε μετρούμενης τιμής ραδιενέργειας σε μία κοινή ημερομηνία αναφοράς, ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν συγκρίσεις μεταξύ των μετρήσεων.

Ως γνωστόν, εάν η συγκέντρωση ραδιενέργειας την χρονική στιγμή  $t_0$  είναι  $R_0$ , η αντίστοιχη ραδιενέργεια μετά από διάστημα  $t$ , δίνεται από τη σχέση (Λεωνίδου 1984):

$$R(t) = R_0 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right) \Rightarrow$$

$$R_0 = \frac{R(t)}{\exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right)} \quad (4.4)$$

Στον Πίνακα 4-7 παρουσιάζονται οι τιμές ραδιενέργειας του  ${}^7\text{Be}$  τη στιγμή της φασματοσκοπικής ανάλυσης ( $R$ ), το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από τη δειγματοληψία ως τη φασματοσκοπική ανάλυση και η αντίστοιχη ραδιενέργεια ανηγμένη στην ημερομηνία αναφοράς βάση της Σχέσης (4.4) ( $R_0$ ). Ως ημερομηνία αναφοράς θεωρήθηκε η ημερομηνία δειγματοληψίας του υπόψη δείγματος (30/11/2009). Στα κλάσματα που δεν ανιχνεύθηκε το  ${}^7\text{Be}$  παρουσιάζεται το αντίστοιχο κατώτατο όριο ανίχνευσής του, ο υπολογισμός του οποίου αναλύεται στην Παράγραφο 4.2.6.

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι η φασματοσκοπική ανάλυση των υπο-δειγμάτων πραγματοποιήθηκε μετά από διάστημα 23 με 57 ημερών από την ημερομηνία δειγματοληψίας, λόγω περιορισμένης διάθεσης των ανιχνευτών HPGe και LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής του  ${}^7\text{Be}$  το διάστημα αυτό αρκεί για να διασπαστεί μεγάλο μέρος της αρχικής ποσότητας του ισοτόπου αυτού. Για να ληφθούν κατά το δυνατό ακριβή αποτελέσματα, η ανάλυση των υπο-δειγμάτων ξεκίνησε από το πιο χονδρόκοκκο και συνεχίστηκε με τα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα, καθώς ανεμένετο η συγκέντρωση ραδιενέργειας να αυξάνεται στα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα.

#### **4.2.6 Κατώτερο όριο ανίχνευσης του ${}^7\text{Be}$**

Από τις τιμές του Πίνακα 4-7, παρατηρείται ότι το  ${}^7\text{Be}$  δεν ανιχνεύτηκε σε όλα τα υπο-δείγματα. Για να είναι πλήρης η παρουσίαση των αποτελεσμάτων πρέπει να υπολογισθεί το κατώτατο όριο ανίχνευσης του  ${}^7\text{Be}$ , δηλαδή ποιο είναι το ελάχιστο επίπεδο ραδιενέργειας ενός δείγματος χώματος γεωμετρίας 5 που μπορεί να ανιχνευθεί από τον ανιχνευτή HPGe, για φασματοσκοπική ανάλυση με διάρκεια συλλογής φάσματος 345600 sec.

##### **4.2.6.1 Βασικά στοιχεία υπολογισμού κατώτατου ορίου ανίχνευσης**

Για τον υπολογισμό του κατώτατου ορίου ανίχνευσης πρέπει να υπολογιστούν τα ακόλουθα μεγέθη (Gilmore 1995):



- Κρίσιμο όριο (Critical limit -  $L_C$ ). Μία φωτοκορυφή ενδέχεται να είναι τόσο μικρή που να «χάνεται» μέσα στην κύμανση του συνεχούς υποστρώματος. Το κρίσιμο όριο αποτελεί έναν ποσοτικό χαρακτηρισμό της στατιστικής σημαντικότητας της υπολογιζόμενης επιφάνειας φωτοκορυφής. Δηλαδή, η επιφάνεια μιας φωτοκορυφής είναι πράγματι στατιστικά σημαντική, μόνο όταν η τιμή της ( $A$ ) είναι μεγαλύτερη από το κρίσιμο όριο.

Για τον υπολογισμό του κρίσιμου ορίου μιας φωτοκορυφής χρησιμοποιείται η σχέση:

$$L_C = 1.645 \cdot \left[ B \cdot \left( 1 + \frac{n}{2m} \right) \right]^{1/2} \quad (4.5),$$

Όπου  $B$  το συνεχές υπόστρωμα που αντιστοιχεί στην υπό μελέτη φωτοκορυφή,  $n$  ο αριθμός των καναλιών που περιέχουν τη φωτοκορυφή και  $m$  ο αριθμός των καναλιών δεξιά και αριστερά της φωτοκορυφής που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του  $B$ .

- Κατώτατο όριο ανίχνευσης (Detection limit -  $L_D$ ). Το κατώτατο όριο ανίχνευσης αποτελεί την ελάχιστη επιφάνεια που πρέπει να έχει μια φωτοκορυφή ώστε να ανιχνεύεται με βεβαιότητα σε κάποιο καθορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Για τον υπολογισμό του μεγέθους σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% χρησιμοποιείται η σχέση:

$$L_D = 2.71 + 3.29 \cdot \left[ B \cdot \left( 1 + \frac{n}{2m} \right) \right]^{1/2} \quad (4.6),$$

Όπου τα μεγέθη  $B$ ,  $n$  και  $m$  ορίστηκαν προηγουμένως.

- Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (Minimum detectable activity -  $MDA$ ). Αποτελεί το ελάχιστο επίπεδο ραδιενέργειας που μπορεί να ανιχνευθεί και δίνεται από τη σχέση υπολογισμού της ραδιενέργειας (Σχέση (3.1) της Παραγράφου 3.3.5) για επιφάνεια φωτοκορυφής ίση με το κατώτατο όριο ανίχνευσης:

$$MDA = \frac{L_D}{m \cdot t \cdot yield \cdot \varepsilon} \quad (4.7).$$

#### 4.2.6.2 Υπολογισμός κατώτατου ορίου ανίχνευσης

Για κάθε ένα από τα υπο-δείγματα στα οποία δεν ανιχνεύτηκε  ${}^7\text{Be}$  υπολογίστηκε το αντίστοιχο κατώτατο όριο ανίχνευσης. Κατ' αρχήν υπολογίστηκαν τα μεγέθη  $L_C$  και  $L_D$  βάση των Σχέσεων (4.5) και (4.6) αντίστοιχα. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε από τη Σχέση 4-7 για κάθε υπο-δείγμα η ελάχιστη τιμή ραδιενέργειας  ${}^7\text{Be}$ , το οποίο έχει ποσοστό εκπομπής (*yield*) 0.1034, η οποία μπορεί να ανιχνευθεί σε φασματοσκοπική ανάλυση που πραγματοποιείται από ανιχνευτή με απόδοση φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη ενέργεια ( $\epsilon$ ) 0.02481318, με διάρκεια συλλογής φάσματος ( $t$ ) 345600 sec και  $m$  την αντίστοιχη ξηρή μάζα κάθε υπο-δείγματος σε kg.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η τιμή της ελάχιστης ραδιενέργειας που μπορεί να ανιχνευθεί εξαρτάται από το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δειγματοληψίας και φασματοσκοπικής ανάλυσης του δείγματος, λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής του  ${}^7\text{Be}$ . Όπως και για τη συγκέντρωση ραδιενέργειας, η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια μπορεί να αναχθεί σε κάποια ημερομηνία αναφοράς βάση της Σχέσης (4.4), αντικαθιστώντας όπου  $R$  την τιμή της  $MDA$ . Οι τιμές που προέκυψαν για την  $MDA$  με ημερομηνία αναφοράς και σε αυτή την περίπτωση την ημερομηνία δειγματοληψίας φαίνονται στον Πίνακα 4-7.

#### 4.2.7 Στατιστική ανάλυση

##### 4.2.7.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων με βάση το u-score

Με σκοπό να ελεγχθεί εάν είναι στατιστικά σημαντική η μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας μεταξύ των διάφορων κλασμάτων, πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος με βάση το u-score για κάθε ισότοπο και για κάθε διαδοχικό ζεύγος κλασμάτων. Η απόλυτη τιμή της μεταβλητής  $u$  σε κάθε περίπτωση δίνεται στους Πίνακες 4-10 και 4-11, για τα ισότοπα που ανιχνεύθηκαν στους ανιχνευτές HPGe και LEGe αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών θεωρείται στατιστικά σημαντική εφ' όσον η απόλυτη τιμή της μεταβλητής  $u$  είναι μεγαλύτερη από 2.58.

Παρατηρείται:

- Στα ισότοπα  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{228}\text{Ac}$  και  ${}^{234}\text{Th}$  μόνο οι τιμές των πλέον χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων κλασμάτων διαφέρουν σημαντικά από τις τιμές των υπόλοιπων

κλασμάτων. Στα ενδιάμεσα κλάσματα δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών ραδιενέργειας.

- Στα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{210}\text{Pb}$  οι τιμές σχεδόν όλων των ζευγών κλασμάτων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Δηλαδή, υπάρχει έντονη διακύμανση της συγκέντρωσης ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων του κλάσματος.

Για το  $^7\text{Be}$  δεν πραγματοποιήθηκε σύγκριση με βάση το u-score, λόγω του περιορισμένου αριθμού δεδομένων που λήφθηκαν για αυτό το ισότοπο.

Τα στατιστικά τεστ που αναφέρθηκαν παρέχουν πληροφορίες μόνο για τη μεταβολή στη συγκέντρωση ραδιενέργειας των διαδοχικών κλασμάτων. Δεν δίνουν, όμως, πληροφορίες για τη συνολική κύμανση της ραδιενέργειας στα 8 κλάσματα του δείγματος. Η πραγματοποίηση όλου του συνόλου των ελέγχων για κάθε ζεύγος κλασμάτων και κάθε ισότοπο δεν κρίθηκε σκόπιμη, λόγω του μεγάλου απαιτούμενου όγκου υπολογισμών αλλά και της περιορισμένης εποπτικής χρησιμότητας. Για μια πιο ξεκάθαρη εικόνα της συμπεριφοράς των ισοτόπων στα διάφορα κλάσματα, κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων του πειράματος, με τη χάραξη διαγραμμάτων της συγκέντρωσης ραδιενέργειας ανά κοκκομετρικό κλάσμα.

#### 4.2.7.2 Διαγράμματα συγκέντρωσης ανά κλάσμα

Για κάθε ισότοπο χαράχθηκε το αντίστοιχο διάγραμμα συγκέντρωσης ραδιενέργειας ανά διάμετρο σωματιδίων κλάσματος. Στα Σχήματα 4-4 έως 4-9 απεικονίζονται:

- Οι 8 τιμές ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου που προέκυψαν από την ανάλυση των υπο-δειγμάτων του παρόντος πειράματος, καθώς και τα αντίστοιχα σφάλματά τους.
- Ο σταθμισμένος μέσος της τιμής ραδιενέργειας των κλασμάτων χώματος του παρόντος πειράματος. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιήθηκαν τα ποσοστά επί τοις εκατό επί της ολικής μάζας που αντιστοιχούν σε κάθε κλάσμα ( $P_i$ ), όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση κοκκομετρίας της πρώτης ποσότητας χώματος που κοσκινίστηκε στο παρόν πείραμα (Σχήμα 4-2). Χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i \cdot m_i \cdot R_i}{m} \quad (4.8)$$

Όπου  $R_i$  και  $m_i$  η ραδιενέργεια και η μάζα κάθε κλάσματος αντίστοιχα και  $m$  η ολική μάζα του δείγματος.

Ο σταθμισμένος μέσος αντιστοιχεί στη μπλε διακεκομμένη γραμμή του διαγράμματος.

- Η μέση τιμή ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου, όπως αυτή προκύπτει από την πρώτη τετράδα υπο-δειγμάτων του πειράματος επίδρασης του κοσκινίσματος (MS510-MS513), που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.5. Υπενθυμίζουμε ότι αυτά τα δείγματα δεν υπέστησαν καμία επεξεργασία πριν τη συσκευασία τους, εκτός από ομογενοποίηση. Δεδομένου ότι η ομογενοποίηση των αρχικών δειγμάτων περιορίζει σημαντικά την αβεβαιότητα δειγματοληψίας των υπο-δειγμάτων, η τετράδα αυτή θεωρήθηκε η πιο αντιπροσωπευτική για τα δείγματα που δεν έχουν υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στη σκούρα κόκκινη γραμμή των διαγραμμάτων.
- Η μέση τιμή ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου, όπως αυτή προκύπτει από τη δεύτερη τετράδα υπο-δειγμάτων του πειράματος επίδρασης της λειοτρίβισης (MS530-MS533), που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.6. Υπενθυμίζουμε ότι αυτά τα δείγματα υπέστησαν σύνθετη επεξεργασία, η οποία περιελάμβανε σπάσιμο του χονδρόκοκκου κλάσματος και στη συνέχεια λειοτρίβιση του κλάσματος άνω των 125  $\mu\text{m}$ . Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην ανοιχτή πράσινη γραμμή των διαγραμμάτων.

Εξαιρέση αποτελεί το διάγραμμα του  $^7\text{Be}$  (Σχήμα 4-7), στο οποίο παρουσιάζονται μόνο οι τιμές ραδιενέργειας σε όσα κλάσματα ανιχνεύθηκε (μπλε ρόμβοι), καθώς και οι τιμές της κατώτατης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας (*MDA*) σε όσα κλάσματα δεν ανιχνεύθηκε (μωβ τετράγωνα). Δεδομένου ότι διατίθενται μόνο τρεις τιμές ραδιενέργειας για το ισότοπο αυτό, δεν θα είχε νόημα να υπολογισθεί ο σταθμισμένος μέσος της συγκέντρωσης ραδιενέργειας.

Από τα διαγράμματα παρατηρείται:

- Όλα τα ισότοπα παρουσιάζουν την ίδια τάση μεταβολής στη συγκέντρωση της ραδιενέργειας. Στα πλέον λεπτόκοκκα κλάσματα παρατηρούνται ιδιαίτερα υψηλές τιμές συγκεντρώσεων. Στη συνέχεια, η συγκέντρωση διατηρείται σταθερή για τα περισσότερα κλάσματα. Τέλος, στο πιο χονδρόκοκκο κλάσμα παρατηρείται μια απότομη σημαντική μείωση της συγκέντρωσης.

- Για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$  ο σταθμισμένος μέσος των κοκκομετρικών κλασμάτων βρίσκεται ανάμεσα στη μέση τιμή των δειγμάτων χωρίς επεξεργασία και των δειγμάτων με σπάσιμο και λειοτρίβιση.
- Για το  $^{228}\text{Ac}$  ο σταθμισμένος μέσος των κοκκομετρικών κλασμάτων φαίνεται να συμπίπτει με τη μέση τιμή των δειγμάτων χωρίς επεξεργασία, ενώ είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τη μέση τιμή των δειγμάτων με σπάσιμο και λειοτρίβιση.

#### 4.2.8 Σύγκριση μετρούμενης ραδιενέργειας σε δείγματα γεωμετρίας 2 και 5

Στο παρόν πείραμα αναλύθηκαν δείγματα γεωμετρίας 5, των οποίων οι μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας απεικονίστηκαν στα Σχήματα 4-3 ως 4-8. Στα ίδια διαγράμματα, απεικονίστηκαν οι μέσες τιμές από δύο ομάδες υπο-δειγμάτων των πειραμάτων επίδρασης του χονδρόκοκκου κλάσματος και επίδρασης της λειοτρίβησης, τα οποία περιγράφηκαν στις Παραγράφους 3.5 και 3.6. Και στα δύο αυτά πειράματα τα υπο-δείγματα είχαν συσκευαστεί σε δοχεία γεωμετρίας 2. Προκειμένου να εξετασθεί το κατά πόσον η διαφορετική γεωμετρία μπορεί να εισαγάγει σφάλμα στις πειραματικές τιμές, πραγματοποιήθηκε η ακόλουθη σύγκριση.

Χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο δείγμα IAEA 327, το οποίο είναι συσκευασμένο και στις δύο γεωμετρίες, 2 και 5. Πραγματοποιήθηκε φασματοσκοπική ανάλυση των δύο δειγμάτων στον ανιχνευτή HPGe, για να υπολογισθεί η συγκέντρωση ραδιενέργειας για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$ . Και στις δύο μετρήσεις η διάρκεια συλλογής φάσματος ορίστηκε ίση με 345600 sec.

Σύμφωνα με το πιστοποιητικό του δείγματος IAEA 327, οι συγκεντρώσεις των δύο υπό μελέτη ισοτόπων με ημερομηνία αναφοράς την 31η Δεκεμβρίου 1996, ήταν:

$^{137}\text{Cs}$ :  $24.9 \pm 0.15 \text{ Bq/kg}$

$^{40}\text{K}$ :  $621 \pm 4.6 \text{ Bq/kg}$

Στους Πίνακες 4-12 και 4-13 παρουσιάζονται οι τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$  αντίστοιχα, που προέκυψαν από τις τωρινές αναλύσεις (19/3/2010 και 23/3/2010), καθώς και αυτές που προέκυψαν από την ανάλυση της ίδιας πηγής στον ανιχνευτή HPGe στα πλαίσια της ΔΔ του Δ.Ι. Καράγγελου (Καράγγελος 2008). Επισημαίνεται ότι για το ισότοπο  $^{137}\text{Cs}$  ήταν απαραίτητη η αναγωγή της μετρούμενης τιμής στην ημερομηνία αναφοράς. Η

αντίστοιχη τιμή της ραδιενέργειας για την ημερομηνία αναφοράς δίνεται από τη Σχέση (4.4). Η διαδικασία αυτή δεν κρίνεται απαραίτητη για το  $^{40}\text{K}$  λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής του ( $0.125 \cdot 10^{10}$  yr).

Όλες οι τιμές του Πίνακα 4-12 αναφέρονται στην ημερομηνία αναφοράς (31 Δεκεμβρίου 1996), βάση της Σχέσης (4.4). Επίσης, οι τιμές της ραδιενέργειας για τη γεωμετρία 5 που προέκυψαν από την παρούσα ΔΕ έχουν διορθωθεί βάση της Σχέσης (4.3), ενώ για τα αποτελέσματα της γεωμετρίας 2 έχει εξ αρχής από τον κώδικα χρησιμοποιηθεί πειραματικό σημείο απόδοσης. Παρατηρείται ότι σε αυτήν την περίπτωση οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο γεωμετριών είναι πολύ μικρότερες από αυτές των αναφερόμενων στη ΔΔ Δ.Ι. Καράγγελου, όπου δεν είχαν εφαρμοστεί τέτοιες διορθώσεις. Επιβεβαιώνεται επομένως η ορθή εφαρμογή της μεθόδου διόρθωσης.

Για να ελεγχθεί κατά πόσο οι παρατηρούμενες στα αποτελέσματα της παρούσης ΔΕ αποκλίσεις είναι στατιστικά σημαντικές, πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος με βάση το u-score για τα δύο ζεύγη μετρήσεων. Οι τιμές της μεταβλητής σύγκρισης u παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-14. Υπενθυμίζεται ότι η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών θεωρείται στατιστικά σημαντική εφ' όσον η απόλυτη τιμή του u είναι μεγαλύτερη από 2.58.

Παρατηρείται ότι και για τα δύο ισότοπα η διαφορά στην τιμή της ραδιενέργειας για τις γεωμετρίες 2 και 5 δεν είναι στατιστικά σημαντική. Συνεπώς, η σύγκριση δεδομένων για δείγματα διαφορετικών γεωμετριών μπορεί να πραγματοποιηθεί όπου υπάρχει έλλειψη καλύτερων στοιχείων, χωρίς να υπάρχει εισαγωγή σημαντικού σφάλματος.

#### 4.2.9 Συμπεράσματα

Από το πείραμα αυτό προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Για όλα τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ , και  $^{210}\text{Pb}$  παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στη συγκέντρωση ραδιενέργειας των διαφόρων κλασμάτων.
- Για το  $^{234}\text{Th}$ , η συγκέντρωση ραδιενέργειας των διαφόρων κλασμάτων δεν παρουσιάζει σημαντική κύμανση, εκτός από το πλέον λεπτόκοκκο κλάσμα.
- Η συγκέντρωση ραδιενέργειας των δύο πιο λεπτόκοκκων κλασμάτων είναι αισθητά αυξημένη για όλα τα ισότοπα. Για το  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{210}\text{Pb}$  η συμπεριφορά

αυτή ήταν αναμενόμενη. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δύο αυτά ισότοπα επικάθονται στο έδαφος και δεδομένης της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας που έχουν τα λεπτόκοκκα σωματίδια, εύλογα παρουσιάζουν και αυξημένη συγκέντρωση ραδιενέργειας. Αντίθετα, η συμπεριφορά αυτή δεν ανεμένετο να παρατηρείται στο  $^{40}\text{K}$  και το  $^{228}\text{Ac}$ .

- Η συγκέντρωση ραδιενέργειας του κλάσματος άνω των 2 mm είναι πολύ χαμηλότερη, από αυτή όλων των άλλων κλασμάτων και κατά συνέπεια και της μέσης τιμής. Δεδομένου ότι το κλάσμα αυτό αποτελεί ποσοστό άνω του 20% της ολικής μάζας του χώματος, η παρουσία του στο αναλυόμενο δείγμα μειώνει σημαντικά την ολική τιμή ραδιενέργειας των δειγμάτων. Υπενθυμίζεται ότι στο πείραμα αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος, το οποίο περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.5, παρατηρήθηκε για όλα τα ισότοπα στατιστικά σημαντική διαφορά στη μέση τιμή της ραδιενέργειας μεταξύ μίας τετράδας δειγμάτων που υπέστησαν αφαίρεση χονδρόκοκκου κλάσματος και μίας τετράδας που συσκευάστηκε ως είχε.
- Το  $^7\text{Be}$  ανιχνεύτηκε μόνο στα 3 κλάσματα από 250 έως 45  $\mu\text{m}$ , με μέγιστη συγκέντρωση ραδιενέργειας στο κλάσμα 125 – 63  $\mu\text{m}$ . Λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος που μεσολάβησε μεταξύ της δειγματοληψίας και της ανάλυσης, δεν μπορεί να προκύψει σαφές συμπέρασμα για τη συγκέντρωση του  $^7\text{Be}$  στα διάφορα κλάσματα. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι στο πλέον λεπτόκοκκο κλάσμα η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια είναι 9.7 Bq/kg, γεγονός που δηλώνει ότι η ραδιενέργεια του πλέον λεπτόκοκκου κλάσματος (< 45  $\mu\text{m}$ ) είναι μικρότερη από αυτή των κλασμάτων από 250 έως 45  $\mu\text{m}$ .
- Για το  $^7\text{Be}$  υπολογίστηκε η ελάχιστη τιμή ραδιενέργειας η οποία μπορεί να ανιχνευθεί για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα. Οι τιμές κυμαίνονταν από 3.3 έως 9.7 Bq/kg, ανηγμένες στην ημερομηνία δειγματοληψίας του δείγματος.

## Πίνακες κεφαλαίου

Πίνακας 4-1: Ποσοστό (%) μάζας κλάσματος προς την ολική μάζα κατά τη δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης

Κλάσμα (mm)	Ποσοστό (%) μάζας κλάσματος προς την ολική μάζα				
	Επανάληψη				Μέση τιμή ποσοστών
	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	
< 0.045	3.9	3.1	4.0	4.3	3.8
0.045-0.063	5.4	6.3	5.4	6.0	5.78
0.063-0.125	8.0	8.5	8.7	7.6	8.2
0.125-0.250	7.9	9.4	9.2	8.8	8.8
0.250-0.500	9.1	10.3	9.6	8.1	9.3
0.500-1.000	12.2	13.4	12.4	10.2	12.1
1.000-2.000	20.2	19.8	20.3	17.3	19.4
> 2.000	33.2	29.1	30.4	37.8	32.6

Πίνακας 4-2: Κατάλογος υπο-δειγμάτων δείγματος 2-2

Κωδικός υπο-δείγματος	Διάμετρος σωματιδίων κλάσματος (mm)	Υγρασία (%)	Συσκευασμένο δείγμα	
			Νωπή μάζα (gr)	Ξηρή μάζα (gr)
MS502	>2	-	-	136.23
MS503	1-2	3.1	90.84	88.02
MS504	0.5-1	3.3	86.43	83.58
MS505	0.25-0.5	3.4	97.83	94.50
MS506	0.125-0.25	4.1	102.06	97.88
MS507	0.063-0.125	3.4	90.17	87.10
MS508	0.045-0.063	3.4	78.62	75.95
MS509	<0.045	3.5	78.84	76.08



**Πίνακας 4-3: Κατάλογος φασμάτων κοκκομετρικών κλασμάτων χώματος**

<i>Κωδικός</i>	<i>Θέση SPUNAL</i>	<i>Ανιχνευτής</i>	<i>Γεωμετρία</i>	<i>Χρόνος συλλογής (sec)</i>
MS502A	11/2.289	2	5	345600
MS503A	11/2.291	2	5	345600
MS504A	11/2.293	2	5	345600
MS505A	11/2.295	2	5	345600
MS506A	11/3.64	2	5	345600
MS507A	11/3.67	2	5	345600
MS508A	11/3.69	2	5	345600
MS509A	11/3.71	2	5	345600
MS502B	11/3.66	3	5	345600
MS503B	11/3.68	3	5	345600
MS504B	11/3.70	3	5	345600
MS505B	11/3.72	3	5	345600
MS506B	14/6.285	3	5	345600
MS507B	11/3.76	3	5	345600
MS508B	11/3.78	3	5	345600
MS509B	16/0.3	3	5	345600

Πίνακας 4-4: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$

$^{137}\text{Cs}$		
<i>Φάσμα</i>	<i>R</i>	<i>s<sub>R</sub></i>
	<i>(Bq/kg)</i>	<i>(Bq/kg)</i>
MS502A	1.20	0.19
MS503A	10.45	0.36
MS504A	10.64	0.38
MS505A	11.15	0.35
MS506A	11.85	0.34
MS507A	12.35	0.38
MS508A	14.29	0.43
MS509A	14.82	0.44

Πίνακας 4-5: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$

$^{40}\text{K}$		
<i>Φάσμα</i>	<i>R</i>	<i>s<sub>R</sub></i>
	<i>(Bq/kg)</i>	<i>(Bq/kg)</i>
MS502A	152.46	2.74
MS503A	295.50	4.34
MS504A	303.73	4.70
MS505A	295.50	4.24
MS506A	289.87	4.14
MS507A	296.50	4.56
MS508A	320.93	5.03
MS509A	329.39	5.12

Πίνακας 4-6: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ac}$

$^{228}\text{Ac}$		
Φάσμα	$R$	
	$(\text{Bq/kg})$	$s_R$ $(\text{Bq/kg})$
MS502A	12.29	0.85
MS503A	26.51	1.33
MS504A	24.39	1.41
MS505A	25.97	1.26
MS506A	25.39	1.22
MS507A	26.07	1.35
MS508A	28.55	1.51
MS509A	30.11	1.56

Πίνακας 4-7: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^7\text{Be}$

$^7\text{Be}$				
Φάσμα	$t$	$R (\text{Bq/kg})$		$s$
	$(d)$	Μέτρηση	Δειγματοληψία	$(\text{Bq/kg})$
MS502A	23	<2.5	<3.3	-
MS503A	24	<4.0	<5.5	-
MS504A	30	<4.2	<6.3	-
MS505A	35	<3.8	<5.9	-
MS506A	39	6.46	10.71	3.54
MS507A	49	7.27	13.73	4.45
MS508A	53	6.28	12.49	5.24
MS509A	57	<4.6	<9.7	-

Πίνακας 4-8: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$

$^{210}\text{Pb}$		
Φάσμα	$R$ (Bq/kg)	$s_R$ (Bq/kg)
MS502B	14.53	1.89
MS503B	64.27	2.62
MS504B	78.46	2.74
MS505B	78.83	2.58
MS506B	91.12	2.59
MS507B	102.83	2.80
MS508B	101.94	2.997
MS509B	92.51	2.934

Πίνακας 4-9: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$

$^{234}\text{Th}$		
Φάσμα	$R$ (Bq/kg)	$s_R$ (Bq/kg)
MS502B	14.26	1.83
MS503B	20.12	2.51
MS504B	14.62	2.62
MS505B	20.79	2.42
MS506B	19.84	2.40
MS507B	17.7	2.55
MS508B	24.7	2.81
MS509B	27.12	2.81

**Πίνακας 4-10: Αποτελέσματα ελέγχου βάση του u-score - Σύγκριση ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$**

Ζεύγος φασμάτων	Συγκρινόμενα κοκκομετρικά κλάσματα	Μεταβλητή Σύγκρισης $u$		
		$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$
MS502A-MS503A	(> 2 mm) - (1 – 2 mm)	-22.44	-27.87	-9.02
MS503A-MS504A	(1 – 2 mm) - (0.5 – 1 mm)	-0.35	-1.29	1.10
MS404A-MS505A	(0.5 – 1 mm) - (0.25 – 0.5 mm)	0.94	1.30	-0.84
MS505A-MS506A	(0.25 – 0.5 mm) - (0.125 – 0.25 mm)	-3.47	0.95	0.33
MS506A-MS507A	(0.125 – 0.25 mm) - (0.63 – 0.125 mm)	-0.99	-1.08	-0.37
MS507A-MS508A	(0.63 – 0.125 mm) - (0.45 – 0.63 mm)	-3.40	-3.60	-1.22
MS508A-MS509A	(0.45 – 0.63 mm) - (< 0.45 mm)	-0.87	-1.18	-0.72

**Πίνακας 4-11: Αποτελέσματα ελέγχου βάση του u-score - Σύγκριση ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$**

Ζεύγος φασμάτων	Συγκρινόμενα κοκκομετρικά κλάσματα	Μεταβλητή Σύγκρισης $u$	
		$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
MS502B-MS503B	(> 2 mm) - (1 – 2 mm)	-14.40	-1.89
MS503B-MS504B	(1 – 2 mm) - (0.5 – 1 mm)	-3.74	1.52
MS404B-MS505B	(0.5 – 1 mm) - (0.25 – 0.5 mm)	-0.10	-1.73
MS505B-MS506B	(0.25 – 0.5 mm) - (0.125 – 0.25 mm)	-3.37	0.28
MS506B-MS507B	(0.125 – 0.25 mm) - (0.63 – 0.125 mm)	-3.07	0.61
MS507B-MS508B	(0.63 – 0.125 mm) - (0.45 – 0.63 mm)	0.22	-1.85
MS508B-MS509B	(0.45 – 0.63 mm) - (< 0.45 mm)	34.01	8.80

Πίνακας 4-12: Σύγκριση ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$  δείγματος ΙΑΕΑ 327 για γεωμετρία 2 και 5

	<i>Γεωμετρία 2</i>		<i>Γεωμετρία 5</i>	
	<i>R</i>	<i>σ</i>	<i>R</i>	<i>σ</i>
	<i>(Bq/kg)</i>	<i>(Bq/kg)</i>	<i>(Bq/kg)</i>	<i>(Bq/kg)</i>
Προτεινόμενη τιμή	24.9	0.15	24.9	0.15
Ανάλυση ΔΔ Καραάγγελου	23.5	0.65	26.2	0.99
Ανάλυση Μάρτη 2010	25.2	0.33	26.4	0.40

Πίνακας 4-13: Σύγκριση ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$  δείγματος ΙΑΕΑ 327 για γεωμετρία 2 και 5

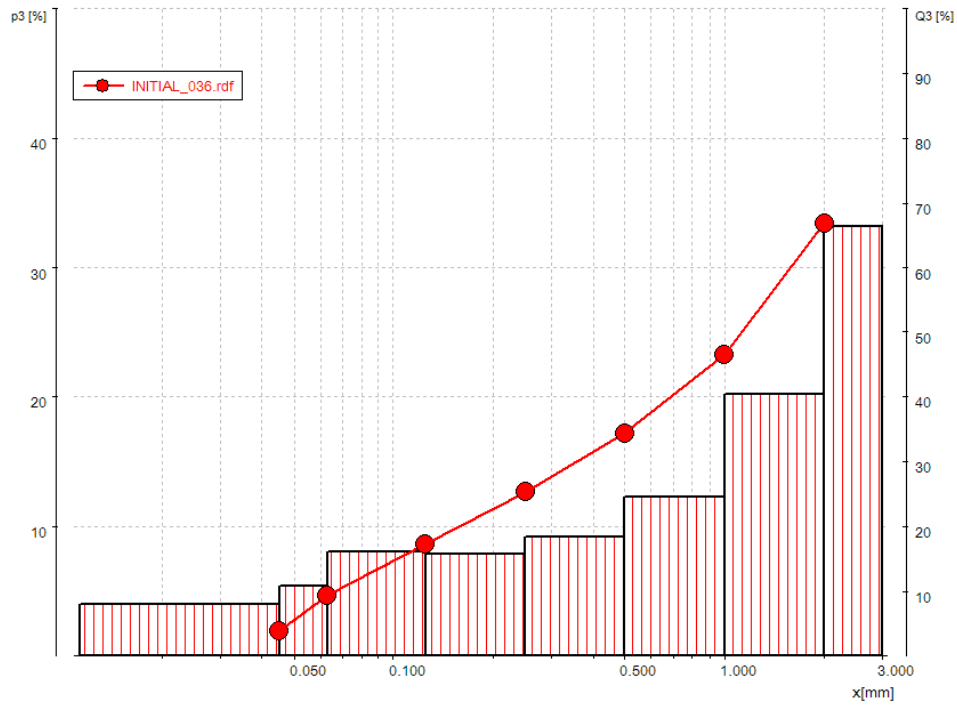
	<i>Γεωμετρία 2</i>		<i>Γεωμετρία 5</i>	
	<i>R</i>	<i>σ</i>	<i>R</i>	<i>σ</i>
	<i>(Bq/kg)</i>	<i>(Bq/kg)</i>	<i>(Bq/kg)</i>	<i>(Bq/kg)</i>
Προτεινόμενη τιμή	621	4.6	621	4.6
Ανάλυση ΔΔ Καραάγγελου	600	17.0	660	21.0
Ανάλυση Μάρτη 2010	619	3.7	616	4.9

Πίνακας 4-14: Αποτελέσματα ελέγχου βάσει του u-score - Σύγκριση ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  σε γεωμετρία 2 και 5

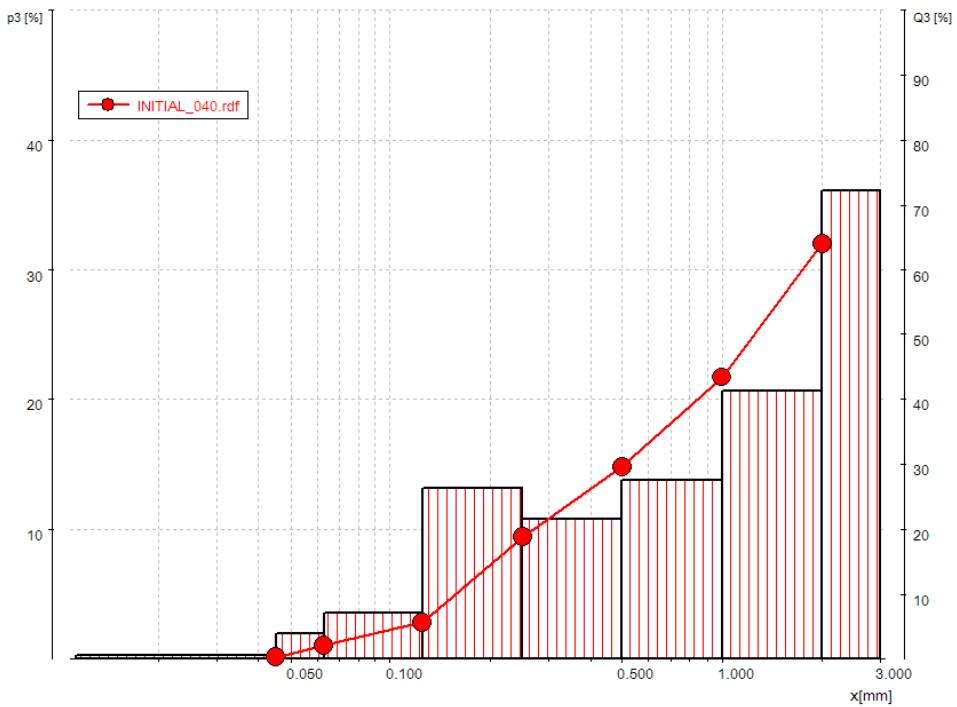
Ισότοπο	Μεταβλητή σύγκρισης u
$^{137}\text{Cs}$	1.58
$^{40}\text{K}$	0.37

## Σχήματα κεφαλαίου

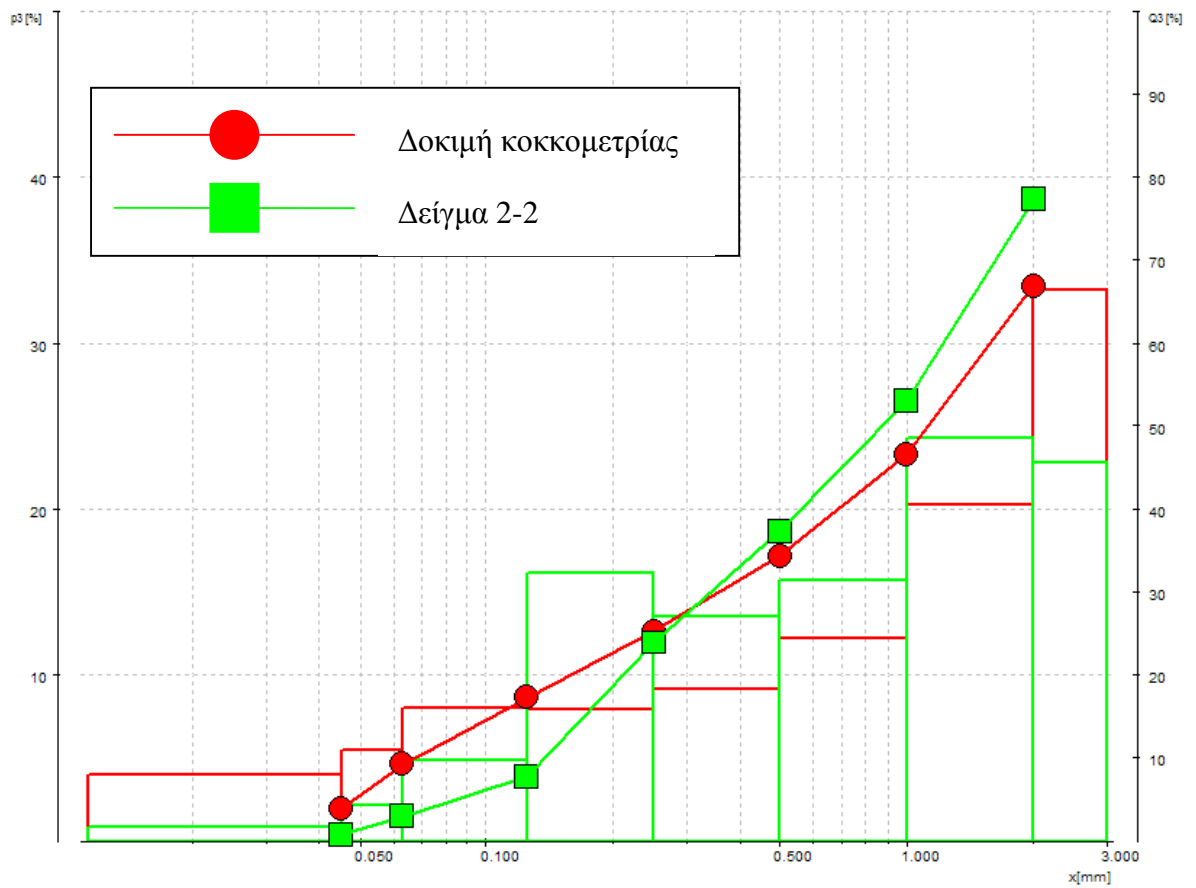
Σχήμα 4-1: Δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης – 1<sup>η</sup> επανάληψη



Σχήμα 4-2: Ανάλυση κοκκομετρίας – Δείγμα 2-2

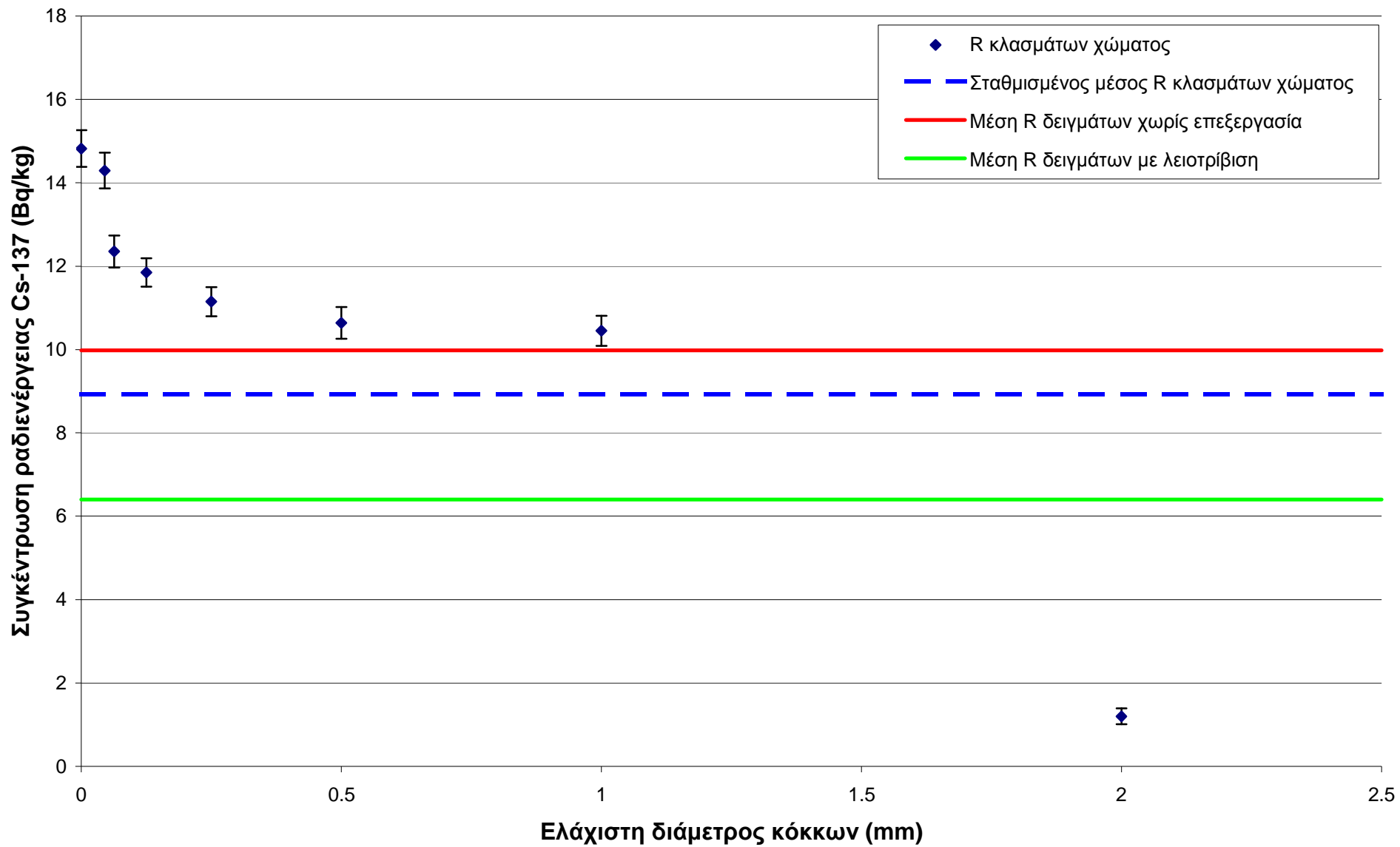


Σχήμα 4-3: Σύγκριση διαγραμμάτων δοκιμής κοκκομετρικής ανάλυσης και πειράματος επίδρασης της κοκκομετρίας στη συγκέντρωση ραδιενέργειας

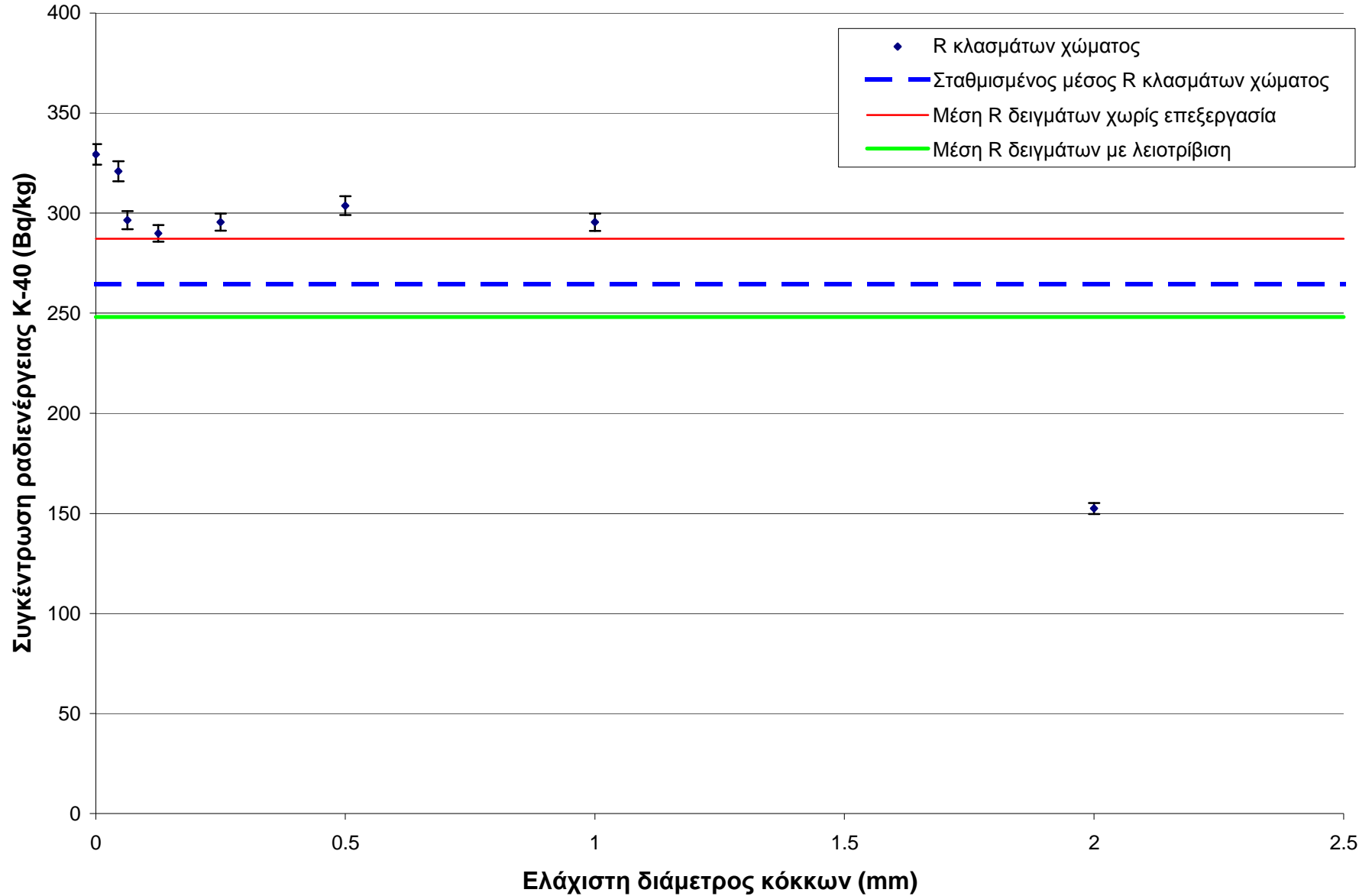




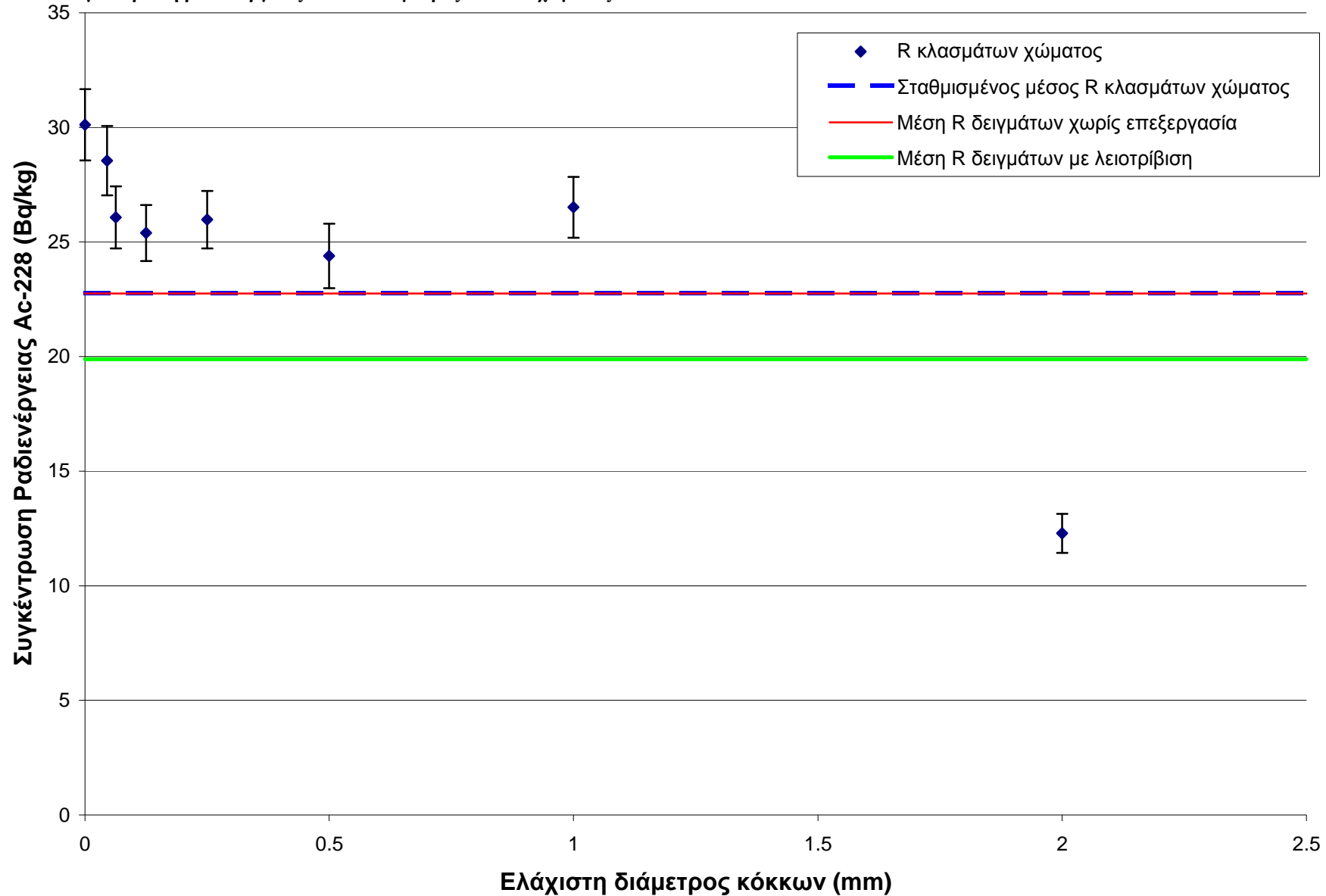
Σχήμα 4-4: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος



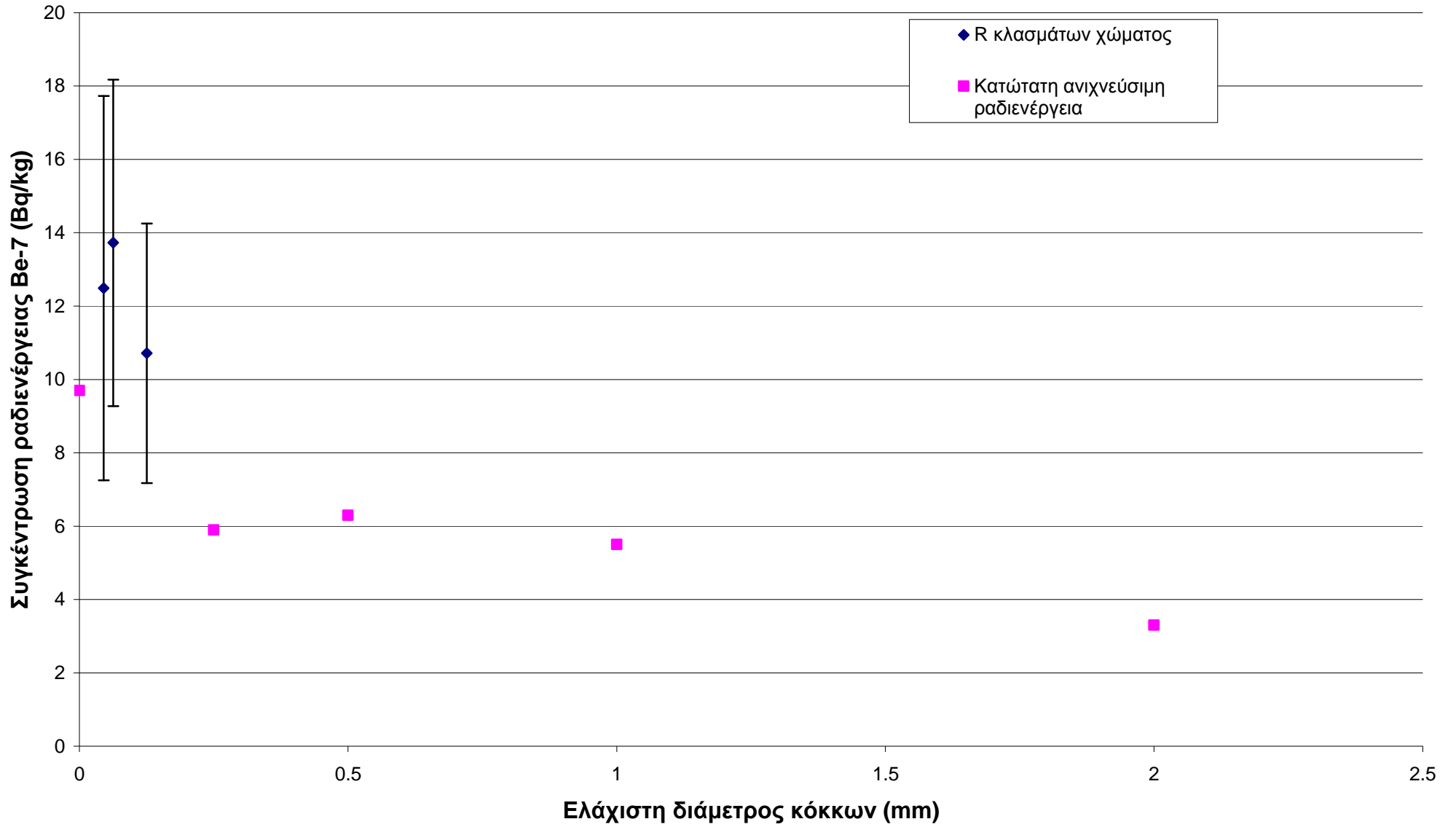
Σχήμα 4-5: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος



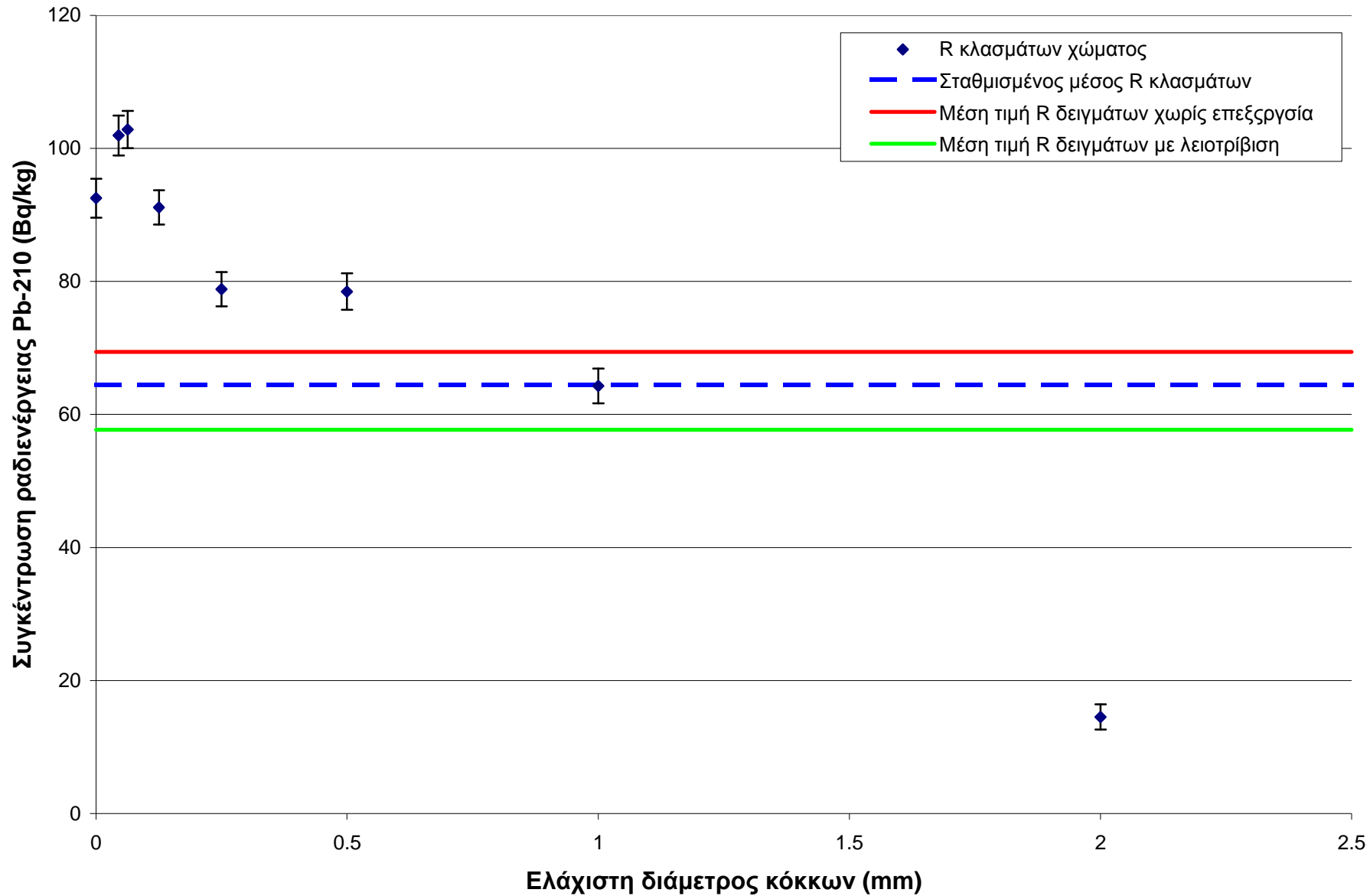
Σχήμα 4-6: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ac}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος



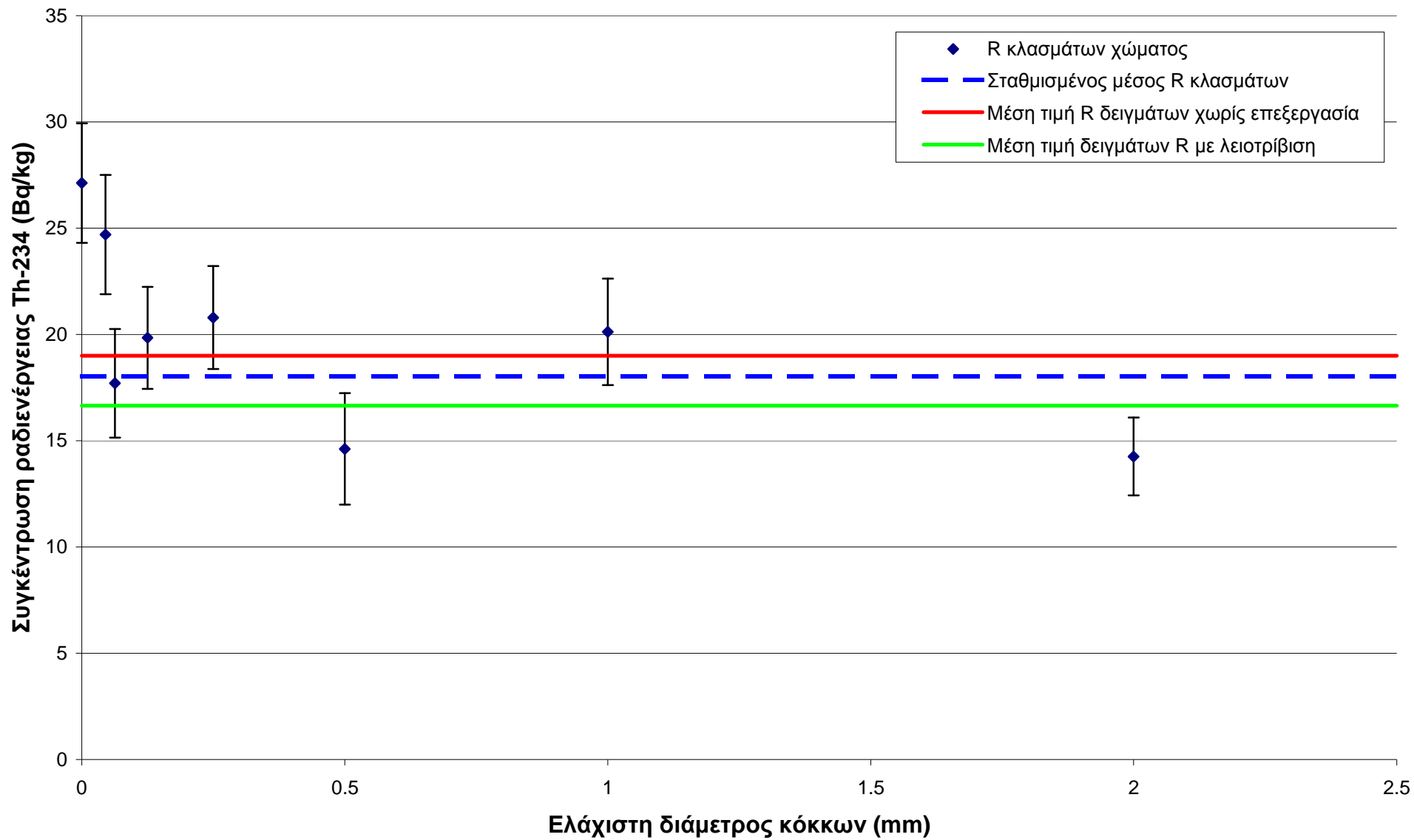
Σχήμα 4-7: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^7\text{Be}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος



Σχήμα 4-8: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$  – Διάμετρος κόκκων χόματος



Σχήμα 4-9: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$  – Διάμετρος κόκκων χόματος



## 5 Κοκκομετρική και γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χώματος από την περιοχή της Μεγαλόπολης

### 5.1 Εισαγωγή

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά παραδείγματα διερεύνησης, με σκοπό τη διαπίστωση ενδεχόμενης αύξησης της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του εδάφους, σε περιοχές που γειτνιάζουν με θερμικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως καύσιμο άνθρακα. Δεδομένου ότι το συγκεκριμένο θέμα είναι ιδιαίτερα σύνθετο και εξαρτάται από μεγάλο πλήθος παραγόντων, οι διάφορες έρευνες δεν έχουν καταλήξει σε ένα κοινό συμπέρασμα. Τα εκάστοτε αποτελέσματα για την απόθεση της ιπτάμενης τέφρας και την επακόλουθη αύξηση της ραδιενέργειας του εδάφους διαφέρουν, ανάλογα με τον υπό μελέτη σταθμό και το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Συγκεκριμένα, από τη βιβλιογραφία φαίνεται ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες που επιδρούν στη μετρούμενη απόθεση είναι η θερμική ισχύς, τα χρόνια λειτουργίας και τα συστήματα κατακράτησης τέφρας του σταθμού, καθώς και η ποιότητα του καυσίμου και η περιεκτικότητά του σε φυσικά ραδιενεργά ισότοπα. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων ερευνών παρουσιάζονται σύντομα στη συνέχεια, στην Παράγραφο 5.2.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο μελετήθηκε η μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$  στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του χώματος. Διαπιστώθηκε ότι το πλέον χονδρόκοκκο κλάσμα ( $> 2 \text{ mm}$ ) έχει σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας από τα υπόλοιπα κλάσματα, για όλα τα υπό μελέτη ισότοπα. Ακόμα, παρατηρήθηκε τάση αύξησης της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στο πιο λεπτόκοκκο κλάσμα, με μέγιστη συγκέντρωση ραδιενέργειας στα κλάσματα 45 – 125  $\mu\text{m}$ .

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογίας ανάλυσης χωμάτων που παρουσιάστηκε στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, σε δείγματα χώματος που συλλέχθηκαν από την περιοχή της λεκάνης της Μεγαλόπολης. Ζητούμενο ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο η μεθοδολογία αυτή μπορεί να βοηθήσει στη μελέτη της ενδεχόμενης αύξησης της συγκέντρωσης ραδιενέργειας, σε περιοχές κοντά σε θερμικούς σταθμούς. Στις περιοχές αυτές, τα λεπτόκοκκα κλάσματα του χώματος αναμένεται να έχουν αυξημένη συγκέντρωση ραδιενέργειας, λόγω της

ιπτάμενης τέφρας που διαφεύγει από τα εργοστάσια και επικάθεται στο έδαφος. Υπό την προϋπόθεση ότι η διαφορά αυτή είναι μετρήσιμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνουν εκτιμήσεις της επιβάρυνσης της περιοχής λόγω της λειτουργίας του θερμικού σταθμού.

## **5.2 Μελέτες απόθεσης ραδιοϊσοτόπων στην περιοχή θερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής**

Τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλουν ως προς τη σύσταση, τη θερμογόνο ικανότητα και τα επίπεδα της υγρασίας. Επιπλέον, περιέχουν ισότοπα της σειράς του ουρανίου, του θορίου και του ακτινίου, καθώς και  $^{40}\text{K}$ , σε συγκεντρώσεις που διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την περιοχή και την ποιότητά τους. Περισσότερες πληροφορίες για την κύμανση των επιπέδων ραδιενέργειας σε ορυκτά καύσιμα διαφορετικής προέλευσης παρέχονται στη συγκριτική μελέτη για τη ραδιενέργεια που σχετίζεται με θερμικούς σταθμούς (Tadmor 1986).

Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι στην ιπτάμενη τέφρα, δηλαδή στα κατάλοιπα της καύσης του άνθρακα που διαφεύγουν προς την καμινάδα, υπάρχει σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας σε σχέση με τη ραδιενέργεια του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, ιδιαίτερα για τα ισότοπα  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{210}\text{Pb}$ . Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι στα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα της τέφρας η συγκέντρωση ραδιενέργειας των ισοτόπων αυτών είναι ακόμα πιο αυξημένη (Tadmor 1986). Το γεγονός αυτό ενδεχομένως οφείλεται στο ότι τα παραπάνω ισότοπα εξαερώνονται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της καύσης και στη συνέχεια συμπυκνώνονται όταν έρχονται σε επαφή με τα πιο κρύα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας και επικάθονται σε αυτά. Όμως, τα λεπτόκοκκα σωματίδια έχουν μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια με αποτέλεσμα να εμφανίζουν πιο γρήγορη μείωση της θερμοκρασίας τους σε σχέση με τα χονδρόκοκκα. Επίσης, η μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια των λεπτόκοκκων σωματιδίων καθιστά πιθανότερη τη συμπύκνωση των ισοτόπων σε αυτά.

Η ποσότητα της ιπτάμενης τέφρας που διαφεύγει από τις καμινάδες ενός θερμικού σταθμού ποικίλλει σημαντικά, ανάλογα με την ποιότητα των συστημάτων κατακράτησης των αέριων ρύπων που διαθέτει το κάθε εργοστάσιο, αλλά και με τη θερμική ισχύ του. Θεωρώντας καύσιμο με μια μέση συγκέντρωση σε  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$ , δηλαδή 1 – 2 ppm  $^{238}\text{U}$  και 3 – 5 ppm  $^{232}\text{Th}$  αντίστοιχα, έχει εκτιμηθεί ότι ο



προβλεπόμενος ρυθμός εκροής για το  $^{238}\text{U}$  κυμαίνεται μεταξύ  $7.5 \cdot 10^5$  και  $1.5 \cdot 10^6$  Bq ανά παραγόμενο MWe το χρόνο (Tadmor 1986).

Η ιπτάμενη τέφρα στη συνέχεια αποτίθεται στο έδαφος της ευρύτερης περιοχής του εργοστασίου, είτε λόγω βαρύτητας είτε μέσω των κατακρημνισμάτων. Οι μέχρι τώρα μελέτες δεν έχουν καταλήξει σε ένα κοινό συμπέρασμα σχετικά με τη ραδιολογική επιβάρυνση των περιοχών που γειτνιάζουν με θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας της απόθεσης ραδιενεργών ισοτόπων της ιπτάμενης τέφρας. Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένες χαρακτηριστικές τέτοιες ερευνητικές εργασίες.

### 5.2.1 Περιοχή Langerlo στο Βέλγιο

Οι Zeenaert, Sweeck, και Vanmarcke μελέτησαν την περιοχή Langerlo στο Βέλγιο, όπου λειτουργεί επί 70 χρόνια θερμικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ισχύ 500 MW (Zeenaert 2006). Το εργοστάσιο είναι εξοπλισμένο με σύγχρονα συστήματα κατακράτησης ιπτάμενης τέφρας με υψηλή απόδοση, της τάξης του 99.5%.

Το εργοστάσιο χρησιμοποιεί διάφορους τύπους άνθρακα. Η μέση τιμή της συγκέντρωσης  $^{226}\text{Ra}$  στον άνθρακα έχει εκτιμηθεί ίση με 20 Bq/kg, ενώ, η συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  στην ιπτάμενη τέφρα, μετά τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, εκτιμήθηκε ίση με 700 Bq/kg.

Οι διάφοροι υπολογισμοί έγιναν βάση θεωρητικών μοντέλων για τη μεταφορά και απόθεση του πλουμίου του σταθμού. Ως χώρος αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ένα πεδίο 40 km x 40 km, με κέντρο το εργοστάσιο. Κατά τους υπολογισμούς θεωρήθηκε ότι η συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  στην ιπτάμενη τέφρα που διαφεύγει από το εργοστάσιο είναι 700 Bq/kg.

Από τους υπολογισμούς προέκυψε ότι η μέγιστη ετήσια ολική απόθεση  $^{226}\text{Ra}$  είναι  $1.5 \text{ mBq/m}^2$ . Η ολική, κατά τα 70 χρόνια λειτουργίας, επιβάρυνση στη συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  στο επιφανειακό χώμα (root zone) εκτιμήθηκε ίση με  $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ Bq/m}^3$ .

Η εξαιρετικά χαμηλή τιμή που προκύπτει για την απόθεση του  $^{226}\text{Ra}$ , ενδεχομένως σχετίζεται με τους ακόλουθους παράγοντες:

- Ο χρησιμοποιούμενος άνθρακας έχει πολύ χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας.

- Το εργοστάσιο είναι εξοπλισμένο με σύγχρονα συστήματα κατακράτησης ρύπων.
- Η απόθεση έχει υπολογιστεί για μια πολύ μεγάλη έκταση γύρω από το εργοστάσιο. Στα όρια της υπό μελέτη περιοχής ενδεχομένως να μην υπάρχει καμία επίδραση από την ιπτάμενη τέφρα του εργοστασίου, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η εκτίμηση της απόθεσης για τις πιο κοντινές στο εργοστάσιο περιοχές.

### 5.2.2 Περιοχή Lodz στη Πολωνία

Οι Bem, Wiczorkowski, και Budzanowski μελέτησαν την περιοχή Lodz, στην Πολωνία (Bem 2002). Εκεί λειτουργούν επί 40 χρόνια τρεις μεγάλοι θερμικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας, καθώς και αρκετοί ακόμα μικρότεροι σε θερμική ισχύ. Πολλά από τα μικρά εργοστάσια λειτουργούν χωρίς κανένα σύστημα κατακράτησης αέριων ρύπων, ενώ και τα μεγάλα εργοστάσια διαθέτουν συστήματα κατακράτησης με πολύ χαμηλό βαθμό απόδοσης.

Τα εργοστάσια χρησιμοποιούν άνθρακα, του οποίου η μέση συγκέντρωση σε  $^{226}\text{Ra}$  κυμαίνεται μεταξύ 15.3 - 22.9 Bq/kg. Η μέση συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  στην ιπτάμενη τέφρα κυμαίνεται μεταξύ 85.6 - 104.2 Bq/kg.

Για τις ανάγκες της μελέτης λήφθηκαν δείγματα 0.5 kg από τον άνθρακα, τη σκωρία, την ιπτάμενη τέφρα και το χώμα της γύρω περιοχής. Η δειγματοληψία του χώματος πραγματοποιήθηκε σε βάθος έως 30 cm.

Υπολογίστηκε ο λόγος της ραδιενέργειας του  $^{226}\text{Ra}$  στο επιφανειακό χώμα (0 – 10 cm) προς τη ραδιενέργεια στο βάθος των 20 – 30 cm. Ο λόγος αυτός υπολογίστηκε ίσος με  $1.19 \pm 0.06$ . Συνεπώς, στο επιφανειακό χώμα η συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  φαίνεται να είναι σημαντικά αυξημένη σε σχέση με το χώμα που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως θα μπορούσε να εξηγηθεί από την απόθεση  $^{226}\text{Ra}$  που διαφεύγει από τους θερμικούς σταθμούς της περιοχής.

Η ετήσια απόθεση  $^{226}\text{Ra}$  στην περιοχή έχει μειωθεί πολύ τα τελευταία χρόνια, λόγω της χρήσης καλύτερης ποιότητας καυσίμου και της εγκατάστασης καλύτερης ποιότητας συστημάτων κατακράτησης αέριων ρύπων. Εκτιμώντας μια μέση τιμή της ετήσιας απόθεσης του  $^{226}\text{Ra}$  ίση με 80 mBq/kg επιφανειακού χώματος, εκτιμήθηκε η ολική, κατά τα 40 χρόνια λειτουργίας, επιβάρυνση στη συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  ίση με 3.2 Bq/kg επιφανειακού χώματος.

### 5.2.3 Περιοχή Ajka στην Ουγγαρία

Πολύ δυσμενέστερα είναι τα αποτελέσματα στα οποία καταλήγουν οι Papp, Dezso και Daroczy, οι οποίοι μελέτησαν την περιοχή της πόλης Ajka, στην Ουγγαρία, όπου λειτουργεί από το 1943 θερμικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Papp 2002). Κατά την αρχή της λειτουργίας του, ο θερμικός σταθμός είχε ισχύ 54 MW, ενώ σήμερα, με το κτίσιμο και νέων μονάδων έχει ισχύ 154 MW. Μέχρι και το 1995 το σύστημα κατακράτησης ιπτάμενης τέφρας είχε πολύ χαμηλή απόδοση, μικρότερη από 95%, ενώ σήμερα πλέον η απόδοση είναι 99.85%.

Ο σταθμός χρησιμοποιεί άνθρακα από γειτονικό ορυχείο, το οποίο έχει ιδιαίτερα υψηλή συγκέντρωση  $^{238}\text{U}$  και  $^{226}\text{Ra}$ . Σήμερα, η συγκέντρωση του  $^{238}\text{U}$  κυμαίνεται μεταξύ 300 – 500 Bq/kg, ενώ τη δεκαετία του '50 είχε ακόμα υψηλότερες τιμές (800 – 900 Bq/kg). Η σημερινή συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  στην ιπτάμενη τέφρα μετρήθηκε ίση με 1400 Bq/kg.

Στα πλαίσια της έρευνας αυτής λήφθηκαν δείγματα χώματος από 81 σημεία γύρω από το εργοστάσιο. Σε 38 σημεία λήφθηκαν δείγματα βάθους με χρήση δύο μεταλλικών κυλινδρικών εργαλείων, μήκους 14 και 25 cm αντίστοιχα, τα οποία στη συνέχεια χωρίστηκαν σε ισοπαχή στρώματα. Από τα υπόλοιπα σημεία η δειγματοληψία έγινε με φτυάρι, σε βάθος 0 – 20 cm. Σε δύο σημεία λήφθηκε και χώμα από βάθος 1 - 1.5 m.

Βάση των τιμών της συγκέντρωσης ραδιενέργειας από τα βαθύτερα στρώματα υπολογίστηκαν τα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας της περιοχής. Συγκρίνοντας με την συγκέντρωση  $^{226}\text{Ra}$  στο χώμα βάθους, εκτιμήθηκε ότι η μέση αύξηση της ραδιενέργειας του  $^{226}\text{Ra}$  στο επιφανειακό χώμα, εξαιτίας της λειτουργίας του σταθμού, είναι 108 Bq/kg.

Η ολική, καθ' όλα τα χρόνια λειτουργίας, επιβάρυνση στη συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  εκτιμήθηκε ίση με 5.8 kBq/m<sup>2</sup>.

### 5.2.4 Περιοχή της Πτολεμαΐδας στην Ελλάδα

Οι Παπαστεφάνου, Μανωλοπούλου και Χαραλάμπους μελέτησαν την κοιλάδα της Πτολεμαΐδας (Papastefanou 1988). Στην περιοχή λειτουργούν τρεις θερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούν λιγνίτη της περιοχής. Οι σταθμοί της Καρδιάς και του Αγ. Δημητρίου έχουν συνολική θερμική ισχύ 1200 MW ο καθένας, ενώ ο σταθμός της Πτολεμαΐδας έχει συνολική θερμική ισχύ 620 MW. Τα

ηλεκτροστατικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται για την κατακράτηση της ιπτάμενης τέφρας είχαν κατά την εποχή της έρευνας απόδοση 98%.

Κατά τη μέτρηση του  $^{226}\text{Ra}$  στον ατμοσφαιρικό αέρα είχε προκύψει ότι η τιμή της συγκέντρωσής του ήταν  $0.078 \text{ mBq/m}^3$ , τιμή διπλάσια από τιμή αναφοράς που δίνεται στη βιβλιογραφία ( $0.037 \text{ mBq/m}^3$ ).

Στα πλαίσια της ίδιας έρευνας πραγματοποιήθηκε και δειγματοληψία συνολικά 55 δειγμάτων επιφανειακού χώματος (σε βάθος 0 – 5 cm). Η συγκέντρωση της ειδικής ραδιενέργειας στα δείγματα αυτά κυμαινόταν από 50 έως 940 Bq/kg (με μέση τιμή 200 Bq/kg).

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει πραγματοποιήσει εκτεταμένη δειγματοληψία επιφανειακού χώματος στην ευρύτερη περιοχή της Πτολεμαΐδας και σε όλη την Ελλάδα. Από τη φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων αυτών προέκυψε ραδιομετρικός χάρτης για τη συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$ , ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1 (Anagnostakis 1996). Η μέση τιμή ραδιενέργειας  $^{226}\text{Ra}$  των δειγμάτων της Ελλάδας εκτιμήθηκε σε  $25 \pm 19 \text{ Bq/kg}$ , ενώ σε τρεις πολύ εντοπισμένες περιοχές στην ευρύτερη περιοχή της Πτολεμαΐδας ανιχνεύτηκαν συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 100 Bq/kg.

### **5.2.5 Περιοχή της Μεγαλόπολης στην Ελλάδα**

Στην περιοχή της Μεγαλόπολης λειτουργούν δύο θερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σταθμός Α αποτελείται από τρεις μονάδες, έχει ισχύ 600 MW και λειτουργεί από τις αρχές του 1970. Ο σταθμός Β αποτελείται από μία μονάδα, έχει ισχύ 300 MW και λειτουργεί από τις αρχές του 1990. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται για την κατακράτηση της ιπτάμενης τέφρας έχουν θεωρητικά απόδοση 99.6%, στην πραγματικότητα, όμως, η απόδοση είναι 95 - 96% (Papaefthymiou 2005). Ο σταθμός χρησιμοποιεί λιγνίτη χαμηλής θερμικής ικανότητας, ο οποίος εξορύσσεται από κοιτάσματα της περιοχής. Η μέση συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  στο λιγνίτη της περιοχής έχει υπολογιστεί ίση με  $348 \pm 29 \text{ Bq/kg}$ . Η αντίστοιχη συγκέντρωση για την ιπτάμενη τέφρα έχει υπολογιστεί ίση με  $905 \pm 78 \text{ Bq/kg}$  (Rouni 2001). Η περιοχή της Μεγαλόπολης έχει μελετηθεί πολλές φορές από τους Έλληνες ερευνητές. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι ακόλουθες μελέτες.

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει πραγματοποιήσει εκτεταμένη μελέτη της ευρύτερης περιοχής της Μεγαλόπολης. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν 25 θέσεις δειγματοληψίας σε ακτίνα

10 km από τα εργοστάσια. Από κάθε θέση λήφθηκε δείγμα επιφανειακού χώματος (0 – 1 cm), καθώς και δείγματα σε βάθος 0–20, 20–40, 40–60 και 60–80 cm για τη μελέτη της κατακόρυφης διακύμανσης της ραδιενέργειας. Τα ληφθέντα δείγματα αναλύθηκαν φασματοσκοπικά για την ανίχνευση των ισοτόπων  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$ . Ακόμα, σε κάθε θέση μετρήθηκε η εκροή του ραδονίου από την επιφάνεια του εδάφους, η συγκέντρωση του ραδονίου στο χώμα και στον αέρα, και η συγκέντρωση σωματιδίων στον αέρα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μέτρηση του ρυθμού δόσης εξαιτίας της ακτινοβολίας του εδάφους με χρήση φορητού δοσιμέτρου NaI. Από τα δεδομένα που προέκυψαν από τις αναλύσεις των δειγμάτων χαράχθηκαν ραδιομετρικοί χάρτες για τη συγκέντρωση των ισοτόπων  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  (Rouni 2001). Στο Σχήμα 5-2 παρουσιάζεται ενδεικτικά ο ραδιομετρικός χάρτης του  $^{226}\text{Ra}$ .

Οι Παπαευθυμίου, Κριτίδης, Ανούσης και Σαραφίδου μελέτησαν την περιοχή της Μεγαλόπολης (Papaefthymiou 2005). Στα πλαίσια της έρευνάς τους λαμβάνονταν μηνιαία δείγματα της ατμοσφαιρικής σκόνης από 5 σημεία στη Μεγαλόπολη και από 3 σημεία στην Πάτρα, με χρήση φίλτρων. Η δειγματοληψία διήρκεσε ένα χρόνο.

Συγκρίνοντας τις πειραματικές τιμές της απόθεσης στη Μεγαλόπολη και στην Πάτρα, εκτιμήθηκε ότι η ολική επιβάρυνση της περιοχής της Μεγαλόπολης σε  $^{238}\text{U}$  μόνο από το εργοστάσιο Α, κατά τα 30 χρόνια λειτουργίας του, είναι ίση με  $1.3 \text{ kBq/m}^2$ .

Στην υπό εκπόνηση ΔΔ του Ν. Παπαδόπουλου στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Παπαδόπουλος 2010), έχει γίνει μοντελοποίηση της διακίνησης και της απόθεσης των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Βάση των μοντέλων αυτών έχει εκτιμηθεί η μέγιστη και η μέση ετήσια απόθεση του  $^{226}\text{Ra}$ , συμπεριλαμβάνοντας και την επίδραση της βροχόπτωσης:

- Μέγιστη ετήσια απόθεση:  $7.88 \text{ Bq/m}^2$ .
- Μέση ετήσια απόθεση:  $0.38 \text{ Bq/m}^2$ .

### **5.3 Σχεδιασμός δειγματοληψίας χώματος στην περιοχή Μεγαλόπολης**

Όπως προαναφέρθηκε, στο παρόν πείραμα ζητούμενο ήταν η εφαρμογή της μεθόδου επεξεργασίας που περιγράφηκε στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο σε δείγματα επιφανειακού χώματος (0 – 1 cm) από την περιοχή της Μεγαλόπολης. Η επεξεργασία αυτή περιλαμβάνει κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος, συσκευασία του κάθε κλάσματος σε ένα ξεχωριστό υπο-δείγμα και φασματοσκοπική ανάλυση των υπο-δειγμάτων αυτών.

Λόγω του πολύ μεγάλου όγκου του αρχικού δείγματος που απαιτείται για τη διαδικασία αυτή, αποφασίστηκε και σε αυτήν την περίπτωση τα κοκκομετρικά κλάσματα να συσκευαστούν σε δοχεία γεωμετρίας 5. Βάση των δεδομένων του πειράματος μεταβολής της ραδιενέργειας ανά κοκκομετρικό κλάσμα, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.2, εκτιμήθηκε ότι κάθε αρχικό δείγμα πρέπει να έχει κατ' ελάχιστο νωπή μάζα ίση με 10 kg. Δεδομένου ότι ανάλογα με τη σύσταση του χώματος κάθε θέσης δειγματοληψίας μπορεί να διαφέρει σημαντικά και η κοκκομετρική κατανομή του, το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται ενδεικτικά και λόγω έλλειψης ακριβέστερων στοιχείων. Περαιτέρω αύξηση της μάζας του αρχικού δείγματος δεν ήταν πρακτικά δυνατή, τόσο λόγω δυσκολίας στη δειγματοληψία όσο και στη μεταφορά μεγάλου όγκου δειγμάτων από το πεδίο στο εργαστήριο.

Κατά το σχεδιασμό της δειγματοληψίας, εκτιμήθηκε ότι θα πρέπει, πέραν της δειγματοληψίας χώματος επιφανείας, να γίνει και δειγματοληψία χώματος βάθους από τα ίδια σημεία, προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση τόσο της κοκκομετρικής κατανομής τους, όσο και των επιπέδων ραδιενέργειάς τους. Η σύγκριση αυτή θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε συμπεράσματα για το κατά πόσον η αύξηση της ραδιενέργειας στα λεπτόκοκκα κλάσματα οφείλεται στην ιπτάμενη τέφρα η οποία έχει επικαθίσει στην περιοχή και δεν αποτελεί φυσιολογική κύμανση όπως παρατηρήθηκε στα κλάσματα χώματος του πειράματος του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου. Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητο για κάθε επιφανειακό δείγμα να ληφθεί και ένα αντίστοιχο δείγμα χώματος σε βάθος 10–20 cm από την ίδια θέση δειγματοληψίας, το οποίο να υποστεί την ίδια επεξεργασία.

Προκειμένου να υπάρχει μια όσο το δυνατόν ξεκάθαρη εικόνα της κύμανσης της ραδιενέργειας στην ευρύτερη περιοχή της Μεγαλόπολης, αποφασίστηκε η συλλογή 4 ζευγών επιφανειακών και σε βάθος δειγμάτων από τις ακόλουθες θέσεις:

- Θέση 1. Γεωγραφικό πλάτος 37.4475°, γεωγραφικό μήκος 22.0806°. Πρόκειται για θέση κοντά στο χωριό Κατσίμπαλης, όπου εμφανίζονται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας <sup>226</sup>Ra βάση της ίδιας χαρτογράφησης (Rouni 2001).
- Θέση 2. Γεωγραφικό πλάτος 37.4766°, γεωγραφικό μήκος 22.0494°. Πρόκειται για θέση κοντά στο χωριό Καρύταινα και ανήκει στην περιοχή της μεσαίας κλάσης ραδιενέργειας βάση της χαρτογράφησης της ραδιενέργειας

$^{226}\text{Ra}$  της περιοχής της Μεγαλόπολης που πραγματοποιήθηκε από το ΕΠΤ-ΕΜΠ (Rouni 2001).

- Θέση 3. Γεωγραφικό πλάτος  $37.4539^\circ$ , γεωγραφικό μήκος  $22.0379^\circ$ . Πρόκειται για θέση κοντά στο χωριό Κουρουνιός, όπου εμφανίζεται η υψηλότερη απόθεση  $^{226}\text{Ra}$  λόγω της ιπτάμενης τέφρας από τους σταθμούς της περιοχής, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν στα πλαίσια της υπό εκπόνηση ΔΔ του Ν. Παπαδόπουλου (Παπαδόπουλος 2010).
- Θέση 4. Γεωγραφικό πλάτος  $37.4169^\circ$ , γεωγραφικό μήκος  $22.0413^\circ$ . Πρόκειται για θέση κοντά στο χωριό Κάτω Καρυές, η οποία χρησιμοποιήθηκε σε παλαιότερες μελέτες του ΕΠΤ-ΕΜΠ ως θέση αναφοράς, καθώς το σημείο αυτό παρουσιάζει μέσα επίπεδα ραδιενέργειας.

Φυσικά, οι παραπάνω συντεταγμένες είναι ενδεικτικές. Η τελική επιλογή των ακριβών θέσεων δειγματοληψίας έγινε στο πεδίο, σε σημεία κοντά στις ανωτέρω τοποθεσίες που ήταν κατάλληλα για τη συλλογή του χώματος.

Τέλος, εκτός από τα δείγματα χώματος, αποφασίστηκε και η λήψη δείγματος ιπτάμενης τέφρας από το εργοστάσιο της Μεγαλόπολης, ώστε να υπάρχει μια εικόνα των σημερινών επιπέδων ραδιενέργειας της τέφρας που αποτίθεται στο έδαφος.

## **5.4 Δειγματοληψία**

Από την προηγούμενη μέρα της δειγματοληψίας καταγράφηκε σε μια λίστα όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός. Πριν τη δειγματοληψία συλλέχθηκαν όλα τα στοιχεία της λίστας και ελέγχθηκε η σωστή λειτουργία τους.

Η δειγματοληψία της Μεγαλόπολης πραγματοποιήθηκε στις 14/4/2010. Στο Παράρτημα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στοιχεία κάθε δειγματοληψίας, δηλαδή η ώρα και η θέση της δειγματοληψίας, οι συντεταγμένες της θέσης, τα ληφθέντα δείγματα και η νωπή τους μάζα κατά την επιστροφή στο εργαστήριο.

Στα περίχωρα της Μεγαλόπολης και πριν την άφιξη στο πεδίο ενεργοποιήθηκαν τα ατομικά δοσίμετρα Polimaster PM1621M και Polimaster PM1703M με στόχο τη συνεχή καταγραφή του ρυθμού δόσης και της συνολικής δόσης κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας.

### **5.4.1 Διαδικασία δειγματοληψίας**

Σε κάθε δειγματοληψία ακολουθήθηκε η ακόλουθη διαδικασία:

- Επιλέχθηκε η θέση δειγματοληψίας σε σημείο κοντά στις συντεταγμένες που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 5.3. Η θέση έπρεπε να πληροί τις προϋποθέσεις που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 2.4.2. Με GPS λήφθηκαν οι ακριβείς συντεταγμένες της θέσης. Ακόμα συμπληρώθηκε η φόρμα της δειγματοληψίας, στην οποία σχεδιάστηκε σκαρίφημα της θέσης δειγματοληψίας. Οι φόρμες δειγματοληψίας παρατίθενται στο Παράρτημα 2.
- Πραγματοποιήθηκε μέτρηση του ρυθμού δόσης λόγω εξωτερικής ακτινοβολίας με το φορητό δοσίμετρο NaI τύπου Victoreen Thyac V Model 190.
- Από την επιλεγμένη θέση αφαιρέθηκαν τα χορτάρια για τη συλλογή του επιφανειακού χώματος (0 – 1 cm). Η συλλογή έγινε με μικρό φτυάρι.
- Από το σημείο που λήφθηκε το επιφανειακό δείγμα αφαιρέθηκε το χώμα βάθους περίπου 10 cm. Στη συνέχεια, από βάθος 10 – 20 cm συλλέχθηκε το δεύτερο δείγμα κάθε θέσης.

Οι θέσεις κάθε δειγματοληψίας απεικονίζονται στο Σχήμα 5-3.

#### **5.4.1.1 Θέση 1<sup>η</sup> «Κατσίμπαλης»**

Η 1<sup>η</sup> δειγματοληψία στην περιοχή της Μεγαλόπολης (6<sup>η</sup> δειγματοληψία στα πλαίσια της ΔΕ) πραγματοποιήθηκε στη θέση «Κατσίμπαλης», με γεωγραφικό μήκος 37.4533 και γεωγραφικό πλάτος 22.0924, η οποία αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης συγκέντρωσης <sup>226</sup>Ra, βάση των αποτελεσμάτων της χαρτογράφησης του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Συλλέχθηκε το δείγμα επιφανειακού χώματος 6-1, στο σημείο όμως αυτό δεν ήταν δυνατή η συλλογή δείγματος σε βάθος, καθώς το έδαφος ήταν πολύ βραχώδες. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε διαφορετικό σημείο για τη δειγματοληψία, από όπου λήφθηκε με επιτυχία τόσο το επιφανειακό δείγμα, όσο και το δείγμα σε βάθος (6-2 και 6-3 αντίστοιχα). Πρέπει, όμως, να αναφερθεί ότι στο σημείο συλλογής των δειγμάτων στο έδαφος υπήρχαν ενδείξεις διαταραχής, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν για το επιφανειακό δείγμα. Η ένδειξη του δοσίμετρου NaI ήταν 75 nSv/hr.

#### **5.4.1.2 Θέση 2<sup>η</sup> «Δρόμος Κατσίμπαλη – Καρύταινα»**

Η 2<sup>η</sup> δειγματοληψία στην περιοχή της Μεγαλόπολης (7<sup>η</sup> δειγματοληψία στα πλαίσια της ΔΕ) πραγματοποιήθηκε στη θέση «Δρόμος Κατσίμπαλη – Καρύταινα», με



γεωγραφικό μήκος 37.4825 και γεωγραφικό πλάτος 22.0556, η οποία αντιστοιχεί στη μεσαία κλάση της χαρτογράφησης του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Η περιοχή είχε πολύ σκληρό χρώμα και έντονη βλάστηση, γεγονός που δυσχέραινε ιδιαίτερα τη συλλογή του επιφανειακού δείγματος (7-1). Για το λόγο αυτό, συλλέχθηκε μικρότερη ποσότητα χρώματος από την επιθυμητή. Από το ίδιο σημείο συλλέχθηκε χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες και το δείγμα σε βάθος (7-2). Η ένδειξη του δοσίμετρου NaI ήταν 95 nSv/hr

#### **5.4.1.3 Θέση 3<sup>η</sup> «Κουρουνιός»**

Η 3<sup>η</sup> δειγματοληψία στην περιοχή της Μεγαλόπολης (8<sup>η</sup> δειγματοληψία στα πλαίσια της ΔΕ) πραγματοποιήθηκε στη θέση «Κουρουνιός», με γεωγραφικό μήκος 37.4562 και γεωγραφικό πλάτος 22.0389, η οποία αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης επιβάρυνσης βάσει των αποτελεσμάτων της ΔΔ του Ν. Παπαδόπουλου (Παπαδόπουλος 2010). Η θέση που επιλέχθηκε βρισκόταν σε ύψωμα και η περιοχή ήταν ιδιαίτερα βραχώδης, χωρίς όμως αυτό να δημιουργήσει προβλήματα κατά τη συλλογή του επιφανειακού δείγματος (8-1) ή του δείγματος σε βάθος (8-2). Σε αυτήν τη θέση δεν λήφθηκε μέτρηση του υποστρώματος με το δοσίμετρο NaI.

#### **5.4.1.4 Θέση 4<sup>η</sup> «Καρυές προς Καστανοχώρι»**

Η 4<sup>η</sup> δειγματοληψία στην περιοχή της Μεγαλόπολης (9<sup>η</sup> δειγματοληψία στα πλαίσια της ΔΕ) πραγματοποιήθηκε στη θέση «Καρυές προς Καστανοχώρι», με γεωγραφικό μήκος 37.4177 και γεωγραφικό πλάτος 22.0406, η οποία αντιστοιχεί στην παλαιά θέση αναφοράς. Λόγω της ιδιαίτερα λεπτής υφής του χρώματος στην περιοχή, η συλλογή του επιφανειακού δείγματος (9-1) πραγματοποιήθηκε με μεγάλη ακρίβεια από το 1<sup>ο</sup> cm του εδάφους. Χωρίς προβλήματα συλλέχθηκε και το δείγμα σε βάθος (9-2). Η ένδειξη του δοσίμετρου NaI ήταν 100 nSv/hr

### **5.4.2 Δειγματοληψία ιπτάμενης τέφρας**

Στα πλαίσια της 14/4/2010, έγινε επίσκεψη και στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης Α, όπου λήφθηκε ένα δείγμα ιπτάμενης τέφρας, μάζας περίπου 4 kg από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα του σταθμού. Η δειγματοληψία έγινε από τους τεχνικούς του σταθμού και το δείγμα συσκευάστηκε σε μεταλλικό δοχείο.

### **5.4.3 Μετρήσεις δόσης**

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας έγινε δοσιμέτρηση με χρήση των φορητών ατομικών δοσιμέτρων PM1703M και PM1621M της Polimaster.

Το δοσίμετρο PM1703M ενεργοποιήθηκε στις 11:28 και απενεργοποιήθηκε στις 18:46, δηλαδή μέτρησε τη συνολική δόση ραδιενέργειας από την εξωτερική ακτινοβολία για συνολικά 7 ώρες και 18 λεπτά. Σε αυτό το χρονικό διάστημα έπαιρνε μέτρηση ανά δεκάλεπτο. Αθροίζοντας τις επιμέρους ενδείξεις του δοσιμέτρου υπολογίστηκε ότι η συνολική δόση για το διάστημα αυτό ήταν 0.43  $\mu\text{Sv}$ , δηλαδή εκτιμάται ο μέσος ρυθμός δόσης ίσος με 59  $\text{nSv h}^{-1}$ .

Το δοσίμετρο PM1621M, ενεργοποιήθηκε στις 10:45 και απενεργοποιήθηκε στις 18:51. Η συνολική δόση ραδιενέργειας από την εξωτερική ραδιενέργεια για το χρονικό διάστημα των 8 ωρών και 6 λεπτών ήταν 0.6  $\mu\text{Sv}$ , δηλαδή εκτιμάται ο μέσος ρυθμός δόσης ίσος με 74  $\text{nSv h}^{-1}$ .

Όπως αναφέρθηκε, από τις τρεις θέσεις δειγματοληψίας στις οποίες λήφθηκε μέτρηση του ρυθμού δόσης με το δοσίμετρο NaI εκτιμήθηκε δόση ραδιενέργειας μεταξύ 75 και 100  $\text{nSv/hr}$ . Συνεπώς, με πρόχειρη εκτίμηση μπορούμε να θεωρηθεί ότι η αντίστοιχη ολική δόση για ένα διάστημα 8 ωρών κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 0.7  $\mu\text{Sv}$ , κάτι που δεν απέχει από τη συνολική δόση που εκτιμήθηκε με τα φορητά προσωπικά δοσίμετρα τύπου Polimaster.

#### **5.4.4 Μετρήσεις ραδονίου**

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, καταγράφηκε η συγκέντρωση του  $^{222}\text{Rn}$  στον ατμοσφαιρικό αέρα στις τρεις πρώτες θέσεις δειγματοληψίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής ραδονίου τύπου AlphaGuard PQ2000Pro. Μετά την άφιξη στο εργαστήριο, οι συγκεντρώσεις διαβάστηκαν με σύνδεση του οργάνου με υπολογιστή. Οι μέσες τιμές της συγκέντρωσης που καταγράφηκε στις διάφορες θέσεις δειγματοληψίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1.

#### **5.5 Προκαταρκτική ανάλυση (screening) δειγμάτων**

Αμέσως μετά τη δειγματοληψία, από κάθε ένα από τα τέσσερα δείγματα επιφανειακού χώματος (6-2, 7-1, 8-1 και 9-1) συσκευάστηκε ένα πρόχειρο υπο-δείγμα γεωμετρίας 2 προκειμένου να γίνει μία προκαταρκτική δοκιμαστική μέτρηση (screening). Οι κωδικοί των δειγμάτων αυτών ήταν MS522, MS523, MS524 και MS525 αντίστοιχα. Τα δείγματα δεν είχαν υποστεί καμία επεξεργασία, ούτε αεροζήρανση, και η ανάλυση αυτή έγινε καθαρά για εποπτικούς λόγους. Επίσης, συσκευάστηκε το υπο-δείγμα PM004 από το δείγμα ιπτάμενης τέφρας. Στον Πίνακα

5-2 δίνονται τα βασικά στοιχεία κάθε δείγματος, δηλαδή ο κωδικός, τα επίπεδα υγρασίας, η ξηρή και η νωπή μάζα.

Τα δείγματα αναλύθηκαν στους ανιχνευτές HPGe και XtRa, με διάρκεια συλλογής φάσματος 3 hr κατ' ελάχιστο. Στον Πίνακα 5-3 δίνονται τα βασικά στοιχεία των πέντε ληφθέντων φασμάτων, δηλαδή ο ανιχνευτής, η διάρκεια συλλογής φάσματος, η γεωμετρία του δείγματος και η θέση αποθήκευσης του φάσματος στον κώδικα SPUNAL. Στους Πίνακες 5-4 έως 5-9 δίνονται οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$  για τα πέντε υπο-δείγματα. Στο υπο-δείγμα τέφρας PM004, όπως ήταν αναμενόμενο, δεν ανιχνεύθηκε  $^{137}\text{Cs}$  και  $^7\text{Be}$ . Τα υπο-δείγματα MS522 και MS524 αναλύθηκαν στον ανιχνευτή HPGe, και συνεπώς δεν προσδιορίστηκαν τα ισότοπα χαμηλών ενεργειών  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ . Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές ραδιενέργειας του  $^7\text{Be}$  έχουν αναχθεί στην ημερομηνία αναφοράς, δηλαδή την ημερομηνία της δειγματοληψίας (14/4/2010).

## **5.6 Επεξεργασία δειγμάτων**

### **5.6.1 Επιλογή δειγμάτων προς ανάλυση**

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία επεξεργασίας που έχει αναπτυχθεί στην παρούσα ΔΕ, από κάθε δείγμα πρέπει να συσκευαστεί 1 τουλάχιστον υπο-δείγμα από τη συνολική μάζα καθώς και 1 υπο-δείγμα από κάθε ένα από τα 8 κοκκομετρικά κλάσματα. Δηλαδή, από τα 8 ληφθέντα δείγματα θα προκύψουν τουλάχιστον  $(8+1) \times 8 = 72$  υπο-δείγματα, κάθε ένα από τα οποία πρέπει να αναλυθεί φασματοσκοπικά με ελάχιστη διάρκεια συλλογή φάσματος 1 ημέρας. Η εκτέλεση τόσο μεγάλου όγκου αναλύσεων δεν ήταν δυνατή σε εύλογο χρονικό διάστημα στα πλαίσια μιας ΔΕ, ακόμα και αν ήταν δυνατό να διατεθούν αποκλειστικά οι ανιχνευτικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Συνεπώς, λαμβάνοντας υπ' όψιν και τα αποτελέσματα του screening της Παραγράφου 5.5 επιλέχθηκε να αναλυθούν μόνο τα δείγματα επιφανειακού χώματος 8-1 και 9-1, τα οποία λήφθηκαν από τη θέση που αναμένεται η μέγιστη συγκέντρωση ραδιενέργειας βάσει των υπολογισμών της ΔΔ Παπαδόπουλου και από τη θέση αναφοράς αντίστοιχα. Αξιολογώντας και τα αποτελέσματα των αναλύσεων θα είναι δυνατή η κατάρτιση ενός μακροπρόθεσμου προγράμματος για την πλήρη ανάλυση των δειγμάτων που συλλέχθηκαν από την παρούσα ΔΕ στα πλαίσια μελλοντικής έρευνας.

### 5.6.2 Επεξεργασία δείγματος 8-1

Το δείγμα 8-1 υπέστη την ίδια επεξεργασία, όπως αυτή που περιγράφηκε στο πείραμα μεταβολής της ραδιενέργειας ανά κοκκομετρικό κλάσμα του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου. Πιο αναλυτικά, η διαδικασία περιελάμβανε τα ακόλουθα βήματα:

- Αεροζήρανση. Το δείγμα αφέθηκε να ξηρανθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Παρά το μεγάλο όγκο του δείγματος η αεροζήρανση διήρκεσε μόνο 5 μέρες, καθώς κατά τη συλλογή του το δείγμα είχε πολύ χαμηλά επίπεδα υγρασίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη σύσταση του χώματος της συγκεκριμένης περιοχής.
- Ομογενοποίηση. Το δείγμα εισήχθη σε πλαστικό βαρέλι και υπέστη ομογενοποίηση με περιστροφή του δοχείου, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 3.5.1.
- Στο σημείο αυτό, η διαδικασία της επεξεργασίας διακόπηκε για να συσκευαστεί ένα υπο-δείγμα χώματος γεωμετρίας 2 από το αρχικό δείγμα 8-1, ώστε να εκτιμηθεί μια ενδεικτική τιμή ραδιενέργειας της συνολικής ποσότητας του χώματος. Τα βασικά στοιχεία του υπο-δείγματος αυτού, που πήρε τον κωδικό MS534, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-10.
- Κοσκίνισμα. Το κοσκίνισμα πραγματοποιήθηκε στη μηχανή AS-200 Control, χρησιμοποιώντας τα κόσκινα με μέγεθος οπών 2 mm, 1 mm, 500 μm, 250 μm, 125 μm, 63 μm και 45 μm. Το χώμα κοσκινίστηκε ανά 1 kg, με πλάτος ταλάντωσης 2 mm, χωρίς διακοπή λειτουργίας.

Κατά το κοσκίνισμα της πρώτης ποσότητας του χώματος ελέγχθηκε η απαιτούμενη διάρκεια κοσκίνισματος, η οποία για το πείραμα μεταβολής της ραδιενέργειας ανά κοκκομετρικό κλάσμα είχε οριστεί ίση με 1 hr. Για τον έλεγχο αυτό, κατ' αρχήν ζυγίστηκε το κάθε κόσκινο. Στη συνέχεια, το χώμα κοσκινίστηκε για 1 hr και μετά κάθε κλάσμα ζυγίστηκε. Το κοσκίνισμα επαναλήφθηκε για 10 min και τα κλάσματα ζυγίστηκαν ξανά. Παρατηρήθηκε ότι η μείωση της μάζας κατά το τελευταίο δεκάλεπτο κοσκίνισματος ήταν μικρότερη από 5 gr για κάθε κλάσμα, συνεπώς το κριτήριο διακοπής της Παραγράφου 4.2.2.1 επαληθευόταν. Εξαιρέση αποτελούσε το πλέον χονδρόκοκκο κλάσμα, η μείωση του οποίου ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη. Τελικά, και για να μην γίνει ιδιαίτερα χρονοβόρα η

διαδικασία κοσκίνισματος, οι υπόλοιπες ποσότητες χώματος κοσκίνιστηκαν για 1 hr.

Από τη διαδικασία κοσκίνισματος προέκυψαν τα ποσοστά επί τοις εκατό της μάζας κάθε κλάσματος επί της ολικής μάζας που υπέστη κοσκίνισμα ( $P_i$ ). Τα ποσοστά αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-11.

- Θραύση του χονδρόκοκκου κλάσματος. Χρησιμοποιήθηκε ο θραυστήρας με σιαγόνες, τύπου BB51. Από το πιο χονδρόκοκκο κλάσμα λήφθηκε ποσότητα χώματος 500 gr και τοποθετήθηκε στο θραυστήρα. Η επεξεργασία διήρκεσε περίπου 5 λεπτά, ενώ το πλάτος της σχισμής μεταξύ των σιαγόνων ρυθμίστηκε στα 0.5 mm.
- Συσκευασία υπο-δειγμάτων. Από κάθε κλάσμα συσκευάστηκε ένα υπο-δείγμα γεωμετρίας 5. Τα βασικά στοιχεία των υπο-δειγμάτων, με κωδικούς MS535-MS542, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-10.
- Βάψιμο με ρητίνη. Για το βάψιμο των δειγμάτων γεωμετρίας 5 κόπηκαν κυκλικοί δίσκοι από PET (πολυαιθυλένιο) πάχους 1 mm, οι οποίοι τοποθετήθηκαν μέσα στα δοχεία, σε επαφή με το περιεχόμενο χώμα και σταθεροποιήθηκαν με σιλικόνη. Στη συνέχεια, τα δοχεία βάφτηκαν με σιλικόνη εσωτερικά και εξωτερικά. Πιο αναλυτικά η διαδικασία σφραγίσματος των δοχείων γεωμετρίας 5 περιγράφεται στην Παράγραφο 2.5.2.

### 5.6.3 Επεξεργασία δείγματος 9-1

Το δείγμα 9-1 υπέστη την ίδια επεξεργασία με το δείγμα 8-1, όπως αυτή περιγράφηκε στην Παράγραφο 5.6.2 . Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία περιελάμβανε τα ακόλουθα βήματα:

- Αεροξήρανση.
- Ομογενοποίηση.
- Στο σημείο αυτό, η διαδικασία της επεξεργασίας διακόπηκε. Από το δείγμα 9-1 συσκευάστηκε ένα υπο-δείγμα χώματος γεωμετρίας 2 και ένα υπο-δείγμα γεωμετρίας 5 ώστε να υπάρχει μια ενδεικτική τιμή ραδιενέργειας της συνολικής ποσότητας του χώματος. Τα βασικά στοιχεία

των υπο-δειγμάτων αυτών, που πήραν τους κωδικούς MS543 και MS544, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-12.

- Κοσκίνισμα. Το κοσκίνισμα πραγματοποιήθηκε στη μηχανή AS-200 Control, χρησιμοποιώντας τα κόσκινα με μέγεθος οπών 2 mm, 1 mm, 500 μm, 250 μm, 125 μm, 63 μm και 45 μm. Το χρώμα κοσκινίστηκε ανά 1 kg, επί 1 hr, με πλάτος ταλάντωσης 2 mm.

Κατά το κοσκίνισμα του δείγματος αυτού παρατηρήθηκε έντονα το φαινόμενο δημιουργίας συσσωματωμάτων στα κόσκινα των 125 και 250 μm. Πιο αναλυτική συζήτηση για το πρόβλημα αυτό έγινε στην Παράγραφο 4.2.2.3. Τελικά, για την αντιμετώπιση του προβλήματος, εφαρμόστηκε κοσκίνισμα με διακοπές λειτουργίας ανά 30 sec. Επίσης, πριν το κοσκίνισμα κάθε ποσότητας χρώματος τα κόσκινα καθαρίζονταν με προσοχή με πεπιεσμένο αέρα.

Από τη διαδικασία κοσκίνισματος προέκυψαν τα ποσοστά επί τοις εκατό της μάζας κάθε κλάσματος επί της ολικής μάζας που υπέστη κοσκίνισμα ( $P_i$ ). Τα ποσοστά αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-13.

- Θραύση του χονδρόκοκκου κλάσματος.
- Συσκευασία υπο-δειγμάτων. Από κάθε κλάσμα συσκευάστηκε ένα υπο-δείγμα γεωμετρίας 5. Τα βασικά στοιχεία των υπο-δειγμάτων, με κωδικούς MS545-MS552, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-12.
- Βάψιμο με ρητίνη.

## **5.7 γ-φασματοσκοπική ανάλυση**

### **5.7.1 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας ανάλυσης**

Όπως έχει αναφερθεί στην Παράγραφο 2.7.2 η ολική αβεβαιότητα ανάλυσης αποτελείται από αρκετές διαφορετικές συνιστώσες. Στα πλαίσια των αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια είχε ληφθεί μόνο η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής καθώς είχε καταβληθεί προσπάθεια να χρησιμοποιούνται οι ίδιες ανιχνευτικές διατάξεις, και οι ίδιες γεωμετρίες ανίχνευσης και επιπλέον, αυτό που ενδιέφερε ήταν τα συγκριτικά αποτελέσματα των μετρήσεων. Για λόγους πληρότητας και για να διευκολύνουμε την αξιοποίηση των στοιχείων που προέκυψαν από την παρούσα ΔΕ και σε άλλες μελέτες σχετικές με τη ραδιενέργεια

της περιοχής, αποφασίστηκε για όλα τα δείγματα από την περιοχή αυτή να γίνει ο υπολογισμός της ολικής αβεβαιότητας ανάλυσης, λαμβάνοντας υπ' όψιν σε κάθε περίπτωση όλες τις δυνατές συνιστώσες της. Πιο συγκεκριμένα, συνυπολογίστηκαν οι ακόλουθες συνιστώσες της ολικής σχετικής αβεβαιότητας:

- $r_R$ : Η σχετική αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής, λαμβάνοντας υπ' όψιν και την αβεβαιότητα υποστρώματος όπου αυτό είναι απαραίτητο (δηλαδή για τα ισότοπα  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ), όπως έχει εξηγηθεί στην Παράγραφο 3.3.5.
- $r_f$ : Η σχετική αβεβαιότητα λόγω προσαρμογής της συνάρτησης βαθμονόμησης απόδοσης, για τα ισότοπα  $^7\text{Be}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ . Η χρησιμοποιούμενη καμπύλη χωρίζεται σε δύο τμήματα στα 279.19 keV. Για τα ισότοπα χαμηλών ενεργειών ( $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ ) προκύπτει ίση με 4.3% για γεωμετρία 2 και με 5.5% για γεωμετρία 5. Για τα ισότοπα υψηλών ενεργειών ( $^7\text{Be}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ) προκύπτει ίση με 2.8% και 3.6% για γεωμετρίες 2 και 5 αντίστοιχα.

Για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$ , δεν χρησιμοποιήθηκε καμπύλη προσαρμογής αλλά απευθείας η πειραματική απόδοση. Στην περίπτωση αυτή, η σχετική αβεβαιότητα της απόδοσης, εκτιμώμενη ως αβεβαιότητα προσδιορισμού της αντίστοιχης φωτοκορυφής στο φάσμα βαθμονόμησης προκύπτει ίση με:

- $^{137}\text{Cs}$ : 0.24% για τη γεωμετρία 2 και 0.16% για τη γεωμετρία 5.
- $^{40}\text{K}$ : 0.5% για τη γεωμετρία 2 και 0.4% για τη γεωμετρία 5.

- $r_{sr}$ : Η σχετική αβεβαιότητα λόγω του προτύπου αναφοράς, η οποία δίνεται ίση με: 3.1% για τα ισότοπα χαμηλών ενεργειών ( $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ ), 1.6% για τα ισότοπα υψηλών ενεργειών ( $^7\text{Be}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ), 0.8% για το  $^{137}\text{Cs}$  και 0.2% για το  $^{40}\text{K}$ .
- $r_a$ : Η σχετική αβεβαιότητα λόγω αυταπορρόφησης, η οποία έχει εκτιμηθεί προσεγγιστικά ίση με 1%. Εφαρμόζεται μόνο στα ισότοπα χαμηλών ενεργειών ( $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ ).

Τελικά, η ολική απόλυτη αβεβαιότητα ανάλυσης ( $s^*$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$s^* = \sqrt{r_R^2 + r_f^2 + r_{sr}^2 + r_a^2} \cdot R \quad (5.1).$$

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου αυτού, κατά την παρουσίαση των δεδομένων των φασματοσκοπικών αναλύσεων, παρουσιάζεται τόσο η ανάλυση αβεβαιότητας, συμπεριλαμβάνοντας όπου χρειάζεται και το φάσμα υποστρώματος,  $s_R$ , όσο και η ολική απόλυτη αβεβαιότητα ανάλυσης,  $s^*$ .

### 5.7.2 Ανάλυση υπο-δειγμάτων αρχικού δείγματος 8-1

Το υπο-δείγμα MS534 αναλύθηκε γ-φασματοσκοπικά στον ανιχνευτή HPGe με διάρκεια συλλογής φάσματος 172800 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^7\text{Be}$  και  $^{228}\text{Ac}$ . Ακόμα, αναλύθηκε στον ανιχνευτή XtRa με διάρκεια συλλογής φάσματος 86400 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{10}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ . Για τη στατιστική ανάλυση που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που προέκυψαν από την ανάλυση του ανιχνευτή XtRa. Εξαίρεση αποτελεί το  $^7\text{Be}$ , οι τιμές του οποίου προέκυψαν από την ανάλυση του ανιχνευτή HPGe. Αυτό συνέβη γιατί η ανάλυση στον ανιχνευτή XtRa πραγματοποιήθηκε αρκετό χρονικό διάστημα μετά τη δειγματοληψία, με αποτέλεσμα το  $^7\text{Be}$  να έχει απομειωθεί σημαντικά και να μην ανιχνεύεται με ικανοποιητική ακρίβεια. Τα υπο-δείγματα MS535-MS542 αναλύθηκαν γ-φασματοσκοπικά στον ανιχνευτή XtRa με διάρκεια συλλογής φάσματος 86400 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{10}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Στον Πίνακα 5-14 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των φασμάτων που προέκυψαν από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των 9 υπο-δειγμάτων. Στους Πίνακες 5-15 έως 5-20 δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου. Υπενθυμίζεται ότι η ραδιενέργεια του  $^7\text{Be}$  ανάγεται στην ημερομηνία αναφοράς, δηλαδή στην ημερομηνία της δειγματοληψίας, βάση της Σχέσης (4.4) που δόθηκε στην Παράγραφο 4.2.5.4.

Για τον ανιχνευτή XtRa δεν είναι καταχωρημένες στον κώδικα SPUNAL πειραματικές τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$ , μέσω των οποίων θα μπορούσε να γίνει ο υπολογισμός της επιφάνειας φωτοκορυφής, προς αποφυγήν του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η διόρθωση της απόδοσης του ανιχνευτή για όλα τα υπο-δείγματα γεωμετρίας 2 και 5 με χρήση κατάλληλου συντελεστή διόρθωσης, βάση της Σχέσης



(4.3) που δόθηκε στην Παράγραφο 4.2.5.3. Για τα δείγματα γεωμετρίας 2 και 5 οι αντίστοιχες αποδόσεις  $\varepsilon_f$  και  $\varepsilon_s$  είναι:

- Για το ισότοπο  $^{137}\text{Cs}$ :
  - Γεωμετρία 2:  $\varepsilon_f = 2.311 \cdot 10^{-2}$  και  $\varepsilon_s = 2.414 \cdot 10^{-2}$
  - Γεωμετρία 5:  $\varepsilon_f = 4.352 \cdot 10^{-2}$  και  $\varepsilon_s = 4.536 \cdot 10^{-2}$
- Για το ισότοπο  $^{40}\text{K}$ :
  - Γεωμετρία 2:  $\varepsilon_f = 1.341 \cdot 10^{-2}$  και  $\varepsilon_s = 1.510 \cdot 10^{-2}$
  - Γεωμετρία 5:  $\varepsilon_f = 2.260 \cdot 10^{-2}$  και  $\varepsilon_s = 2.599 \cdot 10^{-2}$

Στους ίδιους πίνακες παρουσιάζεται και η αβεβαιότητα ανάλυσης, συνυπολογίζοντας την αβεβαιότητα του υποστρώματος για τα ισότοπα  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{10}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ . Επισημαίνεται ότι, όπως έχει αναφερθεί, το  $^7\text{Be}$  έχει πολύ μικρό χρόνο ημιζωής και δεν ανιχνεύεται στο υπόστρωμα. Επίσης, ο ανιχνευτής XtRa διαθέτει καλύτερης ποιότητας θωράκιση, από υλικό που δεν περιέχει  $^{137}\text{Cs}$ , με αποτέλεσμα το  $^{137}\text{Cs}$  να μην ανιχνεύεται στο υπόστρωμα. Επίσης, παρουσιάζεται η ολική αβεβαιότητα ανάλυσης, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 5.7.1.

### 5.7.3 Ανάλυση υπο-δειγμάτων αρχικού δείγματος 9-1

Τα υπο-δείγματα MS543 και MS544 αναλύθηκαν γ-φασματοσκοπικά στον ανιχνευτή HPGe με διάρκεια συλλογής φάσματος 172800 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^7\text{Be}$  και  $^{228}\text{Ac}$ . Ακόμα, αναλύθηκαν στον ανιχνευτή XtRa με διάρκεια συλλογής φάσματος 86400 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{10}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ . Για τη στατιστική ανάλυση που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα που προέκυψαν από την ανάλυση του ανιχνευτή XtRa. Τα υπο-δείγματα MS545-MS552 αναλύθηκαν γ-φασματοσκοπικά στον ανιχνευτή XtRa με διάρκεια συλλογής φάσματος 86400 sec, προς μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{10}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Στον Πίνακα 5-21 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των φασμάτων που προέκυψαν από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των 10 υπο-δειγμάτων. Στους Πίνακες 5-22 έως 5-27 δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου. Και σε αυτήν την περίπτωση η ραδιενέργεια του  $^7\text{Be}$  ανάγεται στην ημερομηνία αναφοράς, δηλαδή

στην ημερομηνία της δειγματοληψίας. Ακόμα, για όλα τα υπο-δείγματα γεωμετρίας 2 και 5 η τιμή της ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$  έχει διορθωθεί με τους κατάλληλους συντελεστές της Παραγράφου 5.7.1, ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Στους ίδιους πίνακες παρουσιάζεται και η αβεβαιότητα ανάλυσης, συνυπολογίζοντας την αβεβαιότητα του υποστρώματος για τα ισότοπα  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{10}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ , καθώς και η ολική αβεβαιότητα ανάλυσης.

## **5.8 Στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων**

Για τα δεδομένα που προέκυψαν από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των κλασμάτων των δειγμάτων 8-1 και 9-1 ακολουθήθηκε κοινή στατιστική ανάλυση. Κατ' αρχήν, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των τιμών ραδιενέργειας του  $^{137}\text{Cs}$  των δύο δειγμάτων με τα προβλεπόμενα από παλιότερες μελέτες επίπεδα ραδιενέργειας της περιοχής. Επίσης, για κάθε ισότοπο και για κάθε δείγμα παρουσιάστηκε σε διάγραμμα η αντίστοιχη συγκέντρωση ραδιενέργειας ανά κλάσμα. Στη συνέχεια, συγκρίθηκε με βάση το u-score ο σταθμισμένος μέσος της ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου με τη ραδιενέργεια του υπο-δείγματος που συσκευάστηκε από όλη τη μάζα του δείγματος, χωρίς άλλη επεξεργασία πλην της αεροζήρανσης και της ομογενοποίησης. Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων με βάση το u-score για κάθε διαδοχικό ζεύγος κλασμάτων για να ελεγχθεί εάν οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις στη συγκέντρωση ραδιενέργειας είναι στατιστικά σημαντικές.

### **5.8.1 Σύγκριση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{137}\text{Cs}$ με τα προβλεπόμενα επίπεδα ραδιενέργειας της περιοχής**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει πραγματοποιήσει εκτεταμένη δειγματοληψία η οποία οδήγησε στη χαρτογράφηση της απόθεσης του  $^{137}\text{Cs}$  στα ελληνικά εδάφη. Ο αντίστοιχος ραδιομετρικός χάρτης παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.4 του 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου. Από τις δύο θέσεις δειγματοληψίας που μελετήθηκαν στην παρούσα ΔΕ, η θέση «Κουρουνιός» ανήκει οριακά στην έντονα κίτρινη περιοχή του χάρτη και η θέση «Καρυές προς Καστανοχώρι» στην ανοικτή κίτρινη περιοχή του χάρτη. Συνεπώς, η επιφανειακή απόθεση ( $\alpha$ ) του  $^{137}\text{Cs}$  αναμένεται να κυμαίνεται μεταξύ 5 – 15 kBq/m<sup>2</sup> για το δείγμα 8-1 και να είναι μικρότερη από 5 kBq/m<sup>2</sup> για το δείγμα 9-1.

Για να υπολογισθούν τα αντίστοιχα όρια συγκέντρωσης ραδιενέργειας (Bq/kg) για τις δύο υπό μελέτη θέσεις χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$R = \frac{a}{d \cdot \rho} \quad (5.2),$$

όπου  $R$  η συγκέντρωση ραδιενέργειας,  $\rho$  η πυκνότητα του χώματος και  $d$  το βάθος από το οποίο συλλέχθηκε το δείγμα (πάχος του χώματος). Και στις δύο θέσεις δειγματοληψίας, θεωρήθηκε ίσο με 1 cm.

Βάση της νωπής μάζας συσκευασίας των δειγμάτων MS535 και MS543 υπολογίζεται η μέση πυκνότητα του χώματος κάθε περιοχής, από τη σχέση:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_2} \quad (5.3),$$

όπου  $V_2 = 282 \text{ cm}^3$  ο όγκος του δοχείου γεωμετρίας 2, όπως υπολογίστηκε στην Παράγραφο 4.2.1.1. Συνεπώς, για τις δύο θέσεις η πυκνότητα υπολογίζεται ίση με:

- Θέση «Κουρουνιός»:  $\rho = 1.25 \text{ gr/cm}^3$
- Θέση «Καρυές προς Καστανοχώρι»:  $\rho = 1.52 \text{ gr/cm}^3$ .

Συνεπώς, από τη Σχέση (5.2) και με τις κατάλληλες προσαρμογές στις μονάδες των μεγεθών προκύπτουν τα αναμενόμενα όρια επιφανειακής ραδιενέργειας των δύο περιοχών. Συγκεκριμένα, για τη θέση «Κουρουνιός» αναμένεται η συγκέντρωση  $^{137}\text{Cs}$  να κυμαίνεται μεταξύ 400 - 1200 Bq/kg (5 – 15 kBq/m<sup>2</sup>). Αντίστοιχα, για τη θέση «Καρυές προς Καστανοχώρι» αναμένεται συγκέντρωση μικρότερη από 329 Bq/kg (5 kBq/m<sup>2</sup>).

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 5-15 και 5-22 παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις οι τιμές των δειγμάτων που συλλέχθηκαν στην παρούσα ΔΕ είναι πολύ χαμηλότερες από τα αναμενόμενα από τη χαρτογράφηση όρια της συγκέντρωσης του  $^{137}\text{Cs}$ . Αυτό εν μέρει οφείλεται στη ραδιενεργό διάσπαση του ισοτόπου. Δεδομένου ότι η χαρτογράφηση πραγματοποιήθηκε το 1986 και ότι ο χρόνος ημιζωής του  $^{137}\text{Cs}$  είναι 30,17 yr, τα όρια της συγκέντρωσης ραδιενέργειας σήμερα υπολογίζονται από τη Σχέση (4.4). Συνεπώς, αναμένεται επιφανειακή ραδιενέργεια μεταξύ 229 – 689 Bq/kg στη θέση «Κουρουνιός» και μικρότερη από 189 Bq/kg στη θέση «Καρυές προς Καστανοχώρι».

Παρατηρείται ότι εξακολουθεί να υπάρχει ακόμα μεγάλη απόκλιση με τις σημερινές τιμές ραδιενέργειας. Η απόκλιση αυτή πρέπει να αποδίδεται στην κατακόρυφη και οριζόντια μετανάστευση του ισοτόπου (migration), το οποίο μεταφέρεται από το νερό στα στρώματα χώματος μεγαλύτερου βάθους ή σε χαμηλότερες περιοχές. Πρέπει άλλωστε να επισημανθεί ότι η θέση δειγματοληψίας «Κουρουνιός» παρουσίαζε εμφανώς κατηφορική κλίση.

### 5.8.1.1 Διαγράμματα συγκέντρωσης ανά κοκκομετρικό κλάσμα

Για κάθε ισότοπο και κάθε αρχικό δείγμα χαράχθηκε το αντίστοιχο διάγραμμα συγκέντρωσης ραδιενέργειας ανά διάμετρο σωματιδίων κλάσματος. Στα Σχήματα 5-4 έως 5-9 για το δείγμα 8-1 και στα Σχήματα 5-10 έως 5-15 για το δείγμα 9-1 απεικονίζονται:

- Οι 8 τιμές ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου που προέκυψαν από την ανάλυση των υπο-δειγμάτων του παρόντος πειράματος, καθώς και τα αντίστοιχα σφάλματά τους.
- Η σταθμισμένη μέση τιμή της ραδιενέργειας των κλασμάτων χώματος του παρόντος πειράματος. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκαν τα ποσοστά επί τοις εκατό επί της ολικής μάζας που αντιστοιχούν σε κάθε κλάσμα ( $P_i$ ), όπως αυτά προέκυψαν από το κοσκίνισμα κάθε δείγματος. Χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i \cdot m_i \cdot R_i}{m} \quad (5.4),$$

Όπου  $R_i$  και  $m_i$  η ραδιενέργεια και η μάζα κάθε κλάσματος αντίστοιχα και  $m$  η ολική μάζα του δείγματος.

Η σταθμισμένη μέση τιμή αντιστοιχεί στη μπλε διακεκομμένη γραμμή του διαγράμματος.

- Η τιμή ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου για το υπο-δείγμα γεωμετρίας 2 που συσκευάστηκε από κάθε αρχικό δείγμα, πριν από οποιαδήποτε επεξεργασία. Υπενθυμίζεται ότι από το δείγμα 8-1 συσκευάστηκε το υπο-δείγμα MS434 και από το δείγμα 9-1 το υπο-δείγμα MS543. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην κόκκινη συνεχή γραμμή των διαγραμμάτων.

- Στα διαγράμματα του δείγματος 9-1 παρουσιάζεται ακόμα και η τιμή ραδιενέργειας κάθε ισότοπου για το υπο-δείγμα γεωμετρίας 5 (MS544) που συσκευάστηκε πριν από οποιαδήποτε επεξεργασία. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην ανοιχτή πράσινη γραμμή των διαγραμμάτων 5-10 έως 5-15.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι για τα διαγράμματα του ίδιου ισότοπου για τα δύο δείγματα χρησιμοποιήθηκε η ίδια κλίμακα στους άξονες. Αυτό έγινε για να διευκολυνθεί η εποπτική σύγκριση μεταξύ των διαγραμμάτων των δύο θέσεων δειγματοληψίας για κάθε υπό μελέτη ισότοπο.

Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι:

- Όλα τα ισότοπα και για τα δύο δείγματα παρουσιάζουν την ίδια τάση μεταβολής στη συγκέντρωση της ραδιενέργειας. Στα πλέον λεπτόκοκκα κλάσματα έχουμε ιδιαίτερα υψηλές τιμές συγκεντρώσεων. Στη συνέχεια, η συγκέντρωση διατηρείται σχετικά σταθερή για τα περισσότερα κλάσματα. Τέλος, στο πιο χονδρόκοκκο κλάσμα παρατηρείται μια απότομη σημαντική μείωση της συγκέντρωσης. Η τάση αυτή είχε παρατηρηθεί και στα αντίστοιχα διαγράμματα ραδιενέργειας – κοκκομετρικού κλάσματος των υπο-δειγμάτων από τη θέση «Πολυτεχνειούπολη 1».
- Ειδικά για το  $^{40}\text{K}$  παρουσιάζεται και στα δύο δείγματα η ακόλουθη μεταβολή: η συγκέντρωση του χονδρόκοκκου κλάσματος είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Όσο μικραίνει το μέγεθος των κόκκων η συγκέντρωση αρχικά αυξάνει και στη συνέχεια εκ νέου μειώνεται, μέχρι το κλάσμα των 125  $\mu\text{m}$ . Από το σημείο αυτό αρχίζει πάλι να αυξάνεται, φθάνοντας σε μέγιστη τιμή για το πλέον λεπτόκοκκο κλάσμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι και το διάγραμμα  $^{40}\text{K}$  από το δείγμα της Πολυτεχνειούπολη 1 εμφανίζει την ίδια τάση, η οποία ενδεχομένως οφείλεται στη διαφορετική χημική συμπεριφορά που έχουν τα διαφορετικά κλάσματα του χώματος.

Για να συγκριθεί η κύμανση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των υπό μελέτη ισότοπων μεταξύ των δύο θέσεων δειγματοληψίας, συγκρίθηκαν εποπτικά οι σταθμισμένοι μέσοι των διαγραμμάτων του δείγματος 8-1 και του δείγματος 9-1. Από τη σύγκριση αυτή παρατηρείται ότι:

- Η μέση συγκέντρωση ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{210}\text{Pb}$  είναι σημαντικά αυξημένη στα κλάσματα του δείγματος 8-1 σε σύγκριση με αυτή του δείγματος 9-1.
- Η μέση συγκέντρωση ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{234}\text{Th}$  είναι περίπου ίση για τα δύο δείγματα.
- Η μέση συγκέντρωση  $^7\text{Be}$  είναι ελαφρώς αυξημένη σε σύγκριση με αυτή του δείγματος 9-1. Η διαφοροποίηση αυτή ενδεχομένως οφείλεται στην διαφορετική κοκκομετρική σύσταση των δύο δειγμάτων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα κλάσματα κάτω από 125  $\mu\text{m}$ , στα οποία αναμένεται να υπάρχει η μέγιστη συγκέντρωση του ισοτόπου, αποτελούν το 27% της μάζας του δείγματος 9-1, αλλά μόλις το 12% της μάζας του δείγματος 8-1.

Συγκρίνοντας τους σταθμισμένους μέσους των διαγραμμάτων των δειγμάτων 8-1 και 9-1 με αυτούς του δείγματος από τη θέση «Πολυτεχνειούπολη 1» παρατηρείται ότι:

- Η μέση συγκέντρωση ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{234}\text{Th}$  είναι σημαντικά αυξημένη στα κλάσματα των δειγμάτων 8-1 της Μεγαλόπολης σε σύγκριση με αυτή του δείγματος της Πολυτεχνειούπολης. Μικρότερη αύξηση παρατηρείται και για το  $^{228}\text{Ac}$ .

Η μέση συγκέντρωση ραδιενέργειας του  $^{210}\text{Pb}$  του δείγματος της Πολυτεχνειούπολης είναι μικρότερη από αυτή του δείγματος 8-1, αλλά αισθητά αυξημένη σε σχέση με το δείγμα 9-1.

### **5.8.1.2 Σύγκριση σταθμισμένης μέσης τιμής ραδιενέργειας με τιμή ραδιενέργειας από δείγμα χωρίς επεξεργασία**

Θεωρητικά, η τιμή της σταθμισμένης μέσης τιμής της ραδιενέργειας θα έπρεπε να συμπίπτει με την τιμή της ραδιενέργειας των αντίστοιχων υπο-δειγμάτων που συσκευάστηκαν από τη συνολική μάζα των δύο αρχικών δειγμάτων, πριν αυτά υποστούν περαιτέρω επεξεργασία. Για να ελεγχθεί αν η διαφορά των δύο τιμών είναι σημαντική, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων με βάση το u-score για κάθε ισότοπο. Για το δείγμα 8-1 η σταθμισμένη μέση τιμή συγκρίθηκε με την τιμή ραδιενέργειας του υπο-δείγματος MS534. Δεδομένου ότι το υπο-δείγμα αυτό είναι γεωμετρίας 2, ενώ η σταθμισμένη μέση τιμή έχει προκύψει από υπο-δείγματα γεωμετρίας 5, για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε η ολική αβεβαιότητα ανάλυσης  $s^*$ . Για το δείγμα 9-1 η

σταθμισμένη μέση τιμή συγκρίθηκε με την τιμή ραδιενέργειας του υπο-δείγματος MS544, που είναι γεωμετρίας 5. Και σε αυτή τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε η ολική αβεβαιότητα ανάλυσης  $s^*$ .

Η τιμή της μεταβλητής  $u$  για τα δείγματα 8-1 και 9-1 δίνεται στους Πίνακες 5-28 και 5-29 αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών θεωρείται στατιστικά σημαντική εφ' όσον η απόλυτη τιμή του είναι μεγαλύτερη από 2.58.

Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι για το  $^{137}\text{Cs}$  η διαφορά μεταξύ της σταθμισμένης μέσης τιμής και της τιμής του υπο-δείγματος που συσκευάστηκε χωρίς επεξεργασία είναι στατιστικά σημαντική. Αντιθέτως, και στις δύο περιπτώσεις η αντίστοιχη διαφορά για το  $^{234}\text{Th}$  δεν είναι στατιστικά σημαντική. Ο  $^{210}\text{Pb}$  εμφανίζει σημαντική διαφορά μόνο για το δείγμα 8-1, ενώ τα ισότοπα  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  και  $^7\text{Be}$  εμφανίζουν σημαντική διαφορά για το δείγμα 9-1.

### **5.8.1.3 Σύγκριση ραδιενέργειας διαδοχικών κλασμάτων με βάση το $u$ score**

Για να ελεγχθεί αν η παρατηρούμενη διακύμανση μεταξύ της ραδιενέργειας διαδοχικών κλασμάτων είναι σημαντική, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με βάση το  $u$ -score για κάθε ισότοπο για κάθε διαδοχικό ζεύγος κλασμάτων και για τα δύο δείγματα 8-1, 9-1. Η τιμή της μεταβλητής  $u$  για το δείγμα 8-1 δίνεται στους Πίνακες 5-30 και 5-31 για τις τριάδες ισωτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$  και  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$  αντίστοιχα. Ο διαχωρισμός των αποτελεσμάτων σε δύο πίνακες έγινε καθαρά για εποπτικούς λόγους, χωρίς να υπάρχει κάποια διαφοροποίηση στη διαδικασία που ακολουθήθηκε. Κατά ανάλογο τρόπο, η τιμή της μεταβλητής  $u$  για το δείγμα 9-1 δίνεται στους Πίνακες 5-32 και 5-33 για τις τριάδες ισωτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$  και  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ , αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών θεωρείται στατιστικά σημαντική εφ' όσον η απόλυτη τιμή του είναι μεγαλύτερη από 2.58.

Για το δείγμα 8-1 παρατηρείται ότι:

- Στο  $^{137}\text{Cs}$  οι τιμές όλων των ζευγών κλασμάτων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Δηλαδή, υπάρχει έντονη διακύμανση της συγκέντρωσης ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων του κλάσματος. Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση ραδιενέργειας αυξάνεται όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το κλάσμα του χώματος.

- Στα ισότοπα  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  παρατηρείται σημαντική μείωση στη συγκέντρωση ραδιενέργειας μεταξύ των διαδοχικών χονδρόκοκκων κλασμάτων και σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση μεταξύ των πιο λεπτόκοκκων. Στα ενδιάμεσα κλάσματα δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών ραδιενέργειας.
- Στο  $^7\text{Be}$  παρατηρείται σημαντική μείωση στη συγκέντρωση ραδιενέργειας μεταξύ των διαδοχικών χονδρόκοκκων κλασμάτων. Στα ενδιάμεσα κλάσματα, αλλά και στα πλέον λεπτόκοκκα, δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών ραδιενέργειας.
- Στα ισότοπα  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{234}\text{Th}$  δεν παρατηρείται καμία σημαντική απόκλιση μεταξύ της ραδιενέργειας των διαδοχικών κλασμάτων. Πρέπει να επισημανθεί ότι υπάρχει μια ξεκάθαρη αύξηση στη συγκέντρωση ραδιενέργειας από το πιο χονδρόκοκκο στο πιο λεπτόκοκκο κλάσμα. Η μεταβολή αυτή, όμως, πραγματοποιείται σταδιακά στα διαδοχικά κλάσματα των ισοτόπων αυτών και για αυτό δεν ανιχνεύεται από τις συγκρίσεις που στηρίζονται στις τιμές της μεταβλητής  $u$ .

Για το δείγμα 9-1 παρατηρείται ότι:

- Στα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$  οι τιμές όλων των ζευγών κλασμάτων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Δηλαδή, υπάρχει έντονη διακύμανση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων του κλάσματος. Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση ραδιενέργειας αυξάνεται όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το κλάσμα του χώματος.
- Στο  $^{228}\text{Ac}$  παρατηρείται σημαντική μείωση στη συγκέντρωση ραδιενέργειας μεταξύ των διαδοχικών χονδρόκοκκων κλασμάτων και σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση μεταξύ των πιο λεπτόκοκκων. Στα ενδιάμεσα κλάσματα δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών ραδιενέργειας.
- Στα ισότοπα  $^7\text{Be}$  και  $^{210}\text{Pb}$  παρατηρείται σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση ραδιενέργειας μεταξύ των διαδοχικών λεπτόκοκκων κλασμάτων. Στα ενδιάμεσα κλάσματα, αλλά και στα πλέον χονδρόκοκκα, δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών ραδιενέργειας.
- Στο  $^{234}\text{Th}$  δεν παρατηρείται καμία σημαντική απόκλιση μεταξύ της ραδιενέργειας των διαδοχικών κλασμάτων.



## 5.9 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα πειράματα που έγιναν στα πλαίσια της ΔΕ με στόχο να μελετηθεί η απόθεση ραδιενέργειας λόγω της διαφεύγουσας ιπτάμενης τέφρας στην περιοχή της Μεγαλόπολης, εφαρμόζοντας στα δείγματα που λήφθηκαν συγκεκριμένη διαδικασία προετοιμασίας. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει αεροζήρανση των δειγμάτων και κοσκίνισμα με σκοπό τη συσκευασία ενός υπο-δείγματος από κάθε κοκκομετρικό κλάσμα.

Στα δείγματα που αναλύθηκαν παρατηρήθηκε σαφώς αυξημένη συγκέντρωση ραδιενέργειας σε σχέση με τα δείγματα της Πολυτεχνειούπολης τα οποία παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η συγκέντρωση, όμως, αυτή είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων για τα φυσικά επίπεδα ραδιενέργειας της περιοχής. Δεδομένου ότι δεν ήταν δυνατό στα πλαίσια της ΔΕ να αναλυθούν όλα τα επιφανειακά δείγματα από την περιοχή Μεγαλόπολης, αλλά και τα δείγματα που λήφθηκαν από βάθος 10 – 20 cm, δεν κατέστη δυνατόν να προκύψουν συμπεράσματα για το κατά πόσον υπάρχει αύξηση των επιπέδων φυσικής ραδιενέργειας στο επιφανειακό χώμα λόγω απόθεσης ιπτάμενης τέφρας από τους λιγνιτικούς ΑΗΣ που λειτουργούν στην περιοχή.

Κατά τη φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων διαπιστώθηκε ότι για όλα τα ισότοπα, με εξαίρεση το  $^7\text{Be}$ , το δείγμα 8-1 έχει υψηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας, και ιδιαίτερα για τον  $^{210}\text{Pb}$ . Επισημαίνεται, ότι σύμφωνα με τη ΔΔ του Ν.Παπαδόπουλου, στην περιοχή στην οποία ελήφθη το δείγμα 8-1 αναμένεται η μέγιστη επιβάρυνση λόγω της τέφρας από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης. Φυσικά, αυτό δεν αποτελεί απόδειξη ότι τα αυξημένα επίπεδα  $^{210}\text{Pb}$  στο δείγμα αυτό οφείλονται σε επίπτωση από τους ΑΗΣ.

Το γεγονός ότι στο δείγμα 9-1 παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση του  $^7\text{Be}$  σε σχέση με αυτή του δείγματος 8-1, ενδεχομένως οφείλεται στη διαφορετική κοκκομετρική σύσταση των χωμάτων των δύο περιοχών. Συγκεκριμένα, στην περιοχή του δείγματος 9-1 το χώμα είχε σχεδόν διπλάσια συγκέντρωση λεπτόκοκκων κλασμάτων από αυτήν του 8-1, γεγονός που ενδέχεται να επιδρά στους μηχανισμούς απόθεσης και κατακράτησης του  $^7\text{Be}$ . Επίσης, δεδομένου ότι το ισότοπο αυτό παράγεται στον αέρα και στη συνέχεια αποτίθεται στο έδαφος, η διαφορετική διαμόρφωση του εδάφους των δύο περιοχών μπορεί να επιδρά στη συγκέντρωσή του.

Το δείγμα 8-1 λήφθηκε από ύψωμα σε θέση με κατηφορική κλίση, ενώ το δείγμα 9-1 σε περιοχή με επίπεδη διαμόρφωση.

Αναφορικά με το  $^{137}\text{Cs}$ , η συγκέντρωσή του και στα δύο δείγματα που αναλύθηκαν είναι κατά πολύ μικρότερη αυτής που προκύπτει από τους ραδιομετρικούς χάρτες που έχει σχεδιάσει το ΕΠΤ-ΕΜΠ κατόπιν παλαιότερης δειγματοληψίας. Το γεγονός αυτό εν μέρει οφείλεται στην απομείωση του ισότοπου λόγω ραδιενεργού διάσπασης, ( $T_{1/2} \sim 30 \text{ yrs}$ ), και εν μέρει στο φαινόμενο της κατακόρυφης ή οριζόντιας μετανάστευσης.

Για όλα τα υπό μελέτη ισότοπα παρατηρήθηκε έντονη διακύμανση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του χώματος. Πιο συγκεκριμένα, τα πιο χονδρόκοκκα κλάσματα παρουσίαζαν πολύ μικρή συγκέντρωση ραδιενέργειας, ενώ για τα πλέον λεπτόκοκκα κλάσματα η συγκέντρωση έπαιρνε τη μέγιστη τιμή της. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρήθηκε και στα δείγματα που συλλέχθηκαν στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, και συνεπώς εν μέρει οφείλεται στις διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες που έχουν τα κλάσματα του χώματος. Για να προκύψει κάποιου είδους συμπέρασμα σχετικά με την επίδραση της απόθεσης της ιπτάμενης τέφρας στην αυξημένη συγκέντρωση των λεπτόκοκκων κλασμάτων, πρέπει να πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα. Με ιδιαίτερο ενδιαφέρον αναμένονται από την άποψη αυτή οι αναλύσεις των υπόλοιπων δειγμάτων που λήφθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ, οι οποίες δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν λόγω πρακτικών περιορισμών χρόνου και διαθεσιμότητας των ανιχνευτικών διατάξεων.

Τέλος, αξίζει να σχολιασθεί ιδιαίτερα η συμπεριφορά που παρουσιάζει το  $^{40}\text{K}$  και η οποία είναι παρόμοια και στα τρία δείγματα που αναλύθηκαν. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές για το πλέον λεπτόκοκκο κλάσμα, εν συνεχεία, όσο αυξάνει το μέγεθος του κόκκου παρουσιάζει μείωση της ραδιενέργειας μέχρι μία τιμή περί τα 125  $\mu\text{m}$ , και από το σημείο αυτό παρουσιάζει πάλι μικρή αύξηση με το μέγεθος του κόκκου μέχρι περίπου κόκκο 1 mm. Από το σημείο αυτό και μετά παρουσιάζει μείωση της ραδιενέργειας. Βεβαίως το πλήθος των δειγμάτων που παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό δεν είναι μεγάλο, αλλά η συνέπεια με την οποία εμφανίζεται δημιουργεί την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνησή του.

## Πίνακες κεφαλαίου

Πίνακας 5-1: Μετρήσεις ραδονίου κατά τη δειγματοληψία της Μεγαλόπολης

Θέση δειγματοληψίας	Μέτρηση ραδονίου ( $Bq/m^3$ )
Κατσίμπαλης	$29 \pm 22$
Δρόμος Κατσίμπαλη – Καρύταινα	$22 \pm 8$
Κουρουνιός	$17 \pm 9$

Πίνακας 5-2: Κατάλογος υπο-δειγμάτων screening

Κωδικός υπο-δείγματος	Αρχικό δείγμα	Γεωμετρία	Υγρασία (%)	Συσκευασμένο δείγμα	
				Νωπή μάζα (gr)	Ξηρή μάζα (gr)
MS522	6-2	2	12.0	230.50	202.84
MS523	7-1	5	18.2	260.80	213.30
MS524	8-1	2	4.0	313.70	301.15
MS525	9-1	2	3.2	388.80	376.36
PM004	Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης	2	-	-	233.10

Πίνακας 5-3: Κατάλογος φασμάτων screening

Κωδικός	Θέση SPUNAL	Ανιχνευτής	Γεωμετρία	Χρόνος συλλογής (sec)
MS522A	11/3.93	2	2	84822
MS523A	14/7.9	4	2	247788
MS524A	11/3.91	4	2	9122
MS525A	11/3.90	2	2	8947
PM004AZA	11/3.88	4	2	2589

**Πίνακας 5-4: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$  (αποτελέσματα screening)**

$^{137}\text{Cs}$			
<i>Φάσμα</i>	<i>Αρχικό δείγμα</i>	<i>R</i>	<i>s<sub>R</sub></i>
		(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS522A	6-2	150.93	1.20
MS523A	7-1	20.36	0.22
MS524A	8-1	36.35	0.08
MS525A	9-1	18.78	1.45
PM004AZA	Ιπτάμενη τέφρα	Δεν ανιχνεύθηκε	

**Πίνακας 5-5: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$  (αποτελέσματα screening)**

$^{40}\text{K}$			
<i>Φάσμα</i>	<i>Αρχικό δείγμα</i>	<i>R</i>	<i>s<sub>R</sub></i>
		(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS522A	6-2	397.75	8.03
MS523A	7-1	380.30	11.96
MS524A	8-1	483.41	2.49
MS525A	9-1	386.94	1.96
PM004AZA	Ιπτάμενη τέφρα	498.27	27.24

Πίνακας 5-6: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ac}$  (αποτελέσματα screening)

$^{228}\text{Ac}$			
Φάσμα	Αρχικό δείγμα	$R$ (Bq/kg)	$s_R$ (Bq/kg)
MS522A	6-2	27.22	3.64
MS523A	7-1	37.25	0.98
MS524A	8-1	27.98	2.36
MS525A	9-1	26.75	1.96
PM004AZA	Ιπτάμενη τέφρα	56.19	7.53

Πίνακας 5-7: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^7\text{Be}$  (αποτελέσματα screening)

$^7\text{Be}$					
Φάσμα	Αρχικό δείγμα	$t$ (d)	$R$ (Bq/kg) Μέτρηση	$s$ Δειγματολη- ψία (Bq/kg)	
MS522A	6-2	1	26.79	27.22	5.63
MS523A	7-1	1	29.47	29.85	1.30
MS524A	8-1	1	24.39	24.71	5.48
MS525A	9-1	1	43.62	44.19	9.03
PM004AZA	Ιπτάμενη τέφρα	1	Δεν ανιχνεύθηκε		

**Πίνακας 5-8: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$  (αποτελέσματα screening)**

$^{210}\text{Pb}$			
<i>Φάσμα</i>	<i>Αρχικό δείγμα</i>	<i>R</i>	<i>S<sub>R</sub></i>
		<i>(Bq/kg)</i>	<i>(Bq/kg)</i>
MS522A	6-2	-	-
MS523A	7-1	76.81	2.89
MS524A	8-1	94.84	12.48
MS525A	9-1	-	-
PM004AZA	Ιπτάμενη τέφρα	467.05	247.21

**Πίνακας 5-9: Πειραματικά μετρούμενες τιμές ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$  (αποτελέσματα screening)**

$^{234}\text{Th}$			
<i>Φάσμα</i>	<i>Αρχικό δείγμα</i>	<i>R</i>	<i>S<sub>R</sub></i>
		<i>(Bq/kg)</i>	<i>(Bq/kg)</i>
MS522A	6-2	-	-
MS523A	7-1	39.90	4.18
MS524A	8-1	10.27	12.58
MS525A	9-1	-	-
PM004AZA	Ιπτάμενη τέφρα	724.92	53.07

**Πίνακας 5-10: Κατάλογος υπο-δειγμάτων δείγματος 8-1**

Κωδικός υπο-δείγματος	Διάμετρος σωματιδίων κλάσματος (mm)	Γεωμετρία	Υγρασία (%)	Συσκευασμένο δείγμα	
				Νωπή μάζα (gr)	Ξηρή μάζα (gr)
MS534	Συνολικό δείγμα	2	4.0	351.86	337.79
MS535	<0.045	5	4.1	74.14	71.10
MS536	0.045-0.063	5	4.1	82.27	78.90
MS537	0.063-0.125	5	4.2	84.07	80.54
MS538	0.125-0.25	5	4.1	81.71	78.36
MS539	0.25-0.5	5	4.1	72.40	69.43
MS540	0.5-1	5	4.1	81.29	77.96
MS541	1-2	5	3.9	85.77	82.42
MS542	>2	5	3.0	101.32	98.28

**Πίνακας 5-11: Ποσοστό (%) μάζας κλάσματος προς την ολική μάζα δείγματος 8-1**

Κλάσμα (mm)	Ποσοστό (%) μάζας κλάσματος προς την ολική μάζα ( $P_i$ )
< 0.045	0.02
0.045-0.063	0.02
0.063-0.125	0.03
0.125-0.250	0.05
0.250-0.500	0.06
0.500-1.000	0.10
1.000-2.000	0.19
> 2.000	0.53

**Πίνακας 5-12: Κατάλογος υπο-δειγμάτων δείγματος 9-1**

<i>Κωδικός υπο-δείγματος</i>	<i>Διάμετρος σωματιδίων κλάσματος (mm)</i>	<i>Γεωμετρία</i>	<i>Υγρασία (%)</i>	<i>Συσκευασμένο δείγμα</i>	
				<i>Νωπή μάζα (gr)</i>	<i>Ξηρή μάζα (gr)</i>
MS543	Συνολικό δείγμα	2	1.5	428.43	424.00
MS544	Συνολικό δείγμα	5	1.5	117.47	115.71
MS545	<0.045	5	2.00	90.12	88.32
MS546	0.045-0.063	5	1.95	113.72	111.5
MS547	0.063-0.125	5	1.40	113.65	112.06
MS548	0.125-0.25	5	1.60	114.45	112.62
MS549	0.25-0.5	5	2.00	110.42	108.21
MS550	0.5-1	5	2.10	96.77	94.74
MS551	1-2	5	2.00	91.54	89.71
MS552	>2	5	0.50	129.86	129.21

**Πίνακας 5-13: Ποσοστό (%) μάζας κλάσματος προς την ολική μάζα δείγματος 9-1**

<i>Κλάσμα (mm)</i>	<i>Ποσοστό (%) μάζας κλάσματος προς την ολική μάζα (<math>P_i</math>)</i>
< 0.045	0.02
0.045-0.063	0.02
0.063-0.125	0.03
0.125-0.250	0.05
0.250-0.500	0.06
0.500-1.000	0.10
1.000-2.000	0.19
> 2.000	0.53



**Πίνακας 5-14: Κατάλογος φασμάτων κοκκομετρικών κλασμάτων χόματος δείγματος 8-1**

<i>Κωδικός</i>	<i>Θέση SPUNAL</i>	<i>Ανιχνευτής</i>	<i>Γεωμετρία</i>	<i>Χρόνος συλλογής (sec)</i>
MS534A	11/3.109	2	2	172800
MS534B	11/3.129	4	2	86400
MS535A	11/3.102	4	5	86400
MS536A	11/3.106	4	5	86400
MS537A	11/3.107	4	5	86400
MS538A	11/3.111	4	5	86400
MS539A	11/3.112	4	5	86400
MS540A	11/3.114	4	5	86400
MS541A	11/3.115	4	5	86400
MS542A	14/7.27	4	5	86400

Πίνακας 5-15: Ραδιενέργεια  $^{137}\text{Cs}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 8-1

$^{137}\text{Cs}$			
Φάσμα	$R$	$s_R$	$s^*$
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS534B	68.43	0.32	0.66
MS535A	78.51	0.71	0.96
MS536A	73.46	0.67	0.90
MS537A	68.68	0.62	0.84
MS538A	63.95	0.62	0.81
MS539A	60.40	0.66	0.82
MS540A	50.83	0.59	0.72
MS541A	34.20	0.52	0.59
MS542A	9.40	0.35	0.36

Πίνακας 5-16: Ραδιενέργεια  $^{40}\text{K}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 8-1

$^{40}\text{K}$			
Φάσμα	$R$	$s_R$	$s^*$
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS534B	479.91	3.58	5.77
MS535A	588.04	6.78	8.58
MS536A	540.00	6.22	7.88
MS537A	499.31	6.09	7.55
MS538A	509.69	6.22	7.71
MS539A	525.69	6.78	8.25
MS540A	542.31	6.59	8.18
MS541A	534.30	6.14	7.78
MS542A	441.91	5.08	6.43

Πίνακας 5-17: Ραδιενέργεια  $^{228}\text{Ac}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 8-1

$^{228}\text{Ac}$			
Φάσμα	$R$ (Bq/kg)	$s_R$ (Bq/kg)	$s^*$ (Bq/kg)
MS534B	26.63	0.74	1.13
MS535A	38.38	1.55	2.16
MS536A	35.81	1.46	2.03
MS537A	33.98	1.37	1.91
MS538A	34.11	1.36	1.91
MS539A	31.91	1.58	2.02
MS540A	31.83	1.38	1.87
MS541A	28.42	1.39	1.79
MS542A	24.48	1.15	1.50

Πίνακας 5-18: Ραδιενέργεια  $^7\text{Be}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 8-1

$^7\text{Be}$					
Φάσμα	$t$	$R$ (Bq/kg)		$s$	$s^*$
	(d)	Μέτρηση	Δειγματοληψία	(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS534A	28	21.81	31.36	3.04	3.20
MS535A	20	63.55	82.37	4.74	5.75
MS536A	28	49.07	70.56	4.75	5.50
MS537A	30	43.70	64.49	4.77	5.40
MS538A	34	44.92	69.82	4.95	5.66
MS539A	35	46.28	72.87	5.43	6.14
MS540A	37	28.68	46.34	4.86	5.19
MS541A	40	14.01	23.54	4.54	4.63
MS542A	43	7.17	12.52	3.59	3.62

Πίνακας 5-19: Ραδιενέργεια  $^{210}\text{Pb}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 8-1

$^{210}\text{Pb}$			
Φάσμα	$R$	$s_R$	$s^*$
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS534B	94.61	4.25	6.64
MS535A	232.46	6.21	16.11
MS536A	204.31	5.76	14.27
MS537A	212.08	5.67	14.70
MS538A	197.85	5.60	13.83
MS539A	199.71	5.84	14.04
MS540A	127.71	5.15	9.65
MS541A	56.77	4.66	5.91
MS542A	23.24	3.99	4.26

Πίνακας 5-20: Ραδιενέργεια  $^{234}\text{Th}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 8-1

$^{234}\text{Th}$			
Φάσμα	$R$	$s_R$	$s^*$
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS534B	24.17	4.19	4.39
MS535A	40.06	5.96	6.49
MS536A	34.74	5.68	6.10
MS537A	33.70	5.45	5.86
MS538A	30.27	5.38	5.71
MS539A	31.19	5.61	5.95
MS540A	28.88	5.22	5.54
MS541A	25.04	4.95	5.20
MS542A	24.01	4.39	4.65

**Πίνακας 5-21: Κατάλογος φασμάτων κοκκομετρικών κλασμάτων χώματος δείγματος 9-1**

<i>Κωδικός</i>	<i>Θέση SPUNAL</i>	<i>Ανιχνευτής</i>	<i>Γεωμετρία</i>	<i>Χρόνος συλλογής (sec)</i>
MS543A	11.3/110	2	2	172800
MS543B	11/3.118	4	2	86400
MS544A	11.3/117	2	2	172800
MS544B	11/3.120	4	5	86400
MS545A	14/7.30	4	5	86400
MS546A	11/3.122	4	5	86400
MS547A	11/3.123	4	5	86400
MS548A	11/3.124	4	5	86400
MS549A	11/3.125	4	5	86400
MS550A	11/3.126	4	5	86400
MS551A	11/3.127	4	5	86400
MS552A	11/3.128	4	5	86400

Πίνακας 5-22: Ραδιενέργεια  $^{137}\text{Cs}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 9-1

$^{137}\text{Cs}$			
Φάσμα	$R$	$s$	$s^*$
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS543B	16.57	0.23	0.27
MS544B	24.64	0.39	0.44
MS545A	49.79	0.69	0.80
MS546A	36.19	0.44	0.53
MS547A	29.68	0.40	0.46
MS548A	32.85	0.42	0.50
MS549A	31.40	0.44	0.51
MS550A	25.45	0.43	0.48
MS551A	12.61	0.39	0.40
MS552A	2.62	0.24	0.24

Πίνακας 5-23: Ραδιενέργεια  $^{40}\text{K}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 9-1

$^{40}\text{K}$			
Φάσμα	$R$ (Bq/kg)	$s_R$ (Bq/kg)	$s^*$ (Bq/kg)
MS543B	328.35	2.66	4.09
MS544B	390.99	4.49	5.69
MS545A	473.47	5.76	7.15
MS546A	368.83	4.49	5.57
MS547A	331.03	4.27	5.19
MS548A	380.16	4.38	5.54
MS549A	426.44	4.89	6.20
MS550A	460.98	5.30	6.72
MS551A	420.21	5.41	6.59
MS552A	299.01	3.66	4.53

Πίνακας 5-24: Ραδιενέργεια  $^{228}\text{Ac}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 9-1

$^{228}\text{Ac}$			
<i>Φάσμα</i>	<i>R</i>	<i>s<sub>R</sub></i>	<i>s*</i>
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS543B	25.26	0.599	1.01
MS544B	30.99	1.051	1.61
MS545A	47.02	1.423	2.34
MS546A	33.05	1.075	1.69
MS547A	28.53	1.053	1.54
MS548A	32.21	1.070	1.66
MS549A	34.72	1.127	1.77
MS550A	32.92	1.240	1.79
MS551A	29.17	1.200	1.66
MS552A	19.02	0.839	1.12



Πίνακας 5-25: Ραδιενέργεια  ${}^7\text{Be}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 9-1

${}^7\text{Be}$					
Φάσμα	$t$	$R$ (Bq/kg)		$s$	$s^*$
	(d)	Μέτρηση	Δειγματοληψία	(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS543B	48	19.46	36.27	2.44	2.71
MS544B	49	29.87	56.40	4.20	4.76
MS545A	51	68.53	132.79	6.04	7.99
MS546A	63	32.23	72.97	5.35	6.07
MS547A	65	24.60	57.16	5.02	5.50
MS548A	68	15.90	38.41	5.35	5.56
MS549A	69	17.93	43.88	5.56	5.82
MS550A	70	11.53	28.59	6.15	6.25
MS551A	71	9.80	24.61	5.94	6.02
MS552A	72	7.85	19.97	4.09	4.17

Πίνακας 5-26: Ραδιενέργεια  $^{210}\text{Pb}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 9-1

$^{210}\text{Pb}$			
<i>Φάσμα</i>	<i>R</i>	<i>s<sub>R</sub></i>	<i>s*</i>
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS543B	31.54	3.851	4.21
MS544B	34.59	4.162	4.71
MS545A	77.42	5.221	7.19
MS546A	52.29	4.335	5.47
MS547A	37.94	4.057	4.73
MS548A	41.90	4.181	4.97
MS549A	40.63	4.283	5.01
MS550A	29.36	4.404	4.79
MS551A	18.98	4.204	4.38
MS552A	12.10	3.430	3.52

Πίνακας 5-27: Ραδιενέργεια  $^{234}\text{Th}$  υπο-δειγμάτων του δείγματος 9-1

$^{234}\text{Th}$			
Φάσμα	$R$	$s_R$	$s^*$
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
MS543B	27.47	4.098	4.36
MS544B	31.86	5.022	5.42
MS545A	52.80	5.806	6.72
MS546A	38.49	4.815	5.41
MS547A	29.36	4.479	4.86
MS548A	34.06	4.625	5.11
MS549A	36.35	5.229	5.72
MS550A	33.81	4.988	5.44
MS551A	23.20	4.916	5.14
MS552A	18.46	3.774	3.95

Πίνακας 5-28: Σύγκριση σταθμισμένου μέσου δείγματος 8-1 με υπο-δείγμα MS534

Απόλυτη τιμή μεταβλητής σύγκρισης $U$					
$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^7\text{Be}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
16.65	0.90	0.82	0.46	2.89	0.43

Πίνακας 5-29: Σύγκριση σταθμισμένου μέσου δείγματος 9-1 με υπο-δείγμα MS544

Απόλυτη τιμή μεταβλητής σύγκρισης $U$					
$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^7\text{Be}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
13.52	2.89	7.38	3.51	1.29	0.73

**Πίνακας 5-30: Αποτελέσματα σύγκρισης βάση το u-score δείγματος 8-1 - Σύγκριση ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$**

Ζεύγος φασμάτων	Συγκρινόμενα κοκκομετρικά κλάσματα	Μεταβλητή Σύγκρισης $u$		
		$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$
MS535A-MS536A	(0.45 – 0.63 mm) - (< 0.45 mm)	5.17	5.22	1.21
MS536A-MS537A	(0.63 – 0.125 mm) - (0.45 – 0.63 mm)	5.24	4.67	0.91
MS537A-MS538A	(0.125 – 0.25 mm) - (0.63 – 0.125 mm)	5.40	-0.39	-0.07
MS538A-MS539A	(0.25 – 0.5 mm) - (0.125 – 0.25 mm)	3.92	-2.50	1.06
MS539A-MS540A	(0.5 – 1 mm) - (0.25 – 0.5 mm)	10.81	-1.76	0.38
MS540A-MS541A	(1 – 2 mm) - (0.5 – 1 mm)	21.15	0.89	1.74
MS541A-MS542A	(> 2 mm) - (1 – 2 mm)	39.57	11.68	2.18

**Πίνακας 5-31: Αποτελέσματα σύγκρισης βάση το u-score δείγματος 8-1 - Σύγκριση ραδιενέργειας  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$**

Ζεύγος φασμάτων	Συγκρινόμενα κοκκομετρικά κλάσματα	Μεταβλητή Σύγκρισης $u$		
		$^7\text{Be}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
MS535A-MS536A	(0.45 – 0.63 mm) - (< 0.45 mm)	-1.17	3.32	0.65
MS536A-MS537A	(0.63 – 0.125 mm) - (0.45 – 0.63 mm)	0.90	-0.96	0.13
MS537A-MS538A	(0.125 – 0.25 mm) - (0.63 – 0.125 mm)	-0.78	1.79	0.45
MS538A-MS539A	(0.25 – 0.5 mm) - (0.125 – 0.25 mm)	-0.42	-0.23	-0.12
MS539A-MS540A	(0.5 – 1 mm) - (0.25 – 0.5 mm)	3.64	9.25	0.30
MS540A-MS541A	(1 – 2 mm) - (0.5 – 1 mm)	3.43	10.21	0.53
MS541A-MS542A	(> 2 mm) - (1 – 2 mm)	1.90	5.45	0.16

**Πίνακας 5-32: Αποτελέσματα σύγκρισης βάση το u-score δείγματος 9-1 - Σύγκριση ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{228}\text{Ac}$**

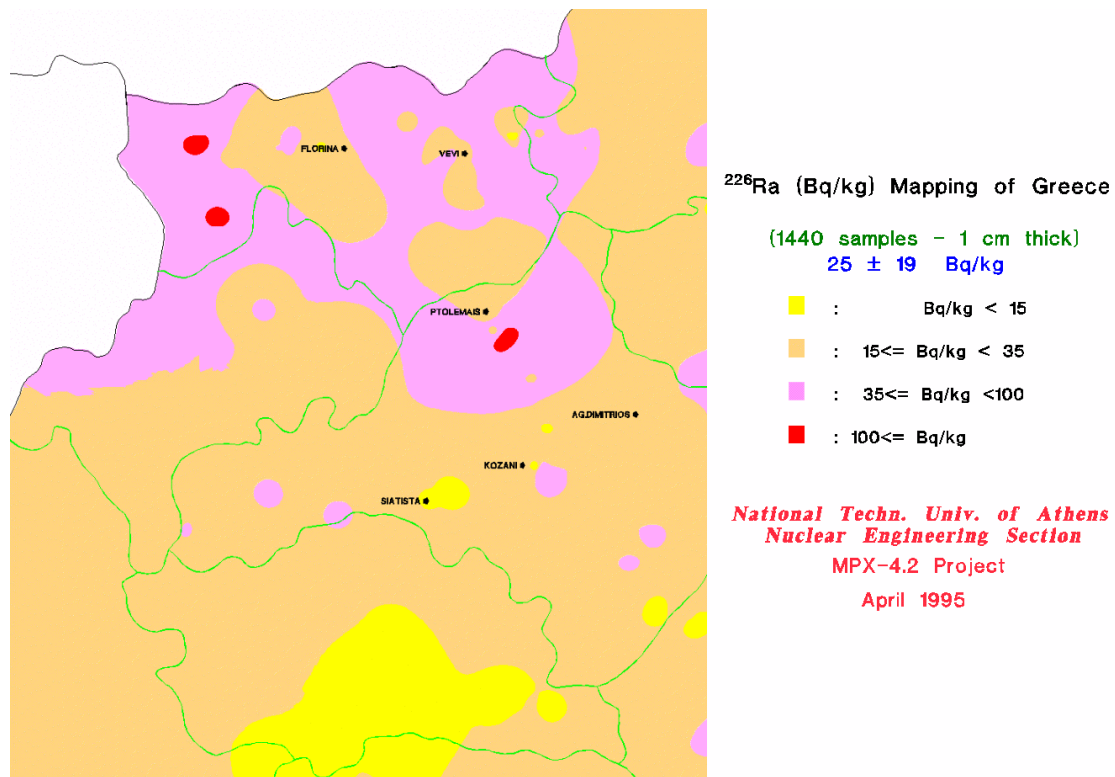
Ζεύγος φασμάτων	Συγκρινόμενα κοκκομετρικά κλάσματα	Μεταβλητή Σύγκρισης $u$		
		$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$
MS545A-MS546A	(0.45 – 0.63 mm) - (< 0.45 mm)	16.62	14.36	7.83
MS546A-MS547A	(0.63 – 0.125 mm) - (0.45 – 0.63 mm)	10.95	6.10	3.00
MS547A-MS548A	(0.125 – 0.25 mm) - (0.63 – 0.125 mm)	-5.47	-8.04	-2.45
MS548A-MS549A	(0.25 – 0.5 mm) - (0.125 – 0.25 mm)	2.38	-7.05	-1.61
MS549A-MS550A	(0.5 – 1 mm) - (0.25 – 0.5 mm)	9.67	-4.79	1.07
MS550A-MS551A	(1 – 2 mm) - (0.5 – 1 mm)	22.12	5.38	2.17
MS551A-MS552A	(> 2 mm) - (1 – 2 mm)	21.82	-18.57	6.93

**Πίνακας 5-33: Αποτελέσματα σύγκρισης βάση το u-score δείγματος 9-1 - Σύγκριση ραδιενέργειας  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$**

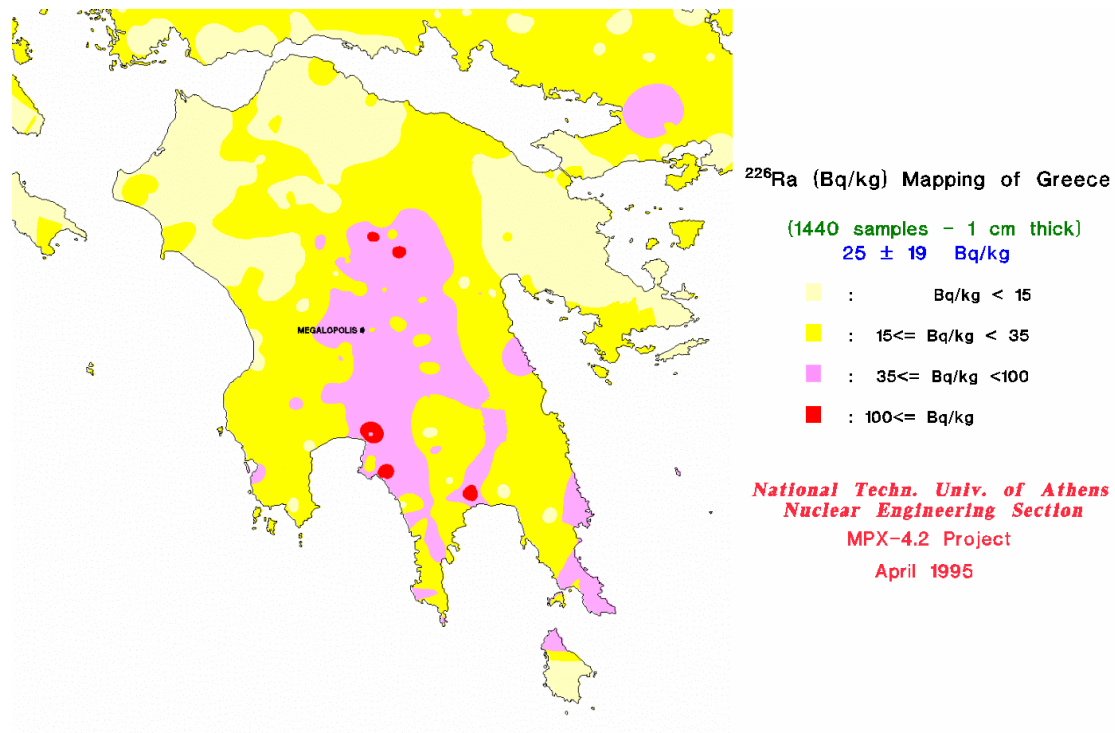
Ζεύγος φασμάτων	Συγκρινόμενα κοκκομετρικά κλάσματα	Μεταβλητή Σύγκρισης $u$		
		$^7\text{Be}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{234}\text{Th}$
MS545A-MS546A	(0.45 – 0.63 mm) - (< 0.45 mm)	7.41	3.70	1.90
MS546A-MS547A	(0.63 – 0.125 mm) - (0.45 – 0.63 mm)	2.16	2.42	1.39
MS547A-MS548A	(0.125 – 0.25 mm) - (0.63 – 0.125 mm)	2.56	-0.68	-0.73
MS548A-MS549A	(0.25 – 0.5 mm) - (0.125 – 0.25 mm)	-0.71	0.21	-0.33
MS549A-MS550A	(0.5 – 1 mm) - (0.25 – 0.5 mm)	1.84	1.84	0.35
MS550A-MS551A	(1 – 2 mm) - (0.5 – 1 mm)	0.47	1.71	1.51
MS551A-MS552A	(> 2 mm) - (1 – 2 mm)	0.64	1.27	0.77

## Σχήματα κεφαλαίου

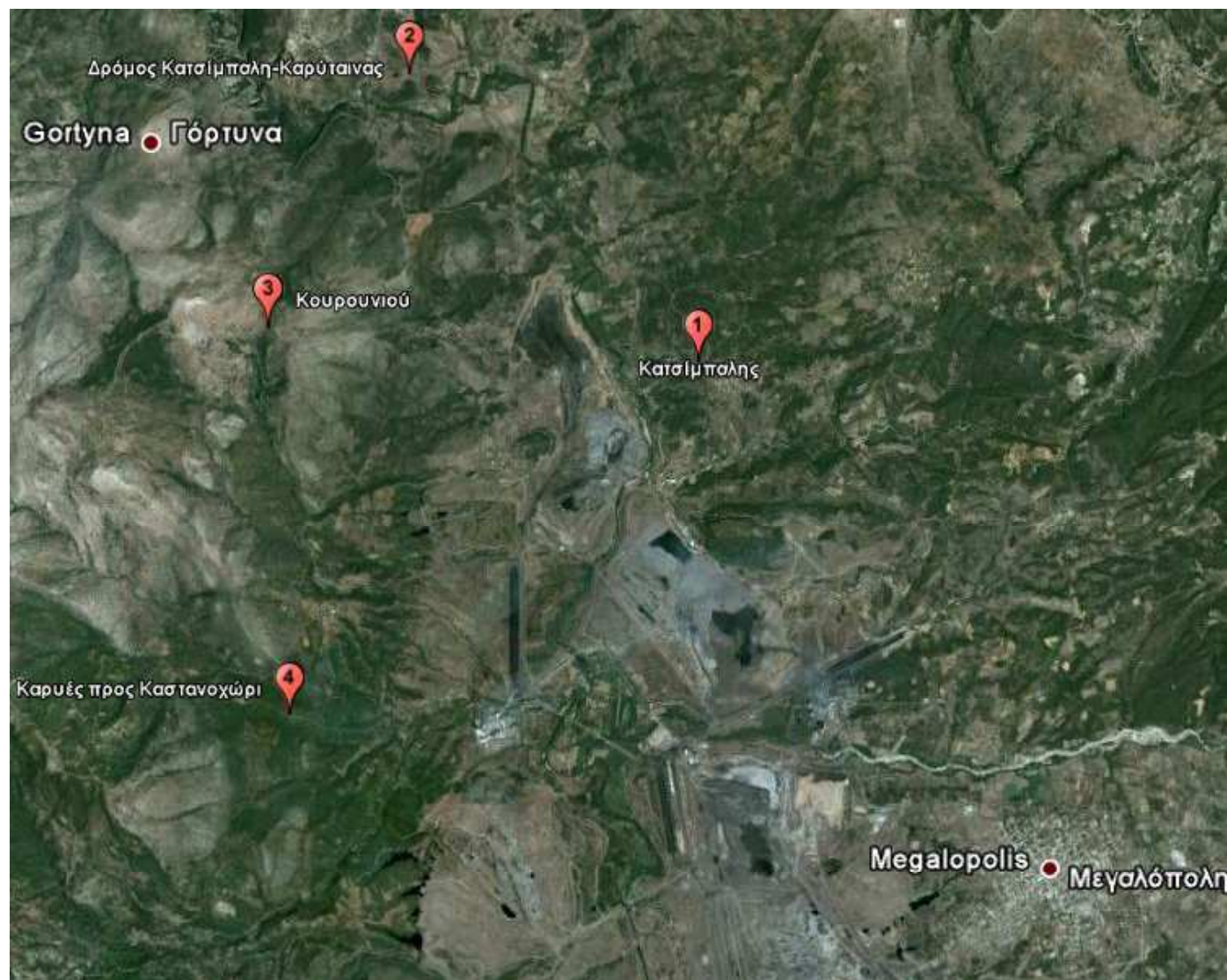
Σχήμα 5-1: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{226}\text{Ra}$  στην περιοχή της Πτολεμαΐδας (Anagnostakis 1999)



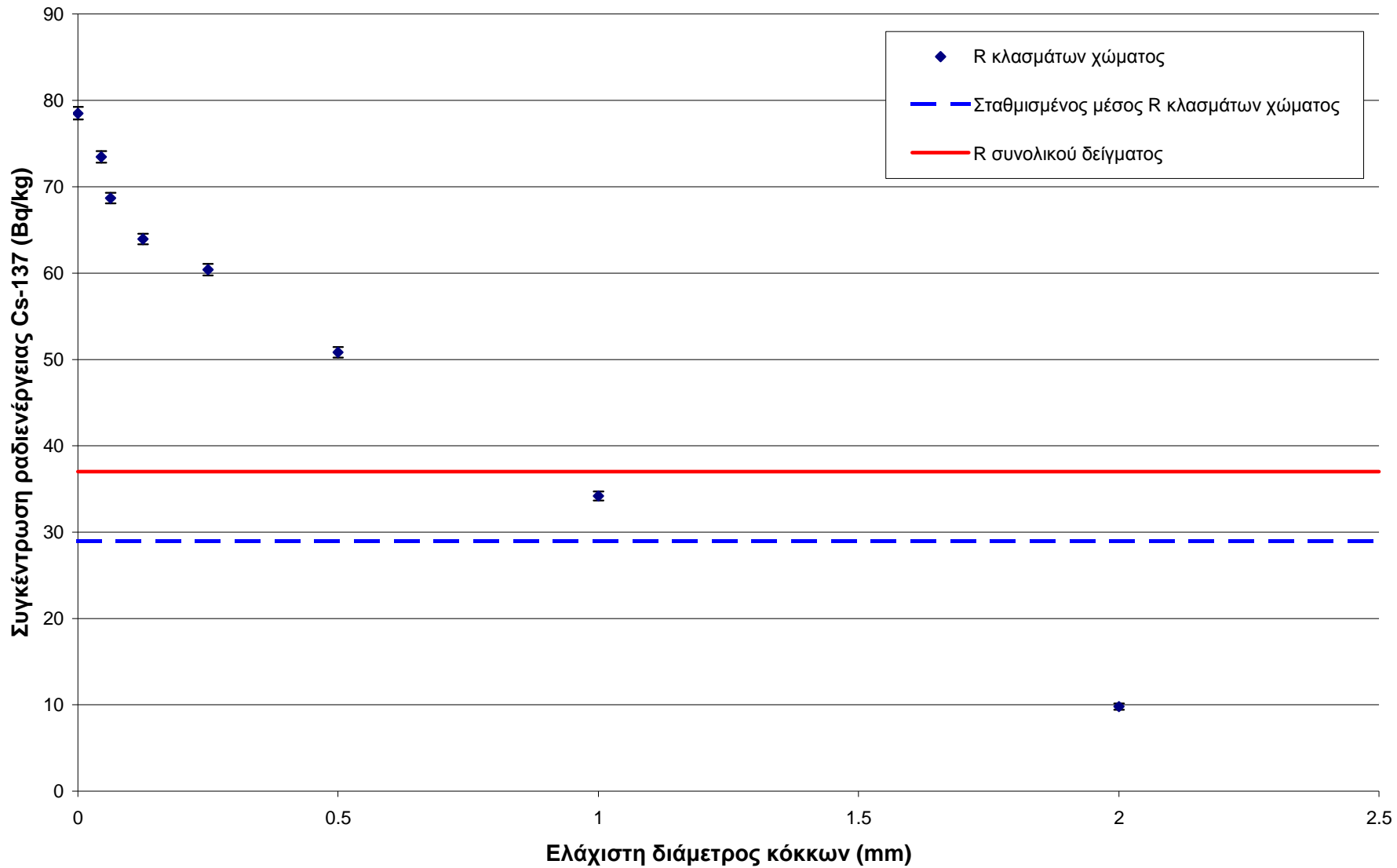
Σχήμα 5-2: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{226}\text{Ra}$  στην περιοχή της Μεγαλόπολης (Rouni 2001)



Σχήμα 5-3: Χάρτης θέσεων δειγματοληψίας περιοχής Μεγαλόπολης

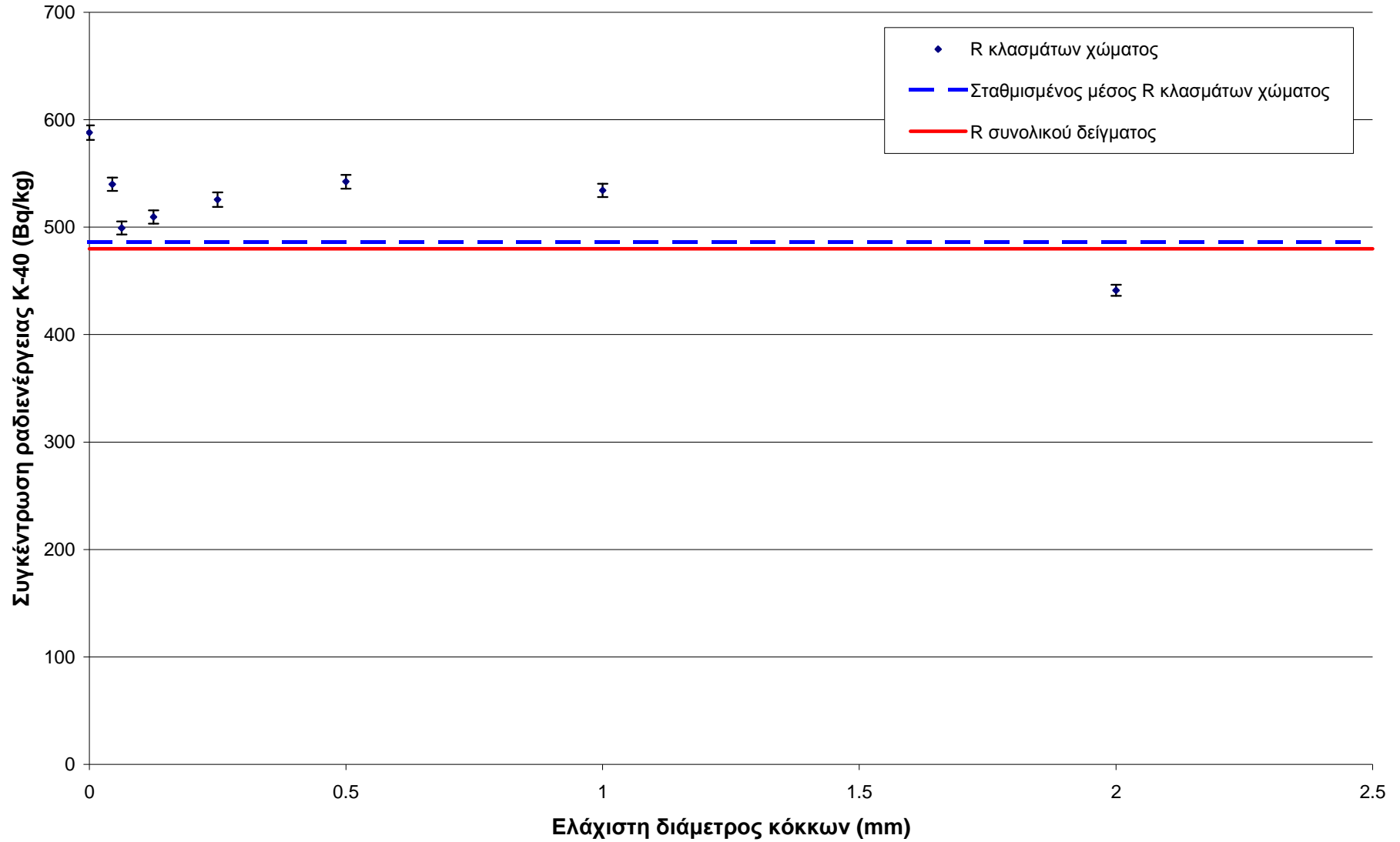


Σχήμα 5-4: Συγκέντρωση ραδιενέργειας <sup>137</sup>Cs – Διάμετρος κόκκων χώματος (Δείγμα 8-1)

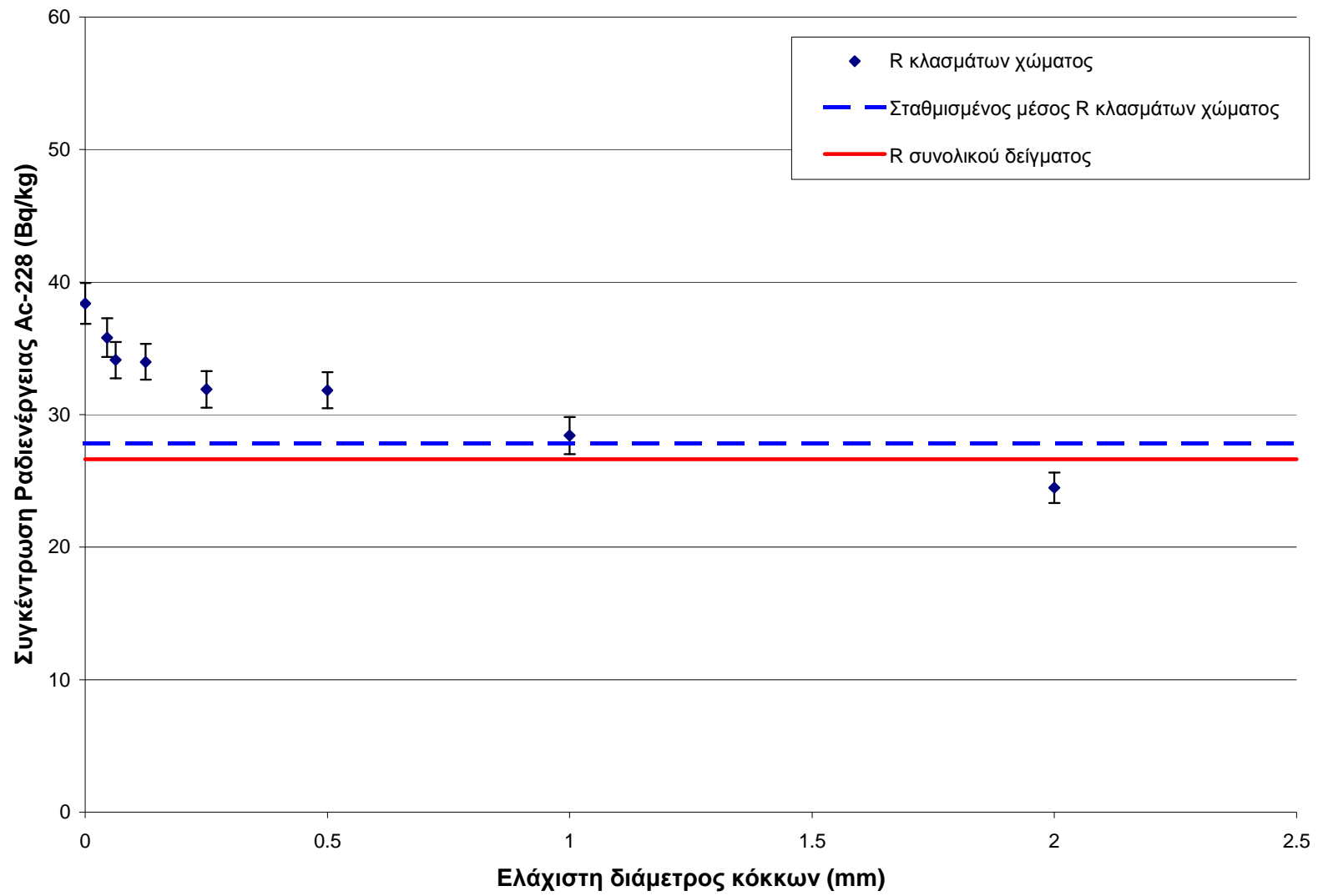




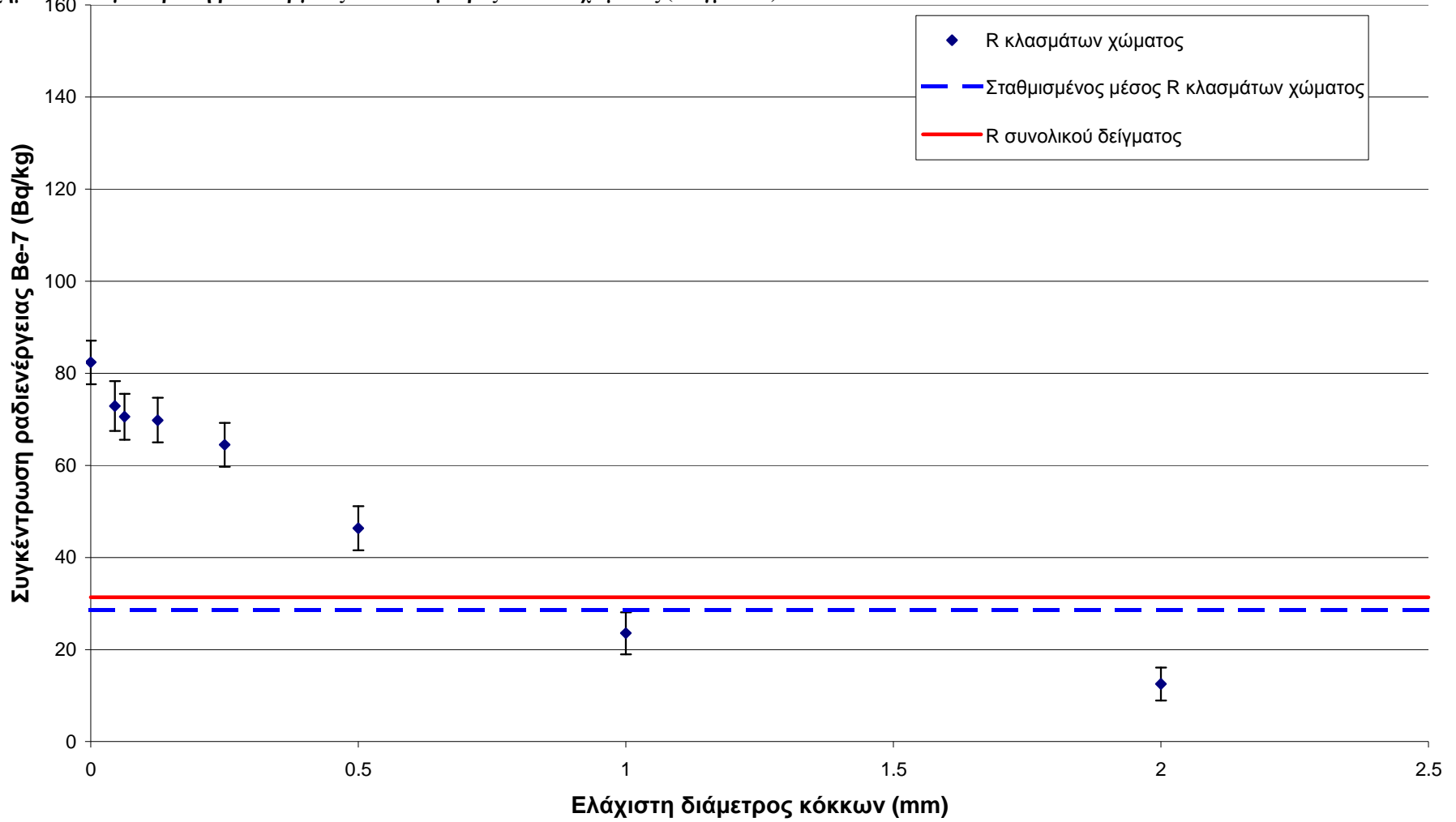
Σχήμα 5-5: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος (Δείγμα 8-1)



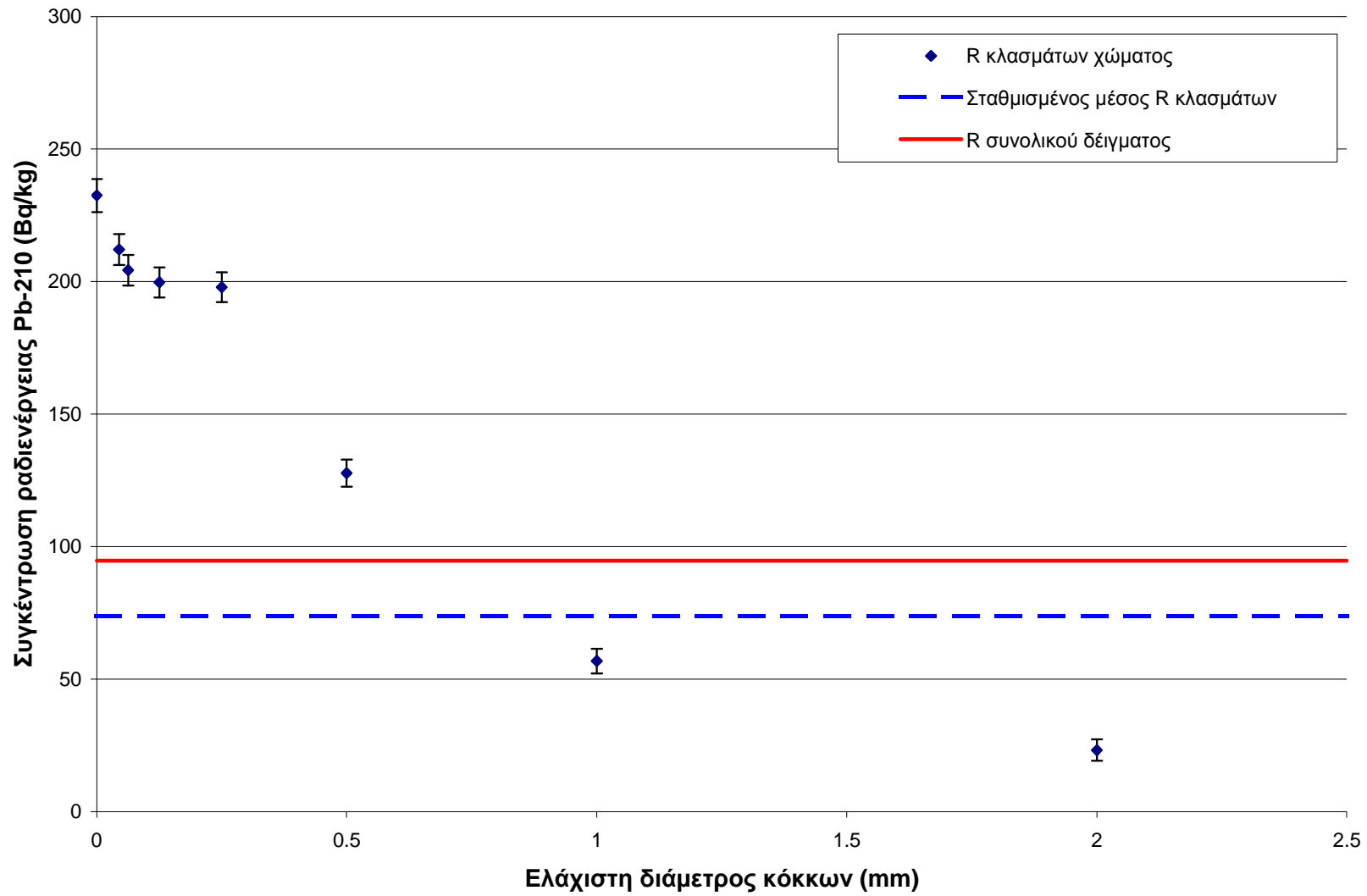
Σχήμα 5-6: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ac}$  – Διάμετρος κόκκων χόματος (Δείγμα 8-1)



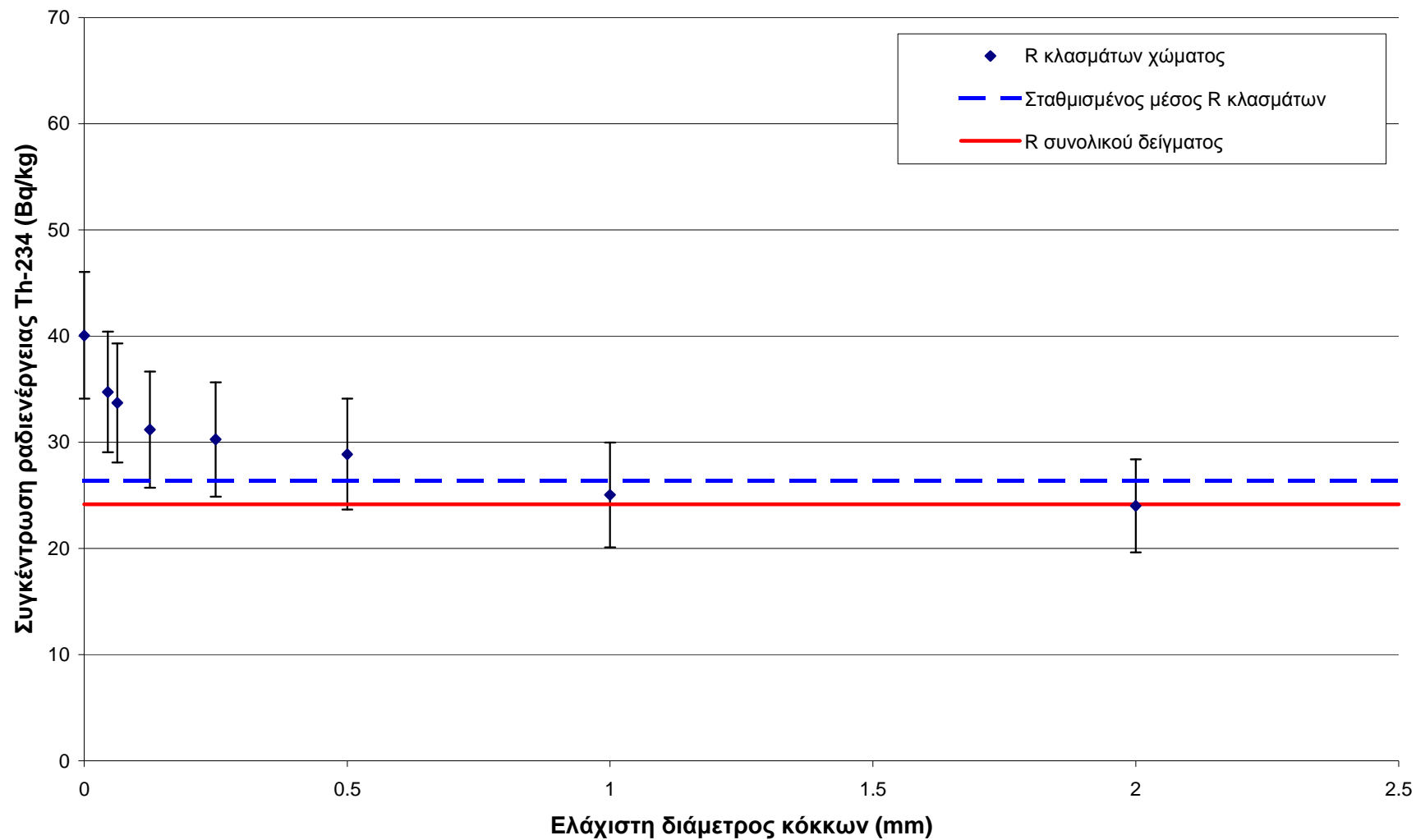
Σχήμα 5-7: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^7\text{Be}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος (Δείγμα 8-1)



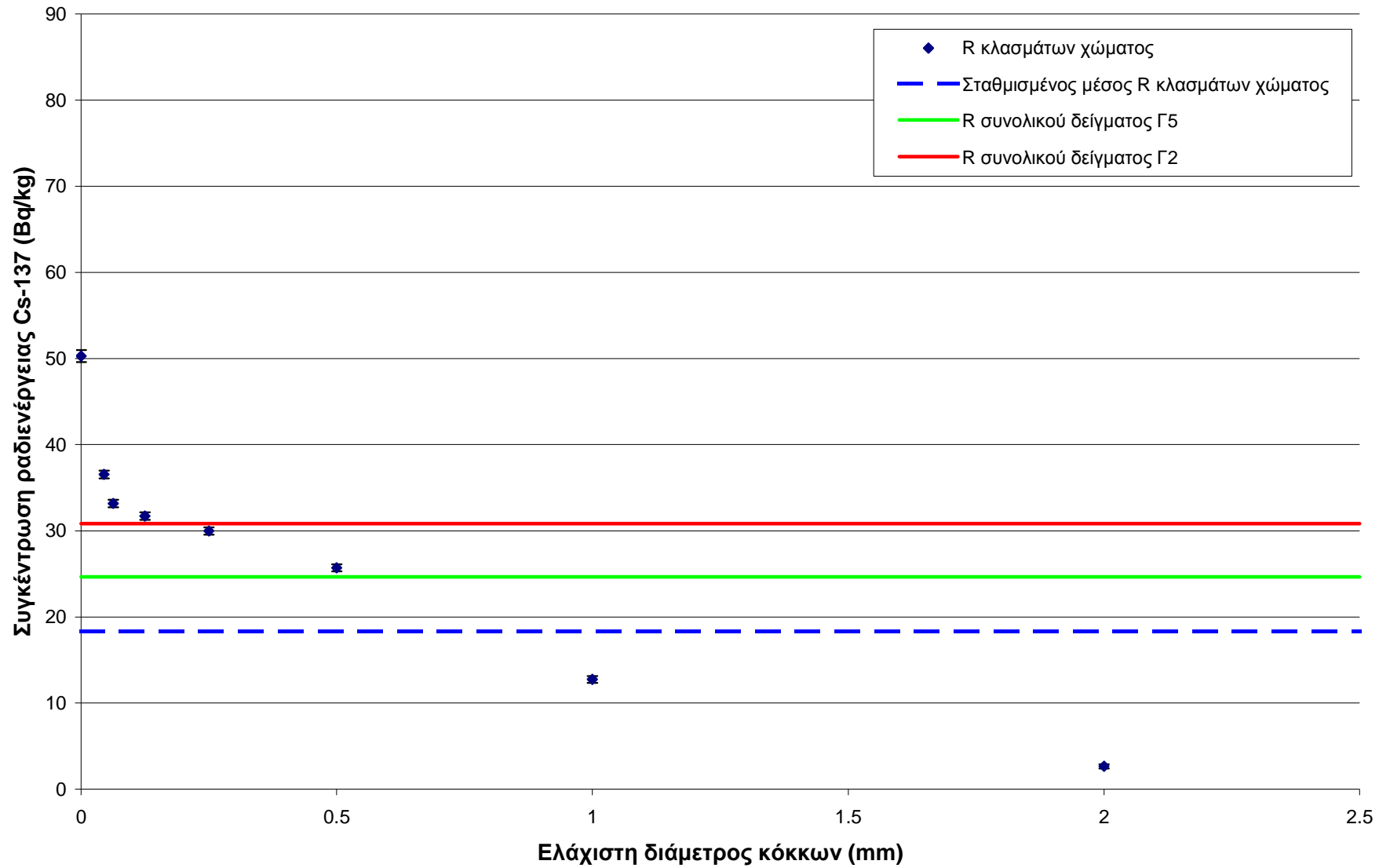
Σχήμα 5-8: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$  – Διάμετρος κόκκων χόματος (Δείγμα 8-1)



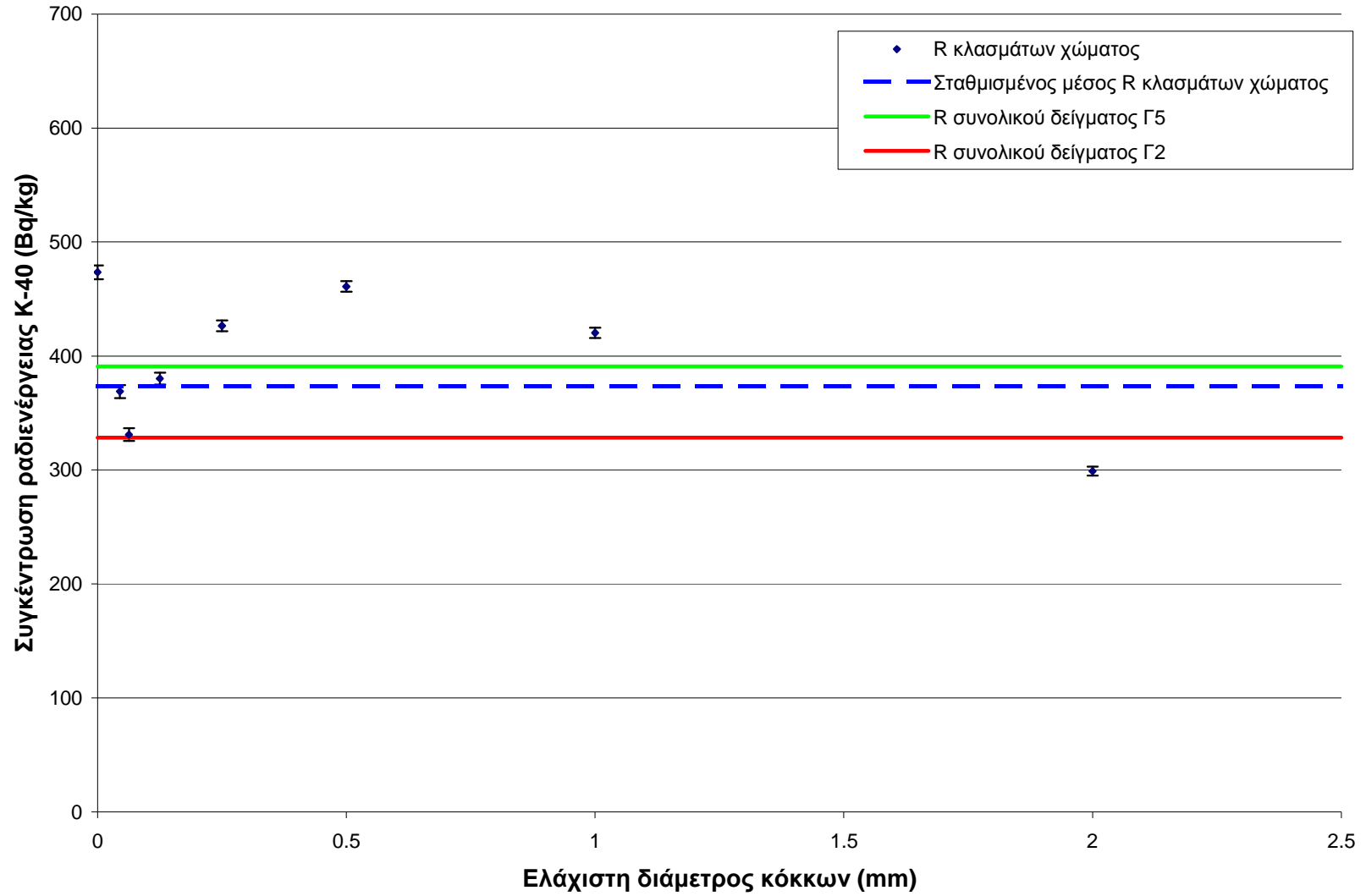
Σχήμα 5-9: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος (Δείγμα 8-1)



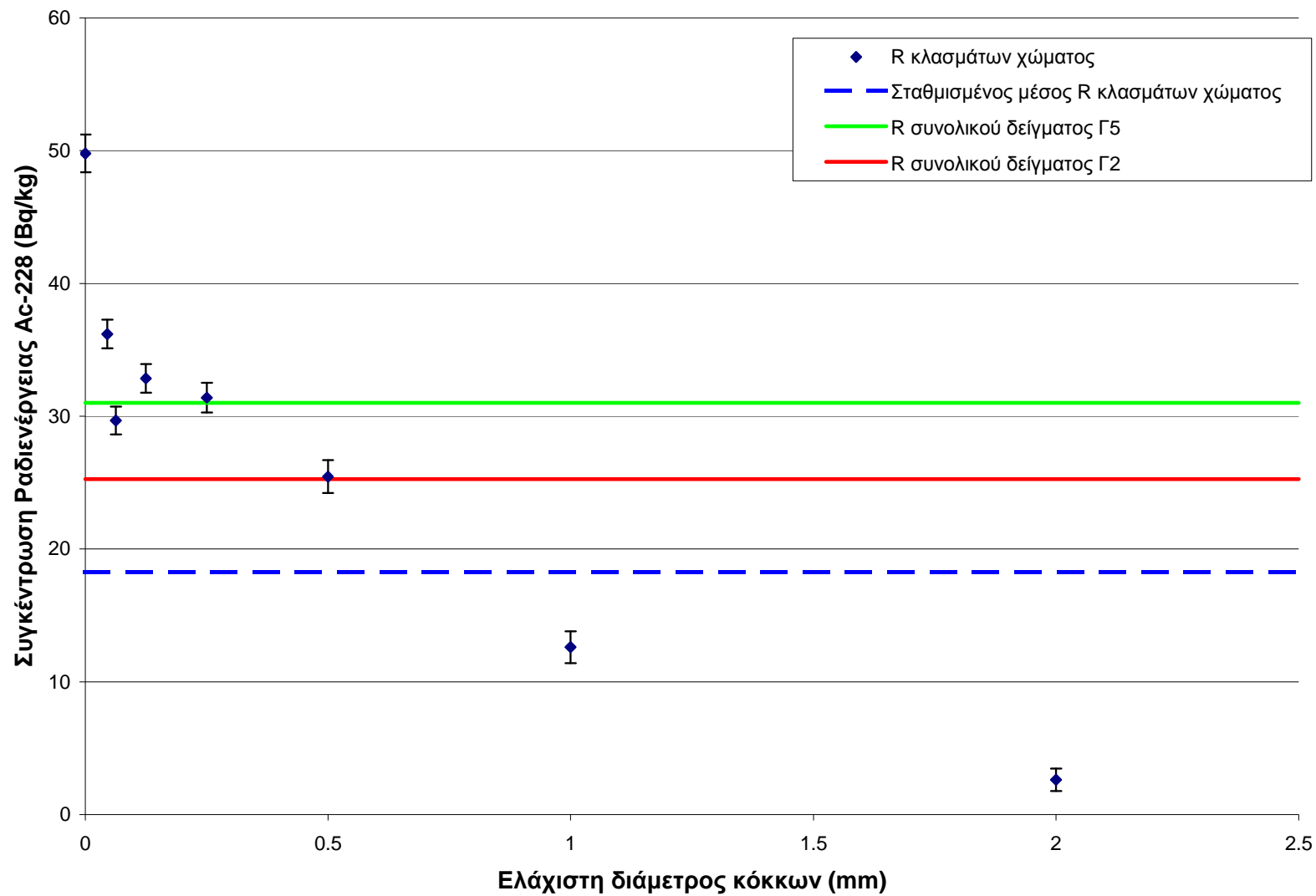
Σχήμα 5-10: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος (Δείγμα 9-1)



Σχήμα 5-11: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{40}\text{K}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος (Δείγμα 9-1)

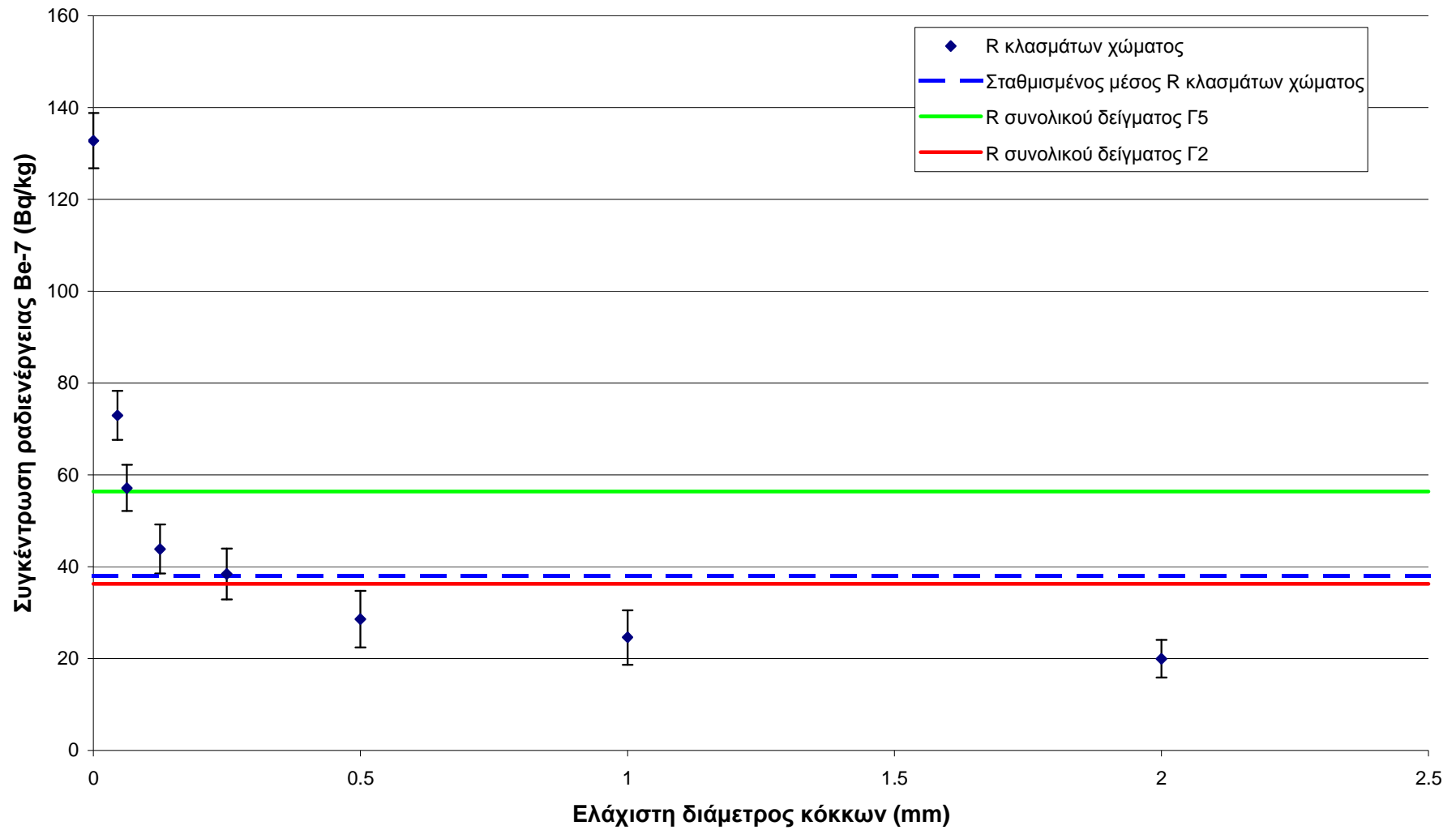


Σχήμα 5-12: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ac}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος (Δείγμα 9-1)

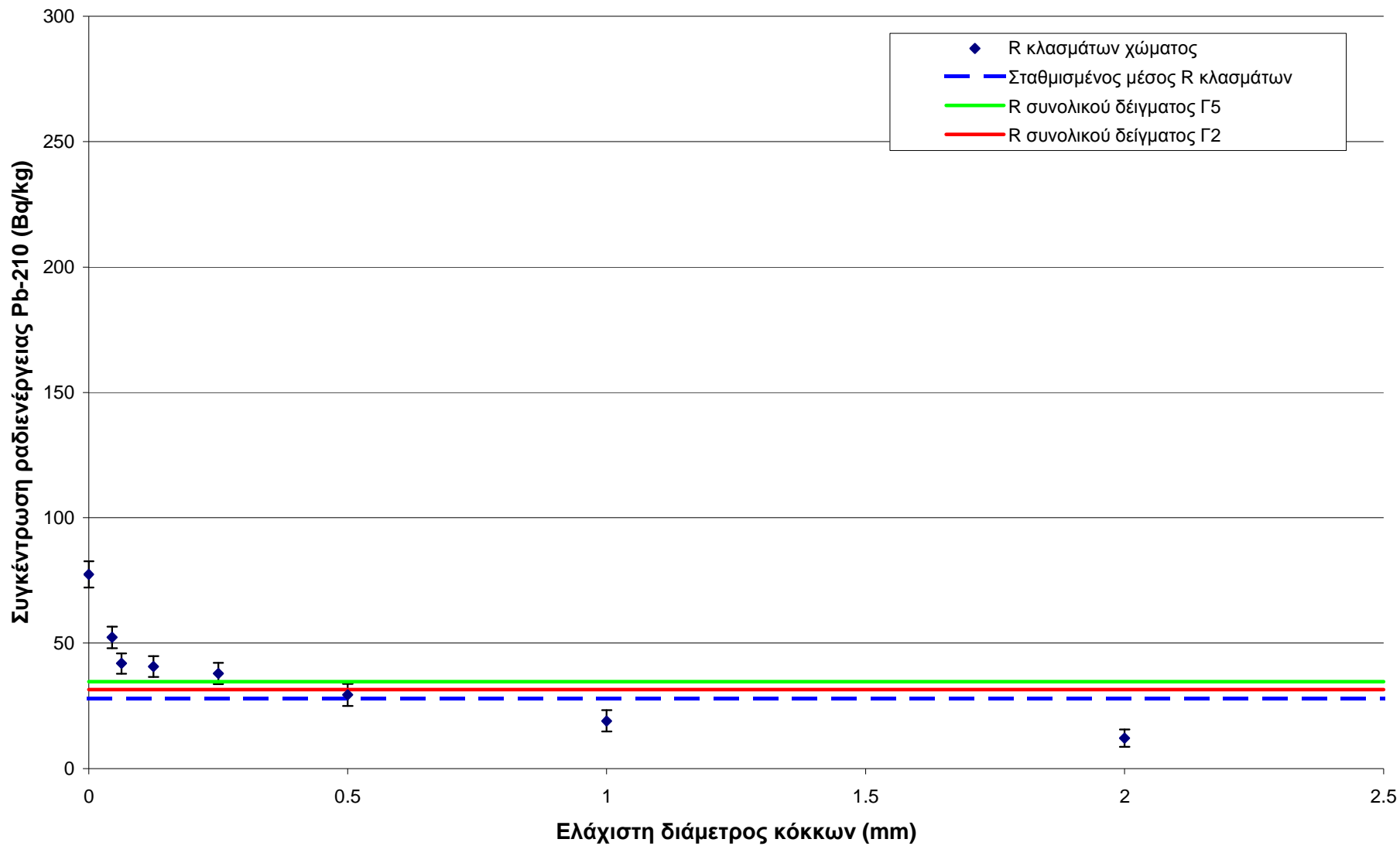




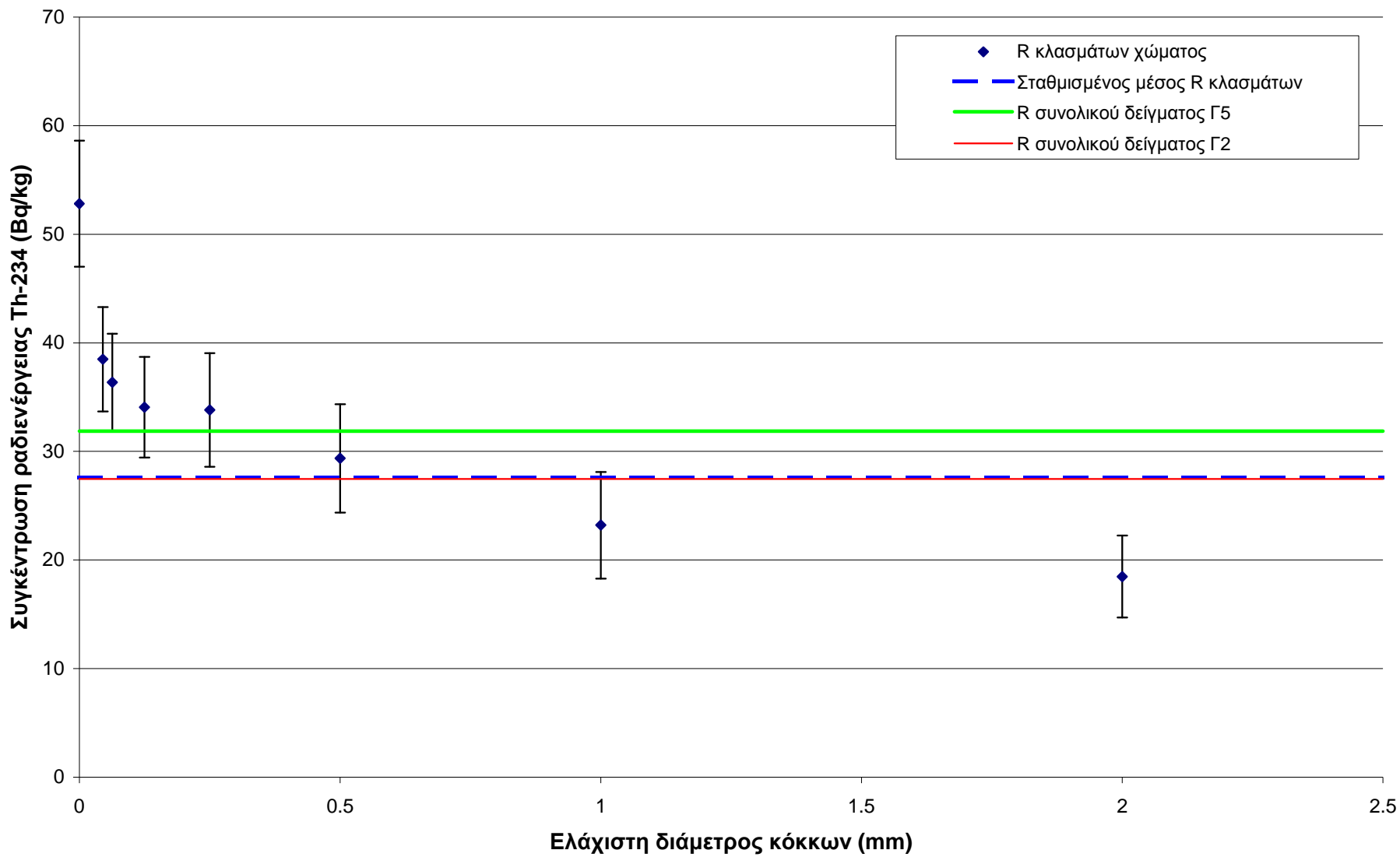
Σχήμα 5-13: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^7\text{Be}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος (Δείγμα 9-1)



Σχήμα 5-14: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος (Δείγμα 9-1)



Σχήμα 5-15: Συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{234}\text{Th}$  – Διάμετρος κόκκων χώματος (Δείγμα 9-1)



## 6 Επίλογος

### 6.1 Περίληψη της Διπλωματικής Εργασίας

Στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ διερευνήθηκε η επίδραση της μεθόδου προετοιμασίας δειγμάτων χώματος που πρόκειται να αναλυθούν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας στη μετρούμενη συγκέντρωση των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ , καθώς και στην ολική αβεβαιότητα της μέτρησης. Με εκτέλεση διαδοχικών πειραμάτων επιχειρήθηκε η εκτίμηση της επίδρασης ορισμένων συνηθισμένων μεθόδων επεξεργασίας δειγμάτων χώματος. Επίσης, μελετήθηκε η συσχέτιση της κοκκομετρίας του χώματος στη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας των υπό μελέτη ισοτόπων. Τέλος, η μέθοδος προετοιμασίας των δειγμάτων που αναπτύχθηκε στα πειράματα της ΔΕ εφαρμόστηκε σε δείγματα χώματος από την περιοχή της Μεγαλόπολης, για να διερευνηθεί αν η μέθοδος αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί σε μελέτες απόθεσης ιπτάμενης τέφρας σε περιοχές που γειτνιάζουν με θερμικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και της ενδεχόμενης επακόλουθης αύξησης της ραδιενέργειας του εδάφους.

#### 6.1.1 Πειράματα μελέτης των μεθόδων προετοιμασίας χώματος

Αρχικά, στα πλαίσια της ΔΕ πραγματοποιήθηκε πείραμα για την εκτίμηση της αβεβαιότητας προετοιμασίας του δείγματος πρωτίστως, αλλά και της αβεβαιότητας λόγω της δειγματοληψίας. Στο πείραμα αυτό, λήφθηκαν δύο δείγματα επιφανειακού χώματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, από δύο γειτονικές θέσεις. Τα δείγματα διαχωρίστηκαν σε τέσσερα υπο-δείγματα το καθένα και αναλύθηκαν φασματοσκοπικά στους ανιχνευτές HPGe και LEGe για τον προσδιορισμό των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ , χωρίς να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία. Επισημαίνεται ότι στη φάση αυτή κατά την προετοιμασία των δειγμάτων ακολουθήθηκε η συνήθης πρακτική που ακολουθείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Με στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, μέσω της μεθόδου ANOVA εκτιμήθηκε η αβεβαιότητα λόγω της προετοιμασίας των δειγμάτων σε επίπεδο  $1\sigma$  ίση με 1.1% για το  $^{40}\text{K}$ , 2.7% για το  $^{210}\text{Pb}$  και 7% για το  $^{137}\text{Cs}$ . Δεδομένου ότι αυτές οι τιμές αβεβαιότητας είναι συγκρίσιμες ή και υψηλότερες ( $^{137}\text{Cs}$ ) από την αβεβαιότητα της φασματοσκοπικής ανάλυσης, διαπιστώθηκε ότι η επίδραση της προετοιμασίας είναι πράγματι αντικείμενο περαιτέρω μελέτης και πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν σε έρευνες συγκέντρωσης ραδιενέργειας δειγμάτων

χώματος, ανάλογα φυσικά και με τις ανάγκες κάθε πειράματος. Για τα ισότοπα  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{234}\text{Th}$  η αβεβαιότητα προετοιμασίας δεν ήταν στατιστικά σημαντική.

Επίσης, από το ίδιο πείραμα έγινε και μια εκτίμηση της αβεβαιότητας δειγματοληψίας. Διαπιστώθηκε ότι μόνο για το  $^{137}\text{Cs}$  η αβεβαιότητα δειγματοληψίας είναι στατιστικά σημαντική και εκτιμήθηκε σε επίπεδο  $1\sigma$  ίση με 15.2%.

Με το δεύτερο κατά σειρά πείραμα που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ, μελετήθηκε η επίδραση της αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος, δηλαδή του κλάσματος με κόκκους άνω των 2 mm. Λήφθηκαν δύο δείγματα επιφανειακού χώματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, τα οποία ομογενοποιήθηκαν για να περιοριστεί η αβεβαιότητα της δειγματοληψίας. Το ομογενοποιημένο δείγμα χωρίστηκε σε 8 υπο-δείγματα, εκ των οποίων τέσσερα συσκευάστηκαν χωρίς περαιτέρω επεξεργασία και τέσσερα υπέστησαν κοσκίνισμα και συνακόλουθη αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος. Όλα τα υπο-δείγματα αναλύθηκαν φασματοσκοπικά στους ανιχνευτές HPGe και LEGe για τον προσδιορισμό των ισωτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Με στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, παρατηρήθηκε ότι η αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος αυξάνει σημαντικά τη συγκέντρωση ραδιενέργειας για τα ισότοπα  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{210}\text{Pb}$ . Η αύξηση αυτή ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι το χονδρόκοκκο κλάσμα αποτελείται κυρίως από χαλίκια και αναμένεται να παρουσιάζει διαφορετική σύσταση από το χώμα. Αντιθέτως, για το  $^{234}\text{Th}$  δεν παρατηρήθηκε σημαντική μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας, ενώ για το  $^{137}\text{Cs}$  δεν προέκυψε σαφές συμπέρασμα, καθώς η τιμή σύγκρισης του σχετικού ελέγχου βρισκόταν στην περιοχή αβεβαιότητας.

Για όλα τα υπό μελέτη ισότοπα δεν διαπιστώθηκε σημαντική επίδραση της αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος όσον αφορά στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων. Μάλιστα, διαπιστώθηκε ότι η καλή ομογενοποίηση του αρχικού δείγματος ήταν επαρκής για την αντιπροσωπευτική συσκευασία των δειγμάτων, ακόμα και χωρίς την αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.

Από το πείραμα αυτό διαπιστώθηκε ότι, από τη στιγμή που η παρουσία του χονδρόκοκκου κλάσματος επηρεάζει τα αποτελέσματα, και καθώς η αφαίρεση λίθων και χαλικιών υπόκειται στην εμπειρία αυτού που συσκευάζει, καλό θα ήταν να υιοθετηθεί μία τυποποιημένη διαδικασία αφαίρεσης του χονδρόκοκκου κλάσματος,

ώστε να εφαρμόζονται αντικειμενικά κριτήρια για τον αποκλεισμό τέτοιων υλικών από το δείγμα.

Με το τρίτο κατά σειρά πείραμα που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ, μελετήθηκε η επίδραση της λειοτρίβισης μέρους ή ολόκληρης της μάζας του χώματος. Λήφθηκαν δύο δείγματα επιφανειακού χώματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, κάθε ένα από τα οποία διαχωρίστηκε σε 4 υπο-δείγματα. Στην πρώτη τετράδα αφαιρέθηκε το χονδρόκοκκο κλάσμα και υπέστη λειοτρίβιση το χόμα άνω των 125 μm. Στη δεύτερη τετράδα, όλη η ποσότητα άνω των 125 μm υπέστη λειοτρίβιση, συμπεριλαμβανόμενου και του χονδρόκοκκου κλάσματος. Όλα τα υπο-δείγματα αναλύθηκαν φασματοσκοπικά στους ανιχνευτές HPGe και LEGe για τον προσδιορισμό των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Με στατιστική επεξεργασία των δεδομένων των αναλύσεων, παρατηρήθηκε ότι η λειοτρίβιση του δείγματος χωρίς πρώτα να υπάρξει αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας για τα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{210}\text{Pb}$ , προκαλώντας σημαντική υποεκτίμησή της. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής θα πρέπει να εξετάζεται κατά περίπτωση, ανάλογα με τους σκοπούς της δειγματοληψίας.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η λειοτρίβιση του δείγματος μετά από αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος (άνω των 2 mm) δεν μειώνει σημαντικά την αβεβαιότητα προετοιμασίας, σε σχέση με τη μέθοδο επεξεργασίας που περιλαμβάνει μόνο αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος. Δεδομένου ότι η διαδικασία της λειοτρίβισης είναι χρονοβόρα, θα μπορούσε να παραληφθεί, στη περίπτωση που εφαρμόζεται αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.

Με το τέταρτο κατά σειρά πείραμα που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ, μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας ξήρανσης. Λήφθηκε ένα δείγμα επιφανειακού χώματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και διαχωρίστηκε σε 4 υπο-δείγματα, τα οποία κοσκινίστηκαν προς αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος. Στη συνέχεια, το ένα υπο-δείγμα υπέστη αεροξήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ τα υπόλοιπα ξηράθηκαν σε φούρνο σε θερμοκρασίες 50, 100 και 150 °C, αντίστοιχα. Όλα τα υπο-δείγματα αναλύθηκαν φασματοσκοπικά στους ανιχνευτές HPGe και LEGe για τον προσδιορισμό των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Από το πείραμα επίδρασης της θερμοκρασίας ξήρανσης προέκυψε το συμπέρασμα ότι η ξήρανση του δείγματος σε φούρνο, ακόμα και στους 150 °C, δεν επιδρά σημαντικά στη μετρούμενη ραδιενέργεια, για κανένα από τα υπό μελέτη ισότοπα. Συνεπώς, η χρονοβόρος διαδικασία της αεροξηρανσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να αντικατασταθεί από την πολύ πιο σύντομη διαδικασία της ξήρανσης του χώματος με θέρμανση σε φούρνο.

### **6.1.2 Πείραμα μελέτης της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα διαφορετικά κλάσματα χώματος**

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε πείραμα για τη μελέτη της επίδρασης της διαμέτρου των κόκκων του κλάσματος στη μετρούμενη συγκέντρωση των υπό μελέτη ισωτόπων. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε λήψη ενός δείγματος επιφανειακού χώματος μάζας 10 kg από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Το δείγμα αεροξηράνθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ομογενοποιήθηκε και κοσκινίστηκε, με αποτέλεσμα το διαχωρισμό του σε 8 κοκκομετρικά κλάσματα. Από κάθε κλάσμα συσκευάστηκε ένα υπο-δείγμα, το οποίο αναλύθηκε με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας στους ανιχνευτές HPGe και LEGe για τον προσδιορισμό των ισωτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Με τα δεδομένα των φασματοσκοπικών αναλύσεων σχεδιάστηκαν διαγράμματα συγκέντρωσης ραδιενέργειας – διάμετρου κόκκου για κάθε κλάσμα. Από τα διαγράμματα αυτά διαπιστώθηκε ότι η συγκέντρωση ραδιενέργειας των δύο πιο λεπτόκοκκων κλασμάτων είναι αισθητά αυξημένη για όλα τα ισότοπα. Αντιθέτως, η συγκέντρωση ραδιενέργειας του κλάσματος άνω των 2 mm είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή όλων των άλλων κλασμάτων και κατά συνέπεια και της μέσης τιμής. Δεδομένου ότι το κλάσμα αυτό αποτελεί ποσοστό άνω του 20% της ολικής μάζας του χώματος, η παρουσία του στο αναλυόμενο δείγμα μειώνει σημαντικά την ολική τιμή ραδιενέργειας των δειγμάτων.

### **6.1.3 Δειγματοληψία Μεγαλόπολης**

Η μέθοδος διαχωρισμού του δείγματος χώματος στα επιμέρους κοκκομετρικά του κλάσματα εφαρμόστηκε σε δείγματα από την περιοχή της Μεγαλόπολης. Για τις ανάγκες του πειράματος πραγματοποιήθηκε μεγάλη δειγματοληψία στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Επιλέχθηκαν τέσσερις θέσεις δειγματοληψίας και από κάθε μία συλλέχθηκε ένα ζεύγος δειγμάτων (επιφανειακό και σε βάθος 10-20 cm).

Από τα ληφθέντα δείγματα αναλύθηκαν μόνο δύο επιφανειακά λόγω περιορισμών χρόνου και διαθέσιμων αναιχνευτικών διατάξεων. Τα δείγματα αυτά υπέστησαν την ίδια επεξεργασία με αυτήν που αναφέρθηκε προηγουμένως, προς διαχωρισμό στα κοκκομετρικά κλάσματα. Από κάθε κλάσμα συσκευάστηκε ένα υπο-δείγμα, το οποίο αναλύθηκε με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας στον ανιχνευτή ΧtRa για τον προσδιορισμό των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{234}\text{Th}$ .

Η συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  και στα δύο αρχικά χωρίς επεξεργασία δείγματα, είναι κατά πολύ μικρότερη αυτής που προκύπτει από τους ραδιομετρικούς χάρτες που έχει σχεδιάσει το ΕΠΤ-ΕΜΠ κατόπιν παλαιότερης δειγματοληψίας. Το γεγονός αυτό εν μέρει οφείλεται στην απομείωση του ισοτόπου λόγω ραδιενεργού διάσπασης, το οποίο έχει χρόνο ημιζωής περίπου 30 χρόνια, και εν μέρει στο φαινόμενο της κατακόρυφης και οριζόντιας μετανάστευσης.

Με τα αποτελέσματα των φασματοσκοπικών αναλύσεων των διαφόρων κοκκομετρικών κλασμάτων του χώματος, σχεδιάστηκαν διαγράμματα συγκέντρωσης ραδιενέργειας – διάμετρου κόκκου για κάθε κλάσμα. Για όλα τα υπό μελέτη ισότοπα παρατηρήθηκε έντονη διακύμανση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του χώματος. Πιο συγκεκριμένα, τα πιο χονδρόκοκκα κλάσματα παρουσίαζαν πολύ μικρή συγκέντρωση ραδιενέργειας, ενώ για τα πλέον λεπτόκοκκα κλάσματα η συγκέντρωση έπαιρνε τη μέγιστη τιμή της. Αυτό ήταν ιδιαίτερα εμφανές για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  και  $^{40}\text{K}$ . Επισημαίνεται ότι δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση, όσον αφορά στην τάση των διαφόρων ισοτόπων να συγκεντρώνονται στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα, μεταξύ των δειγμάτων από τη Μεγαλόπολη και του δείγματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Συνεπώς, δεν μπορεί να προκύψει ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την επίδραση της απόθεσης της ιπτάμενης τέφρας στην αυξημένη συγκέντρωση των λεπτόκοκκων κλασμάτων και θα πρέπει να πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα, και κυρίως να αναλυθούν τα δείγματα που λήφθηκαν σε βάθος.

Ιδιαίτερη συμπεριφορά παρουσιάζει το  $^{40}\text{K}$ , τόσο στα δείγματα της Μεγαλόπολης όσο και σε αυτό από την Πολυτεχνειούπολη. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές για το πλέον λεπτόκοκκο κλάσμα, εν συνεχεία, όσο αυξάνει το μέγεθος του κόκκου παρουσιάζει μείωση της ραδιενέργειας μέχρι μία τιμή περί τα 125 $\mu\text{m}$ , και από το σημείο αυτό παρουσιάζει πάλι μικρή αύξηση με το μέγεθος του κόκκου μέχρι περίπου κόκκο 1mm. Από το σημείο αυτό και μετά παρουσιάζει εκ νέου μείωση της



ραδιενέργειας. Βεβαίως το πλήθος των δειγμάτων που παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό δεν είναι μεγάλο, αλλά η συνέπεια με την οποία εμφανίζεται δημιουργεί την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνησή του.

Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα διαφορετικά κοκκομετρικά κλάσματα του χώματος σε ισότοπα όπως το  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και το  $^{137}\text{Cs}$ , θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλής ακρίβειας μετρήσεις, όπως σε εφαρμογές των ισωτόπων αυτών για τον προσδιορισμό του ρυθμού ιζηματογένεσης και διάβρωσης.

Ειδικά για το ισότοπο  $^7\text{Be}$  το οποίο παρουσιάζει δυσκολίες στην ανάλυση λόγω του πολύ μικρού χρόνου ημιζωής του, προκειμένου να ληφθούν κατά το δυνατό ακριβή αποτελέσματα, είναι απαραίτητη η άμεση φασματοσκοπική ανάλυση ενός δείγματος χώματος μετά από τη λήψη του. Στην παρούσα έρευνα η συμπεριφορά του ισωτόπου μελετήθηκε, όχι όμως πλήρως λόγω περιορισμών στη διάθεση του ανιχνευτικού εξοπλισμού.

## **6.2 Προοπτικές μελλοντικής έρευνας**

Οι παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μελλοντική έρευνα.

- Διαπιστώθηκε ότι η χρησιμοποιούμενη μέθοδος προετοιμασίας ενός δείγματος επιφανειακού χώματος που πρόκειται να αναλυθεί με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τόσο τη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας όσο και την ολική αβεβαιότητα της μέτρησης. Δεδομένης και της μεγάλης ποικιλίας που εμφανίζει το χώμα στη σύστασή του, η περαιτέρω στατιστική διερεύνηση των μεθόδων προετοιμασίας σε περισσότερα και διαφορετικής προέλευσης δείγματα χώματος μπορεί να οδηγήσει σε γενίκευση των συμπερασμάτων.
- Η μελέτη της συσχέτισης της συγκέντρωσης ραδιενέργειας από το μέγεθος των κόκκων του χώματος πρέπει να γενικευθεί για περισσότερα ισότοπα, όπως παραδείγματος χάριν για το  $^{226}\text{Ra}$ .
- Η συνέχιση και ολοκλήρωση της ανάλυσης των δειγμάτων που λήφθηκαν από την περιοχή της Μεγαλόπολης θα οδηγήσει σε πιο ξεκάθαρα συμπεράσματα

σχετικά με τη διαφοροποίηση της συγκέντρωσης των πιο λεπτόκοκκων κλασμάτων στο χόμα της περιοχής.

- Νέες δειγματοληψίες και αναλύσεις χόματος από περιοχές που παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες, όπως:
  - περιοχές όπου αναμένεται μεγάλη εκροή ραδονίου, όπως οι Θερμοπόλες,
  - κοντά σε ρήγματα,
  - σε περιοχές όπου έχει διαπιστωθεί μεγάλη διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας μεταξύ  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  και  $^{226}\text{Ra}/^{210}\text{Pb}$ , στις οποίες έχει ενδιαφέρον να διερευνηθεί η κινητική των παραπάνω ισοτόπων και η κατανομή τους στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του χόματος.

## Βιβλιογραφία

1. **Anagnostakis M.J., Hinis E.P., Simopoulos S.E. 2002.** *<sup>238</sup>U and its daughter products in Greek surface soils.* Radioactivity in the environment Volume 7 2002
2. **Anagnostakis M.J., Hinis E.P., Simopoulos S.E., Angelopoulos M.G. 1996.** *Natural radioactivity mapping of Greek surface soils.* Environment International Vol. 22 Suppl. 1 pp. S3-S8 1996
3. **Arinc A., Woods D.H., Jerome S.M., Collins S.M., Pearce A.K., Gilligan C.R.D., Chari K.V., Baker M., Petrie N.E., Stroak A.J., Phillips H.C., Harms A.V. 2004.** *Environmental radioactivity comparison exercise 2003 (Overseas report)* National Physical Laboratory 2004
4. **ASTM Standard C999-05. 2009.** *Standard practice for soil sample preparation for the determination of radionuclides.* ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. **Barbizzi S. 2007.** *Workshop on understanding and evaluating radioanalytical measurement uncertainty.* The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics
6. **Bem H., Wiczorkowski P., Budzanowski M. 2002.** *Evaluation of technologically enhanced natural radiation near the coal-fired plants in Lodz region of Poland.* Journal of Environmental Radioactivity 61 (2002) 191-201
7. **Department of Energy (DOE). 1997.** *EML Procedures Manual, HASL-300, 28th ed.* HASL-300-ED.27-Vol 1, DOE, Environmental Measurements Laboratory, New York. (DE91-010178)
8. **De Cort M., Dubois G., Fridman Sh.D., Germenchuk M.G., Izrael Yu. A., Jones A.R., Kelly G.N., Knasnikova E.V., Matveenko I.I., Nazarov I.M., Pokumeiko Yu.M., Sitak V.A., Stukin E.D., Tabachny L.Ya., Tsaturov Yu.S., Avdyushin S.I. 1998.** *Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident.* Luxemburg, Office for Official Publications of the European Communities 1998
9. **de Zorzi P., Belli M., Barbizzi S., Menegon S., Deluisa A. 2002.** *A practical approach to assessment of sampling uncertainty.* Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement 5(7):182–188
10. **de Zorzi P, Barbizzi S, Belli M, Barbina M, Fajgelj A, Jacimovic R, Jeran Z, Menegon S, Pati A, Petruzzelli G, Sansone U, Van der Perk M. 2008.** *Estimation of uncertainty arising from different soil sampling devices: the use of variogram parameters.* Chemosphere 2008 Jan;70(5):745-52
11. **Environmental Protection Agency. 2004.** *Multi-agency radiological laboratory analytical protocols manual (MARLAP). Laboratory sample preparation (12<sup>th</sup> chapter)* Washington, DC: U.S. Government Printing Office; EPA 402-B-04-001A NUREG-1576 NTIS PB2004-105421 2004
12. **Fajgelj A., Belli M. Sansone U. 2007.** *Combining and reporting analytical results.* The Royal Society of Chemistry 2007
13. **Gilmore G., Hemingway J.D., 1995.** *Practical Gamma-Ray Spectrometry.* Νέα Υόρκη, John Wiley & Sons.

14. **International Atomic Energy Agency. 1989.** *Measurement of Radionuclides in Food and the Environment*. Technical Report Series No. 295, IAEA, Vienna, 1989.
15. **JCGM 2008.** *JCGM 100:2008 - Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, Corrected Version 2010*. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
16. **Kathren R.L. 1984.** *Radioactivity in the environment: Sources, distribution and surveillance*. Harwood Academic Publishers 1984
17. **Lyn J.A., Ramsey M.H., Fussell R.J., Wood R. 2003.** *Measurement uncertainty from physical sample preparation: estimation including systematic error*. *Analyst* 128(11):1391-8 2003
18. **Montgomery D.C., Runger G.C., Hubele N.F. 2007.** *Engineering statistics*. 4<sup>th</sup> Edition John Wiley & Sons, Inc 2007
19. **Papaefthymiou H., Kritidis P., Anousis J., Sarafidou J. 2005.** *Comparative assessment of natural radioactivity in fallout samples from Patras and Megalopolis, Greece*. *Journal of Environmental Radioactivity* 78 (2005) 249-265
20. **Papastefanou C., Manolopoulou M., Charalambous S. 1988.** *Radioecological measurements in the coal power plant environment*. *Radiation Protection Dosimetry* Vol. 24 No. ¼ pp. 439-443 (1988)
21. **Papp Z., Dezso Z., Daroczy S. 2002.** *Significant radioactive contamination of soil around a coal-fired thermal power plant*. *Journal of Environmental Radioactivity* 59 (2002) 191-205
22. **Petropoulos N.P., Hinis E.P., Simopoulos S.E. 1996.** *<sup>137</sup>Cs Chernobyl fallout in Greece and its associated radiological impact*. *Environment International*, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S369-S373,1996
23. **Pfennig G., Klewe-Nebenius H., Seelmann-Eggebert W. 1998.** *Karlsruher nuclidkarte*. Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt 1998.
24. **Ramsey M.H., Ellison S.L.R. 2007.** *Eurachem / EUROLAB / CITAC / Nordtest / AMC Guide: Measurement uncertainty arising from sampling: a guide to methods and approaches*. Technical Report. Eurachem
25. **Rouni P.K., Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J., Hinis E.P., Simopoulos S.E. 2001.** *Radioenvironmental survey of the Megalopolis lignite field basin*. *The Science of the Total Environment*, 272 (2001); 261-272
26. **Simopoulos S.E. 1989.** *Soil sampling and Cs-137 analysis of the Chernobyl fallout in Greece*. *Applied Radiation and Isotopes* Vol.40 No 7 pp.607-615 1989
27. **Scott E.M., Dixon P., Voigt G., Whicker W. 2008.** *Choice and criteria for selection of sampling strategies in environmental radioactivity monitoring*. *Applied Radiation and Isotopes* 66 (2008) 1575– 1581
28. **Tadmor J. 1986.** *Radioactivity from coal-fired power plants: A review*. *Journal of Environmental Radioactivity* 4 (1986) 177-204
29. **Terence A. 1997.** *Particle size measurement. Volume 1*. 5th Edition Chapman and Hall 1997
30. **United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 2000.** *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR 2000 Report Vol. I
31. **U.S. Atomic Energy Commission 1974.** *Measurement of radionuclides in the environment – Sampling and analysis of plutonium in soil*. U.S. AEC Regulatory Guide 4.5 1974

32. Van der Perk M., de Zorzi P., Barbizzi S., Belli M., Fajgelj A., Sansone U., Jeran Z., Jacimovic R. 2008. *The effect of short-range spatial variability on soil sampling uncertainty*. Applied Radiation and Isotopes 66 (2008) 1582–1587
33. Zeevaert Th., Sweeck L., Vanmarcke H. 2006. *The radiological impact from airborne routine discharges of a modern coal-fired power plant*. Journal of Environmental Radioactivity 85 (2006) 1-22
34. Αναγνωστάκης Μ.Ι. 2005α. *Βοήθημα στο μάθημα Ραδιοπεριβαλλοντική Ανάλυση και Προστασία*. Αθήνα 2005
35. Αναγνωστάκης Μ.Ι. 2005β. *Βοήθημα στο μάθημα Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα & Αναλύσεις*. Αθήνα 2005
36. Βασιλοπούλου Θ. 2008. *Προσδιορισμός συντελεστών διόρθωσης απόδοσης ανιχνευτή HPGe λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, μέσω προσομοίωσης MONTE-CARLO* Διπλωματική εργασία ΕΠΤ-ΕΜΠ Αθήνα 2008
37. Καράγγελος Δ.Ι. 2008. *Ραδιοπεριβαλλοντική και συνακόλουθες εφαρμογές*. Διδακτορική διατριβή ΕΠΤ-ΕΜΠ Αθήνα 2008
38. Καρφόπουλος Κ. 2010. *Ανάπτυξη και εφαρμογή μετρητικών τεχνικών για την ανάλυση της φυσικής και τεχνολογικά επαγόμενης ραδιενέργειας σε οικοσυστήματα* Διδακτορική διατριβή ΕΠΤ-ΕΜΠ Αθήνα (Υπό εκπόνηση)
39. Λεωνίδου Δ. 1984. *Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολιών και ύλης – Δοσιμετρία – Θωράκιση* Αθήνα 1984
40. Παναγιωτόπουλος Κ.Π. 1984. *Εδαφοφυσική*. Γιαχούδη – Γιαπούλη 1984
41. Παπαδόπουλος Ν. 2010. *Μοντέλα διακίνησης και εναπόθεσης στερεών σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας στο περιβάλλον και συνακόλουθες ραδιολογικές επιπτώσεις στη λεκάνη της Μεγαλόπολης*. Διδακτορική διατριβή ΕΠΤ-ΕΜΠ Αθήνα (Υπό εκπόνηση)
42. Παπανδρέου Σ. 2009. *Προσδιορισμός του ισοτόπου κοσμικής προέλευσης  $^7\text{Be}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ*. Διπλωματική εργασία ΕΠΤ-ΕΜΠ Αθήνα 2009
43. Πέππας Θ. 2008. *Εγκατάσταση και παραμετρική μελέτη διάταξης ανάλυσης κοκκομετρίας - εφαρμογή στην κοκκομετρική ανάλυση και τον προσδιορισμό των ραδιολογικών χαρακτηριστικών των διαφόρων κλασμάτων ιπταμένης τέφρας*. Διπλωματική Εργασία ΕΠΤ-ΕΜΠ. Αθήνα 2008.
44. Πρέντζα Λ. 2009. *Εγκατάσταση και παραμετρική μελέτη εξοπλισμού λειοτρίβισης περιβαλλοντικών δειγμάτων και εφαρμογή στη ραδιοπεριβαλλοντική ανάλυση*. Διπλωματική Εργασία ΕΠΤ-ΕΜΠ. Αθήνα 2009.
45. Σιμόπουλος Σ.Ε. 1989. *Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών*. Β' Έκδοση Αθήνα 1989
46. Σφακιανάκη Μ., Μαγαλιού Κ., Μπότσαρης Ι. 2009. *Έδαφος: Διάβρωση – Ερημοποίηση – Ρύπανση*. Προγράμματα ανοικτών περιβαλλοντικών τάξεων «Καλλιστώ»

## Παράρτημα 1 - Κατάλογος δειγματοληψιών

<i>Αριθμός δειγματοληψίας</i>	<i>Ημερομηνία</i>	<i>Ώρα</i>	<i>Θέση δειγματοληψίας</i>	<i>Συντεταγμένες θέσεων δειγματοληψίας</i>	<i>Ληφθέν δείγμα</i>	<i>Μάζα δείγματος (gr)</i>
1	21/10/2009	9:00	Πολυτεχνειούπολη 1	37.9747 – 23.7884	1-1	2816
					1-2	3270
2	30/11/2009	15:20	Πολυτεχνειούπολη 1	37.9747 – 23.7884	2-1	3520
					2-2	10300
3	18/12/2009	13:40	Πολυτεχνειούπολη 1	37.9747 – 23.7884	3-1	2980
4	11/1/2010	12:30	Πολυτεχνειούπολη 1	37.9747 – 23.7884	4-1	3002
5	31/3/2010	10:00	Πολυτεχνειούπολη 1	37.9747 – 23.7884	5-1	2568
					5-2	2368
6	14/4/2010	11:25	Κατσίμπαλης	37.4533 – 22.0924	6-1	7200
					6-2	8360
					6-3	11400
7	14/4/2010	13:00	Δρόμος Κατσίμπαλη - Καρύταινα	37.4825 – 22.0556	7-1	8300
					7-2	14400
8	14/4/2010	15:00	Κουρουνιός	37.4562 – 22.0389	8-1	11500
					8-2	13700
9	14/4/2010	16:30	Καρυές προς Καστανοχώρι	37.4177 – 22.0406	9-1	12500
					9-2	14100

## Παράρτημα 2 - Φόρμες δειγματοληψιών

ΘΕΣΗ: Πολυτεχνειούπολη 1<sup>η</sup>  
Περιφερειακός, προς τριφύτα "ΗΡΑΚΛΗΣ"

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 9/11/09

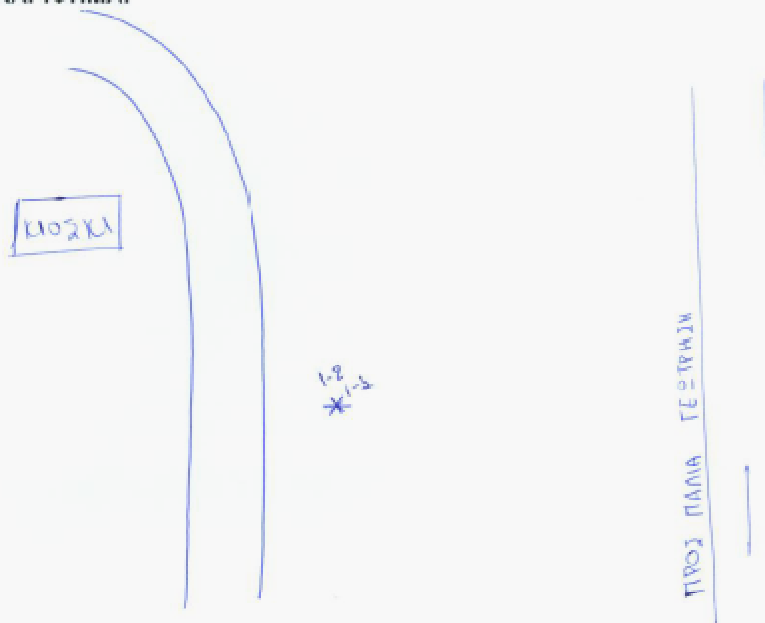
ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ: 37,9747 (γεωγραφικός)  
93,7884 (γεωγραφικός)

ΩΡΑ: 9.00

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΕΣ: Μ.Ι. Αναγνωστάκης  
Δ. Καράγιωγος  
Ε. Παλαφάρα

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ: 1

ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ:



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

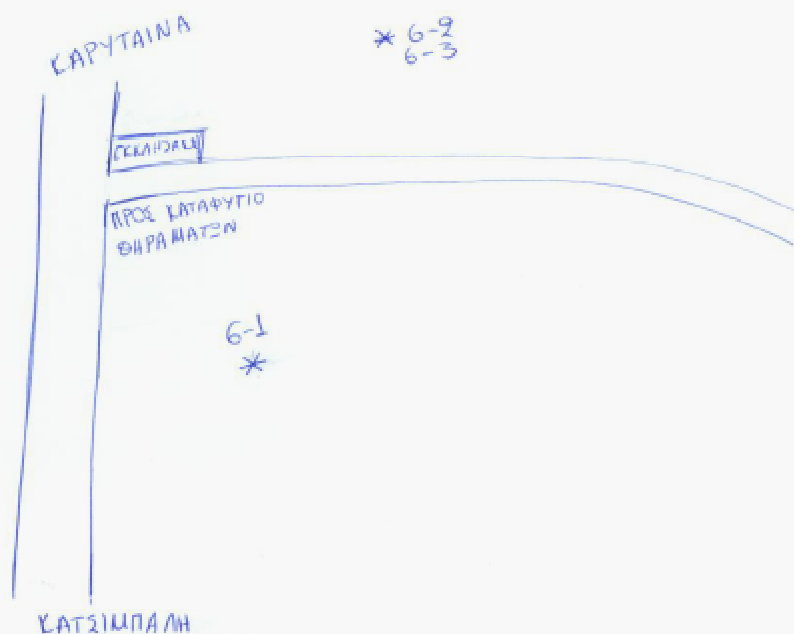
ΘΕΣΗ: ΚΑΤΣΙΜΠΑΛΗΣ  
Διακλάδωση προς Καταφύγιο  
Θηραμάτων και Άγιο Αθανάσιο  
ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΟΣ: 37.4533  
92.0924.  
ΥΨΟΜΕΤΡΟ: 400m  
ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΕΣ: Κ. Ι. Αναγνωστάκης  
Ο. Καραγιάννης  
Ε. Παλαφάρα

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 14/4/2010

ΩΡΑ: 11:24

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ: 6

ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ:



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

VICTOREEN : 75m Sv/hr



ΘΕΣΗ: Δρόμος Κασιγιάτης-Καρύταινα

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 14/4/2010

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ:  $(37^{\circ} 28' 57'')$  37.4825  
 $(22^{\circ} 3' 20'')$  22.0536

ΩΡΑ: 19.56

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΕΣ: <sup>ΥΠΟΒΕΒΟ 430mm</sup>  
Α.Ι. Αναγνωστάκης  
Δ. Καραγιάννης  
Ε. Παλαφάρα

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ: 7

ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ:



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

VICTOREEN: 95mSv/hr

ΘΕΣΗ: Καρραυιού

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 14/4/2010

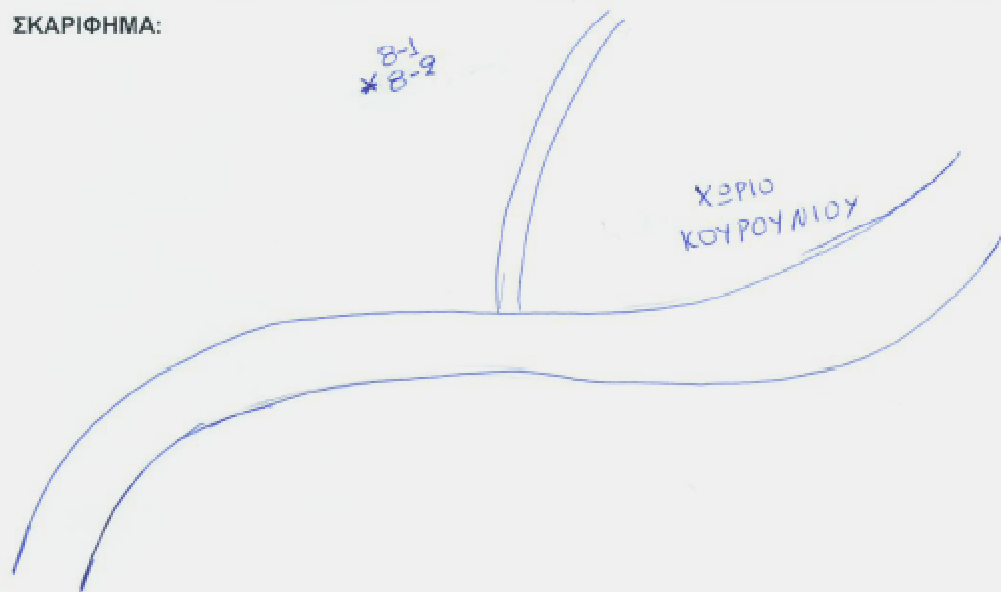
ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ: 37.4569  
22.0383

ΩΡΑ: 15:01

ΥΨΟΜΕΤΡΟ 688m  
ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΕΣ: Ν.Ι. Αναγνωστάκης  
Ε. Καραγιάννης  
Ε. Παλαφάρα

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ: 8

ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ:



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

ΘΕΣΗ: Καρπία προς  
Καοσανοχώρι

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 14/4/2010

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΟΣ: 37.41TF

ΩΡΑ: 16:30

89.0406  
431m  
ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΕΣ: Μ.Ι. Αναγνωστάκης  
Δ. Καραβιδας  
Ε. Παλαφάρας

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ: 9

ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ: ΚΑΣΤΑΝΟΧΩΡΙ



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

VICTOREEN: 100ms/hr

### Παράρτημα 3 - Σύγκριση μετρούμενης ραδιενέργειας των ισοτόπων $^{137}\text{Cs}$ και $^{40}\text{K}$ στους ανιχνευτές HPGe και LEGe

Στα πειράματα που περιγράφηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο κάθε δείγμα αναλύθηκε φασματοσκοπικά στους ανιχνευτές HPGe και LEGe. Η συγκέντρωση των ισοτόπων  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$  προσδιορίστηκε και με τους δύο ανιχνευτές. Για τη στατιστική σύγκριση των μετρήσεων των δύο ανιχνευτών θα χρησιμοποιηθούν τα δείγματα των πειραμάτων επίδρασης του χονδρόκοκκου κλάσματος (MS510-517) και επίδρασης της λειοτρίβισης (MS526-533). Τα πειράματα αυτά περιγράφηκαν στις Παραγράφους 3.5 και 3.6 αντίστοιχα.

Στα Σχήματα 3-1 και 3-2 παρουσιάζονται οι τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των δύο υπό μελέτη ισοτόπων για τα παραπάνω δείγματα. Προφανώς, στην περίπτωση που οι μετρήσεις των δύο ανιχνευτών ήταν ακριβώς ίδιες, τα σημεία των διαγραμμάτων θα ανήκαν στην ευθεία που διχοτομεί τη γωνία των δύο αξόνων.

Για να ελεγχθεί αν οι δύο ανιχνευτές δίνουν στατιστικά ίδια αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ANOVA κατά δύο παράγοντες. Με την ανάλυση αυτή, συγκρίθηκαν οι τιμές ραδιενέργειας των δύο ανιχνευτών για τα παραπάνω δείγματα. Η μέθοδος ANOVA κατά δύο παράγοντες περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.9.4. Για τον υπολογισμό των βασικών μεγεθών της μεθόδου ANOVA κατά δύο παράγοντες συντάχθηκε λογιστικό φύλλο σε Excel βάση των ακόλουθων παραδοχών:

- Θεωρούμε ως παράγοντα Α τη χρησιμοποιούμενη σε κάθε φορά μέθοδο επεξεργασίας και ως παράγοντα Β τον ανιχνευτή με τον οποίο έγινε η φασματοσκοπική ανάλυση.
- Χρησιμοποιούνται 4 μέθοδοι επεξεργασίας, συνεπώς ο παράγοντας Α έχει  $\alpha = 4$  επίπεδα. Πιο αναλυτικά, τα υπό μελέτη υπο-δείγματα υπέστησαν τις ακόλουθες μεθόδους επεξεργασίας:
  - Τα υπο-δείγματα MS510-513 δεν υπέστησαν κάποια επεξεργασία.
  - Τα υπο-δείγματα MS514-517 υπέστησαν κοσκίνισμα και αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.
  - Τα υπο-δείγματα MS526-529 υπέστησαν αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος και στη συνέχεια λειοτρίβιση.

- Τα υπο-δείγματα MS529-533 υπέστησαν λειοτριβίση, χωρίς να προηγηθεί αφαίρεση του χονδρόκοκκου κλάσματος.
- Η φασματοσκοπική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τους ανιχνευτές HPGe και LEGe, άρα ο παράγοντας B έχει  $b = 2$  επίπεδα.
- Σε κάθε συνδυασμό μεθόδου επεξεργασίας και ανιχνευτή αντιστοιχούν 4 υπο-δείγματα, συνεπώς σε κάθε περίπτωση έχουμε  $n = 4$  παρατηρήσεις.

Για να συγκρίνουμε σε επίπεδο σημαντικότητας 95%, από στατιστικούς πίνακες προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές  $F_0$  για κάθε F test:

- Για το F test της μεθόδου επεξεργασίας έχουμε 3 και 24 βαθμούς ελευθερίας, άρα προκύπτει η τιμή:  $F_{0.95,3,24} = 3.01$ .
- Για το F test του ανιχνευτή έχουμε 1 και 24 βαθμούς ελευθερίας, άρα προκύπτει η τιμή:  $F_{0.95,1,24} = 4.26$ .
- Για το F test της μεθόδου επεξεργασίας έχουμε 3 και 24 βαθμούς ελευθερίας, άρα προκύπτει η τιμή:  $F_{0.95,3,24} = 3.01$ .

Στους Πίνακες 3-1 και 3-2 παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη της ανάλυσης ANOVA για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$  αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι και για τα δύο ισότοπα:

- Ο λόγος  $F_0$  για τη μέθοδο επεξεργασίας είναι μεγαλύτερος από την τιμή σύγκρισης  $F_{0.95,3,24}$ , συνεπώς η μέθοδος επεξεργασίας επιδρά σημαντικά στη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας των υπο-δειγμάτων. Τα συμπεράσμα αυτό ήταν αναμενόμενο βάσει της στατιστικής ανάλυσης που παρουσιάστηκε στις Παραγράφους 3.5 και 3.6.
- Ο λόγος  $F_0$  για τον ανιχνευτή είναι μικρότερος από την τιμή σύγκρισης  $F_{0.95,1,24}$ . Συνεπώς, η ανάλυση δειγμάτων χώματος με τους ανιχνευτές HPGe και LEGe οδηγεί στον προσδιορισμό στατιστικά ίσων τιμών ραδιενέργειας για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{40}\text{K}$ . Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο. Θα περιμέναμε την ύπαρξη στατιστικά σημαντικής απόκλισης μεταξύ των δύο ανιχνευτών μόνο στην περίπτωση που ο ένας από τους δύο εμφανίζει κάποιο συστηματικό σφάλμα.
- Ο λόγος  $F_0$  για την αλληλεπίδραση των δύο παραγόντων είναι μικρότερος από την τιμή σύγκρισης  $F_{0.95,3,24}$ , δηλαδή οι δύο υπό μελέτη παράγοντες είναι πράγματι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, όπως αναμέναμε να ισχύει.

## Πίνακες παραρτήματος

Πίνακας 3-1: Αποτελέσματα ανάλυσης ANOVA για το <sup>137</sup>Cs

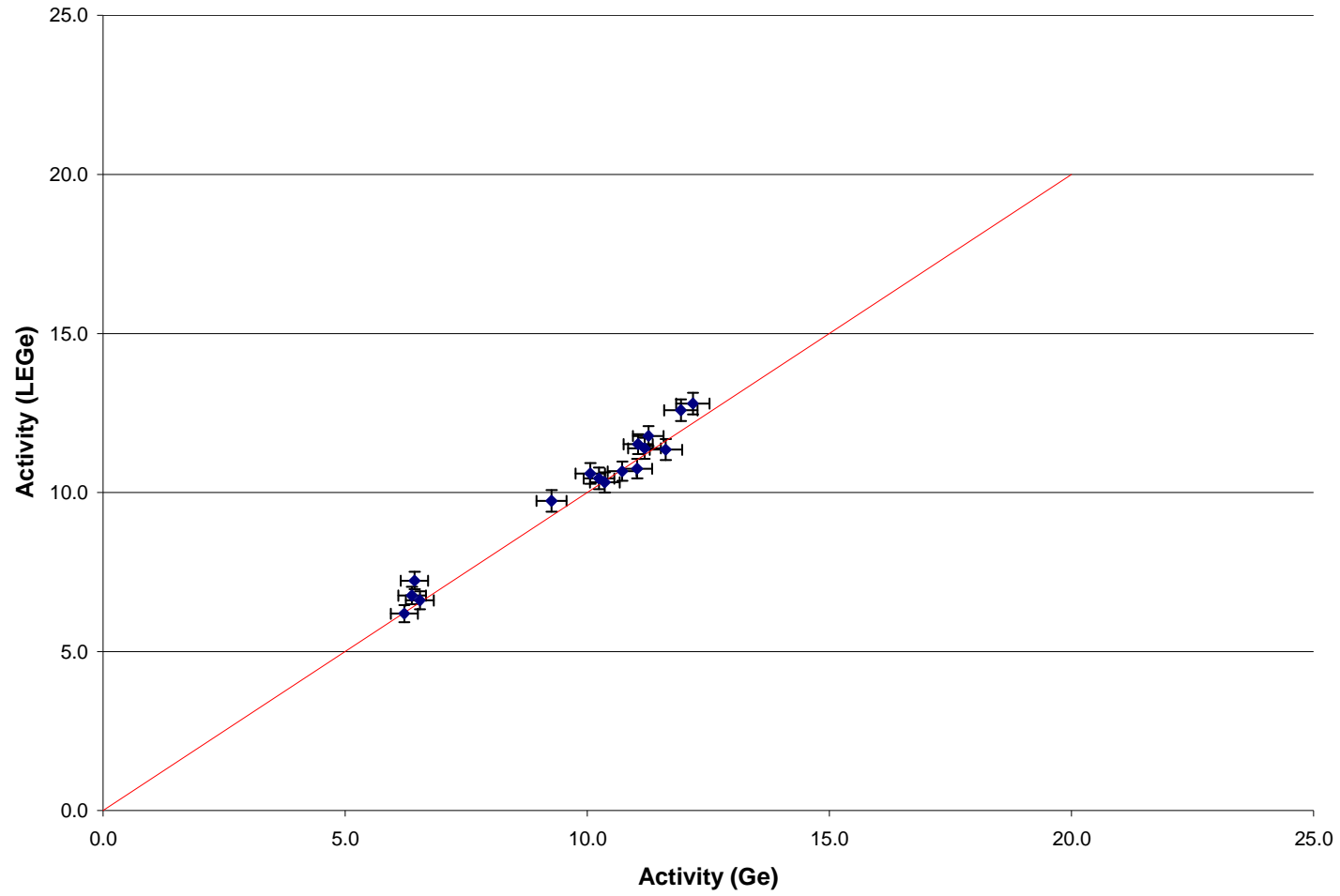
<i>Πηγή αβεβαιότητας</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων</i>	<i>Βαθμοί ελευθερίας</i>	<i>Μέσα τετράγωνα</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Μέθοδος επεξεργασίας	178.57	3	59.52	27.49
Ανιχνευτής	0.11	1	0.11	0.05
Αλληλεπίδραση επεξεργασίας και ανιχνευτή	7.46	3	2.49	1.15
Σφάλμα	51.98	24	2.17	
Ολικό	238.13	31		

Πίνακας 3-2: Αποτελέσματα ανάλυσης ANOVA για το <sup>40</sup>K

<i>Πηγή αβεβαιότητας</i>	<i>Αθροίσματα τετραγώνων</i>	<i>Βαθμοί ελευθερίας</i>	<i>Μέσα τετράγωνα</i>	<i>F<sub>0</sub></i>
Μέθοδος επεξεργασίας	46172.18	3	15390.73	5.24
Ανιχνευτής	253.01	1	253.01	0.09
Αλληλεπίδραση επεξεργασίας και ανιχνευτή	10822.50	3	3607.50	1.23
Σφάλμα	70430.05	24	2934.59	
Ολικό	127677.75	31		

## Σχήματα παραρτήματος

Σχήμα 3-1: Συγκέντρωση  $^{137}\text{Cs}$  των δειγμάτων MS510-517 και MS526-533 από ανάλυση των ανιχνευτών HPGe και LEGe



Σχήμα 3-2: Συγκέντρωση  $^{40}\text{K}$  των δειγμάτων MS510-517 και MS526-533 από ανάλυση των ανιχνευτών HPGe και LEGe

