

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

***ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΕΛΑΦΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του
ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ε. ΠΕΤΡΟΒΙΤΣΟΥ

Σπουδαστή της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επ. Καθηγητής Μ.Ι. Αναγνωστάκης

Συνεργασία: Μ.Ι. Σάββα & Δ.Ι. Καραγγελος

ΑΘΗΝΑ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποτελεί το επιστέγασμα των 5ετών σπουδών μου στην σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Η αιτία για την εκπόνησή της ήταν το πολύ ενδιαφέρον μάθημα «Ραδιοπεριβαλλοντική ανάλυση και προστασία» του 9^{ου} εξαμήνου του προγράμματος σπουδών της σχολής.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μ. Αναγνωστάκη, που μου έδωσε το έναυσμα για την εκπόνησης της εν λόγω διπλωματικής εργασίας, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου από την αρχή μέχρι και το τέλος της συνεργασίας μας. Στάθηκε αρωγός σε όλες τις προσπάθειές μου και με στήριξε σε όλες τις δυσκολίες που προέκυψαν.

Στη συνέχεια θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Διδάκτορα κ. Δημήτριο Καράγγελο και στην υποψήφια Διδάκτορα κ. Μαρίλια Σάββα, για την πολύτιμη βοήθειά τους στην δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ καθώς και στην επεξεργασία των μετρήσεων της ΔΕ. Οι πολύτιμες συμβουλές τους με βοήθησαν ώστε να φέρω αυτή την εργασία εις πέρας.

Επίσης, θα ήθελα ευχαριστήσω τον Λέκτορα κ. Ν. Πετρόπουλο για την πολύτιμη συμβολή του, κατά την κατασκευή της συσκευής δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, που με στήριξαν όσο κανείς άλλος κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας ΔΕ, άλλα και κατά την διάρκεια των σπουδών μου στην Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Πετροβίτσος Εμμανουήλ

Αφιερώνεται στους γονείς μου

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 7

2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΡΑΔΙΟΪΣΟΤΟΠΩΝ 10

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ... 10

2.1.1 ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ 10

2.1.2 Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΪΣΟΤΟΠΩΝ ΩΣ ΙΧΝΗΛΑΤΕΣ 11

2.1.2.1 Η τεχνική προσδιορισμού διάβρωσης με χρήση του ισότοπου Cs-137 12

2.1.2.1.1 Γενικά στοιχεία για την τεχνική του Cs-137 12

2.1.2.1.2 Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνικής του Cs-137..... 13

2.2 ΣΤΑΔΙΟ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ 14

2.2.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ 15

2.2.1.1 Περιβαλλοντικοί και τοπικοί παράγοντες 15

2.2.1.2 Σχηματισμοί εδάφους 15

2.2.1.3 Ιδιότητες του χώματος 18

2.3 ΘΕΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 18

2.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ..... 18

2.3.2 ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΘΕΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ..... 19

2.4 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΧΩΜΑΤΟΣ 20

2.4.1 ΟΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ Cs-137 21

2.4.2 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΜΙΞΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ 22

2.4.2.1 Αριθμός δειγμάτων για περιγραφικές μελέτες 22

2.4.2.1.1 Απαιτούμενος αριθμός δειγμάτων για περιγραφικές μελέτες..... 22

2.4.2.1.2 Επισκόπηση του αριθμού δειγμάτων στην θέση αναφοράς, που χρησιμοποιήθηκαν σε μελέτες διάβρωσης 24

2.4.2.2 Αριθμός δειγμάτων για αναλυτική δειγματοληψία 25

2.4.2.3 Αριθμός δειγμάτων για πρότυπες μελέτες 27

2.4.2.4 Ανάμιξη δειγμάτων 27

2.4.2.5 Σύνοψη των κανόνων για τον αριθμό των δειγμάτων 28

2.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ 29

2.5.1 ΤΥΧΑΙΟΣ ΚΑΙ ΚΡΙΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ..... 29

2.5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕ ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΒΑΣΗ..... 30

2.5.2.1 Σχεδιασμός δειγματοληψίας για περιγραφικές και πρότυπες μελέτες.... 30

2.5.2.2 Σχεδιασμός δειγματοληψίας στις αναλυτικές μελέτες 33

2.5.2.3 Σύνοψη των κανόνων για την επιλογή του κατάλληλου σχεδιασμού δειγματοληψίας 34

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ 36

3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ SCRAPER PLATE 37

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ, ΜΕΣΩ ΕΝΟΣ PVC ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ 40

3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΜΕΣΩ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ	41
3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΜΕΣΩ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ.....	43
3.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΕ.....	44

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΧΩΜΑΤΟΣ 52

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΧΩΜΑ.....	52
4.1.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΩΜΑΤΟΣ.....	53
4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	54
4.2.1 ΞΗΡΑΝΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΧΩΜΑΤΟΣ	54
4.2.2 ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΧΩΜΑΤΟΣ.....	55
4.2.2.1 Η διαδικασία κοσκίνισματος που χρησιμοποιήθηκε.....	57
για τα δείγματα της ΔΕ	57
4.2.2.2 Επίδραση της κοκκομετρίας του χώματος στην συγκέντρωση των ισοτόπων Cs-137, Pb-210, Be-7	58
4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΧΩΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	59
4.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΡΕΝΝΟΚ ΕΤ ΑΛ. (2002).....	59
4.3.1.1 Ξήρανση και κοσκίνισμα δείγματος	59
4.3.1.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΥΠΟ-ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΧΩΜΑΤΟΣ (BULK DENSITY)	60
4.3.1.3 Επεξεργασία δειγμάτων για χώματα με σημαντικό περιεχόμενο λίθων ..	61
4.3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΧΩΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΕΙΤΑΙ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΕΜΠ ΣΤΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	62
4.3.2.1 Ξήρανση και κοσκίνισμα του δείγματος	62
4.3.2.2 Συσκευασία δείγματος.....	64
4.4 Γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΧΩΜΑΤΟΣ	66
4.4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ Γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	66
4.4.2 ΟΙ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΟΙ ΑΝΑΛΥΤΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	66
4.4.3 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ Γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ ΣΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΝΑΛΥΘΗΚΑΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΔΕ	67

5. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ..... 69

5.1 Η ΑΝΑΓΚΗ ΥΠΑΡΕΞΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΑΝΑΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ, ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΤΟΥ Cs-137 ΣΤΟ ΧΩΜΑ	69
5.2 ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ/ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	71
5.2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΝΑΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ .	72
5.2.1.1 Εμπειρικά μοντέλα	73
5.2.1.2 Θεωρητικά μοντέλα	75

5.2.1.2.1 Το αναλογικό μοντέλο	75
5.2.1.2.2 Το μοντέλο σταθμικής προσέγγισης.....	77
5.2.1.2.3 Μοντέλα ισορροπίας μάζας	78
5.2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΝΑΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΑ ΕΔΑΦΗ.....	84
5.2.2.1 Μοντέλα για Cs-137	84
5.2.2.1.1 Εμπειρικά μοντέλα	84
5.2.2.1.2 Θεωρητικά μοντέλα	85
5.2.2.1.2.1 Μοντέλα κατανομής προφίλ (profile-distribution models).....	86
5.2.2.1.2.2 Μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης (diffusion and migration model)	87
5.2.2.2 Μοντέλο για Pb-210	89
5.2.2.3 Μοντέλο για Be-7.....	92
5.3 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΕΝΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΝΑΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΩΜΑΤΟΣ	94
5.4 ΜΕΡΙΚΕΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΝΑΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΩΜΑΤΟΣ.....	95
5.4.1 ΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΟΚΚΩΝ ΧΩΜΑΤΟΣ (P ΚΑΙ P')	95
5.4.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ (DEPOSITION FLUX) ΤΟΥ Cs-137.....	97
5.4.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Γ	99
5.4.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ (RELAXATION DEPTH) Η.....	99
5.4.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ D ΚΑΙ V ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ (DIFFUSION AND MIGRATION MODEL)	100

6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΑΝΑΔΙΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΝΑΔΙΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥ CS-137. 101

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	101
6.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	102
6.3 ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ ΖΩΓΡΑΦΟΥ.....	104
6.3.1 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΘΕΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	104
6.3.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ.....	109
6.3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΝΑΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΩΜΑΤΟΣ	111
6.3.3.1 1 ^ο Μοντέλο υπολογισμού – Εμπειρικό μοντέλο	111
6.3.3.2 2 ^ο Μοντέλο υπολογισμού – Μοντέλο κατανομής-προφίλ.....	111
6.3.3.3 3 ^ο Μοντέλο υπολογισμού – Μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης ..	112
6.3.3.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 3 μοντέλων	117
6.3.3.5 Συμπεράσματα	117
6.4 ΣΥΝΕΧΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΕΜΦΑΝΗ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΟΒΑΡΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	118
6.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	118
6.4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	120
6.4.3 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ	122
6.4.3.1 Δειγματοληψία στην περιοχή προς μελέτη.....	122

6.4.3.1.1 Δειγματοληψία πρώτης διατομής.....	123
6.4.3.1.2 Δειγματοληψία δεύτερης διατομής.....	125
6.4.3.1.3 Δειγματοληψία τρίτης διατομής.....	128
6.4.3.2 Δειγματοληψία στην θέση αναφοράς.....	130
6.4.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	131
6.4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ.....	131
6.4.5.1 Καταγραφή και υπολογισμός μεγεθών από την επεξεργασία και την ανάλυση δειγμάτων.....	131
6.4.5.1.1 Δείγματα θέσης αναφοράς.....	132
6.4.5.1.2 Δείγματα περιοχής προς μελέτη.....	135
6.4.5.2 Εφαρμογή των μοντέλων υπολογισμού.....	136
6.4.5.2.1 1 ^ο Μοντέλο υπολογισμού – Εμπειρικό μοντέλο.....	137
6.4.5.2.2 2 ^ο Μοντέλο υπολογισμού – Μοντέλο κατανομής-προφίλ.....	138
6.4.5.2.3 3 ^ο Μοντέλο υπολογισμού – Μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης.....	139
6.4.5.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μοντέλων.....	143
6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	149
6.5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΝΤΩΝ ΤΙΜΩΝ.....	149
6.5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	150
6.5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ.....	151
6.5.3.1 1 ^η διατομή.....	151
6.5.3.2 2 ^η διατομή.....	153
6.5.3.3 3 ^η διατομή.....	154
<u>7. ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....</u>	<u>158</u>
7.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	158
7.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	159
7.3 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	160
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</u>	<u>162</u>
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 – ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ.....</u>	<u>168</u>
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 – ΦΟΡΜΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΩΝ.....</u>	<u>169</u>

1. Εισαγωγή

Η διάβρωση του χώματος είναι ένα φαινόμενο που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα, όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια, καθώς είναι ένα πρόβλημα που μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες στο μέλλον του πλανήτη. Οι επιπτώσεις του φαινομένου είναι η σταδιακή μείωση του χώματος στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, αλλά και η ρύπανση των υδάτινων πόρων με ίζημα που προέρχεται από την διάβρωση. Τα αίτια του, είναι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο φυσικό περιβάλλον, αλλά και η ανθρώπινη δραστηριότητα. Γι' αυτόν τον λόγο είναι αναγκαία η ύπαρξη υπολογιστικών μοντέλων του μεγέθους της διάβρωσης. Ο υπολογισμός του όμως εμπεριέχει πολλές αβεβαιότητες, καθώς εξαρτάται από πλείστους παράγοντες, που μερικές φορές δεν μπορούν να εκτιμηθούν. Στα πρώτα στάδια της μελέτης της διάβρωσης του χώματος από τους επιστήμονες, αναπτύχθηκαν υπολογιστικά μοντέλα τα οποία όμως ήταν εμπειρικά και δεν μπορούσαν να προσδιορίσουν την χωρική κατανομή της διάβρωσης σε μία περιοχή. Γι' αυτό στην συνέχεια υπήρξε η προσπάθεια δημιουργίας μοντέλων υπολογισμού που θα βασίζονταν στην συγκέντρωση της ραδιενέργειας ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία ούτως ή άλλως βρίσκονται έδαφος.

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ήταν να διερευνηθεί το κατά πόσον είναι δυνατόν με τις δυνατότητες που έχει το εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΠΤ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) να πραγματοποιηθούν έρευνες για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης του εδάφους και να μελετηθούν τα προβλήματα που θα παρουσίαζε μία τέτοια έρευνα.

Η μελέτη της διάβρωσης του χώματος μέσω ραδιοϊσοτόπων γίνεται κυρίως μέσω του Cs-137. Το Cs-137 είναι ένα τεχνητό ραδιενεργό ισότοπο, που έχει αποθεθεί στο χώμα μέσω των πυρηνικών δοκιμών και του ατυχήματος του Chernobyl. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσής της ραδιενεργειάς του στο χώμα, γίνεται μέσω κατάλληλων δειγματοληψιών και αναλύσεων οι οποίες ακολουθούν στο εργαστήριο. Η εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης του εδάφους βασίζεται στα αποτελέσματα των αναλύσεων και γίνεται με εφαρμογή κατάλληλων μοντέλων τα οποία έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, αναλύονται τα υπολογιστικά μοντέλα που μετατρέπουν την συγκέντρωση ραδιενέργειας σε ρυθμό διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του χώματος και περιγράφεται η διαδικασία της δειγματοληψίας, της επεξεργασίας των δειγμάτων και της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης με στόχο τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας του Cs-137. Αφού οι

τεχνικές που περιγράφονται ελέγχθηκαν στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, εν συνεχεία ακολούθησε εφαρμογή τους σε μία θέση με εμφανές πρόβλημα διάβρωσης του εδάφους, στην περιοχή της Λαμίας.

Η Διπλωματική Εργασία αποτελείται από 6 Κεφάλαια και συνοδεύεται από 2 Παραρτήματα.

Στο 2^ο Κεφάλαιο δίνονται αρχικά γενικά στοιχεία για τα ραδιοϊσότοπα μέσω των οποίων πραγματοποιείται η μελέτης της διάβρωσης του χώματος και στην συνέχεια αναλύεται η τεχνική του Cs-137 μέσω της οποίας μετατρέπονται οι τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του Cs-137 σε ρυθμούς διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του χώματος. Εν συνεχεία, αναλύονται οι προϋποθέσεις για την επιλογή των περιοχών που θα γίνουν οι δειγματοληψίες και περιγράφονται οι κατηγορίες μελέτης εδαφών, μέσω του Cs-137. Πιο συγκεκριμένα, προσδιορίζεται ο αριθμός δειγμάτων που απαιτείται για κάθε κατηγορία καθώς και τους περιορισμούς για να γίνει ανάμιξη των δειγμάτων. Τέλος, αναλύεται ο σχεδιασμός δειγματοληψίας, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο θα επιλεγτούν τα σημεία από τα οποία θα συλλεχθούν τα δείγματα, για κάθε μία από τις κατηγορίες μελέτης εδαφών.

Στο 3^ο Κεφάλαιο αναλύονται οι υπάρχουσες μέθοδοι δειγματοληψίας που χρησιμοποιούνται για μελέτες διάβρωσης του χώματος. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι συσκευές δειγματοληψίας και ο τρόπος με το οποίο γίνεται η συλλογή του δείγματος χώματος. Γίνεται κριτική ανασκόπηση των τεχνικών δειγματοληψίας που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή δειγμάτων στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, η οποία βασίστηκε σε δειγματολήπτη ο οποίος κατασκευάστηκε στα πλαίσια της ΔΕ.

Στο 4^ο Κεφάλαιο αρχικά αναφέρονται γενικά στοιχεία για τις ιδιότητες του χώματος και για τις μεθόδους επεξεργασίας του δείγματος και περιγράφεται η τυπική διαδικασία επεξεργασίας των δειγμάτων, που συλλέχθηκαν για μελέτες διάβρωσης του εδάφους. Στη συνέχεια αναλύεται η μεθοδολογία επεξεργασίας και προετοιμασίας των δειγμάτων, όπως πραγματοποιήθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Τέλος, αναφέρονται γενικά στοιχεία για την γ-φασματοσκοπική ανάλυση και γίνεται περιγραφή των ανιχνευτικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν για την γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων, ενώ περιγράφεται και η διαδικασία μέσω της οποίας γίνεται η ανάλυση των δειγμάτων.

Στο 5^ο Κεφάλαιο αναλύονται τα υπολογιστικά μοντέλα μετατροπής της συγκέντρωσης ραδιενέργειας Cs-137 σε ρυθμούς διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του χώματος. Αρχικά κατηγοριοποιούνται τα μοντέλα ανάλογα την χρήση του χώματος, όπου γίνεται η δειγματοληψία. Για κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες, γίνεται δεύτερη κατηγοριοποίηση ανάλογα αν το μοντέλο είναι εμπειρικό ή θεωρητικό. Στη συνέχεια περιγράφονται τα εμπειρικά καθώς και τα θεωρητικά μοντέλα, τα οποία διαφοροποιούνται, ανάλογα τον αριθμό δεδομένων που απαιτούνται για τον υπολογισμό και την ακρίβειά τους. Αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η επιλογή των μοντέλων μετατροπής, ανάλογα το είδος μελέτης διάβρωσης που θα πραγματοποιηθεί. Τέλος, αναφέρονται οι παράμετροι-κλειδιά των μοντέλων, η φυσική τους σημασία καθώς και ο τρόπος υπολογισμού τους.

Στο 6^ο Κεφάλαιο περιγράφεται το πειραματικό μέρος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, δηλαδή μία ολοκληρωμένη μελέτη της διάβρωσης του χώματος στην περιοχή στην περιοχή Δραχμάναγα Λαμίας. Αρχικά, αναφέρονται τα αρχικά στάδια της μελέτης, όπου έγινε σχεδιασμός μίας κατάλληλης συσκευής δειγματοληψίας, η οποία τελικά πήρε την τελική μορφή που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, ενώ επιλέχτηκε και η κατηγορία των μοντέλων που θα χρησιμοποιούνταν για τον υπολογισμό των ρυθμών διάβρωσης ή ιζηματογένεσης. Στην συνέχεια περιγράφεται η δοκιμαστική δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου για να διαπιστωθεί η εργονομία της συσκευής δειγματοληψίας, για το αν μπορούν να εφαρμοστούν τα υπολογιστικά μοντέλα με τα μέσα που διαθέτουμε και για το αν προκύπτουν λογικά αποτελέσματα. Επιπλέον παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και ο τρόπος υπολογισμού τους. Αφού ολοκληρώθηκε αυτό το στάδιο, γίνεται αναλυτική περιγραφή της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Δραχμάναγα Λαμίας. Αρχικά αναλύεται, πώς επιλέχτηκε η εν λόγω περιοχή και περιγράφεται η διαδικασία της δειγματοληψίας. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα δεδομένα από την ανάλυση των δειγμάτων, γίνεται εφαρμογή των μοντέλων μετατροπής και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Τέλος, ακολουθεί ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων, η εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς και οι προοπτικές για μελλοντική επέκταση της εργασίας.

Η εργασία ολοκληρώνεται με 2 Παραρτήματα.

2. Μελέτη της διάβρωσης και ιζηματογένεσης του εδάφους με χρήση ραδιοϊσοτόπων

Η διάβρωση του εδάφους και η συνδεδεμένη με αυτή ιζηματογένεση, είναι φυσικές διεργασίες που προκαλούνται από τον νερό, τον αέρα και τον πάγο. Αρκετές ανθρώπινες ενέργειες, όπως η αποψίλωση των δασών, η υπερβολική αύξηση των βοσκότοπων, η καλλιέργεια της γης, τείνουν να επιταχύνουν την διάβρωση του χώματος. Η διάβρωση προκαλεί προβλήματα στις περιοχές που παρουσιάζεται, καθώς οδηγεί σε ελάττωση του διαθέσιμου χώματος για βλάστηση και καλλιέργειες αλλά και σε εναπόθεση του χώματος που διαβρώνεται σε λίμνες, ποτάμια και χείμαρρους. Σύμφωνα με τους Brown and Wolf (1984), το σύνολο των καλλιεργήσιμων εκτάσεων σε όλο τον κόσμο το 1984, είχε έκταση $0.314 \cdot 10^6$ εκτάρια (ha) και το χώμα που είχε απομακρυνθεί λόγω της διάβρωσης σε αυτήν την έκταση, ήταν $25.4 \cdot 10^6$ τόνοι (t) χώμα. Επίσης, σύμφωνα με τον Lal (2001), από τη συνολική επιφάνεια της Γης που είναι $13013 \cdot 10^6$ ha, εκτιμάται ότι μία έκταση $1642 \cdot 10^6$ ha έχει υποστεί σημαντική διάβρωση.

2.1 Γενικά στοιχεία για την μελέτη της διάβρωσης και ιζηματογένεσης του εδάφους

2.1.1 Υπάρχοντα μοντέλα διάβρωσης του εδάφους

Λόγω των μεγάλων προβλημάτων που δημιουργεί η διάβρωση του εδάφους, έχουν αναπτυχθεί πολλά εμπειρικά και μαθηματικά μοντέλα εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης του εδάφους. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως είναι η *Γενική Εξίσωση Απώλειας Χώματος* (Universal Soil Loss Equation - USLE), η οποία είναι μία εμπειρική σχέση και αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους σε μία περιοχή (Wischmeier and Smith, 1965). Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει μία σειρά από παράγοντες οι οποίοι προσδιορίζονται εμπειρικά. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν την ένταση των βροχοπτώσεων, τις ιδιότητες του χώματος, τα είδη καλλιέργειας και την μορφολογία του εδάφους. Αργότερα αναπτύχθηκε μία βελτιωμένη έκδοση της USLE η οποία ονομάστηκε *Αναθεωρημένη Γενική Εξίσωση Απώλειας Χώματος* (RUSLE) η οποία χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο εύρος περιπτώσεων από την πρώτη έκδοση. Πάντως, παρ' όλες τις βελτιώσεις, κανένα από αυτά τα μοντέλα δεν μπορεί να προσδιορίσει τη χωρική κατανομή της διάβρωσης σε μία περιοχή. Το ίδιο πρόβλημα υπάρχει και με τις υπάρχουσες μελέτες ιζηματογένεσης του εδάφους, στις οποίες δεν μπορεί να προσδιοριστεί η χωρική κατανομή της ιζηματογένεσης. Επομένως, οι κλασσικές

τεχνικές μελέτης της διάβρωσης του εδάφους, είναι ικανές να δώσουν αποτελέσματα, με σημαντικούς όμως περιορισμούς, όπως ο μη προσδιορισμός της χωρικής κατανομής της διάβρωσης. Οι προσπάθειες εύρεσης νέων τεχνικών, που να είναι συμπληρωματικές ή εναλλακτικές των παραπάνω, έχουν επικεντρωθεί τις τελευταίες δεκαετίες στη χρήση ραδιοϊσοτόπων.

2.1.2 Η χρήση των ραδιοϊσοτόπων ως ιχνηλάτες

Τα ραδιοϊσότοπα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μελέτες διάβρωσης και ιζηματογένεσης του εδάφους είναι το Cs-137, ο Pb-210 και το κοσμικής προέλευσης ισότοπο Be-7.

Το Cs-137 που αποτέθηκε εξαιτίας των πυρηνικών δοκιμών οι οποίες ξεκίνησαν το 1945 και συνεχίστηκαν για τα επόμενα έτη και το οποίο έχει κατανεμηθεί σε ολόκληρη την επιφάνεια της γης, είναι ένας μοναδικός ιχνηλάτης για την διάβρωση και την ιζηματογένεση, αφού δεν υπάρχουν πηγές Cs-137 στο φυσικό περιβάλλον. Το Cs-137, το οποίο απελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα, εν συνεχεία άρχισε να αποτίθεται στην επιφάνεια της γης. Η επιφανειακή του απόθεση, επηρεάστηκε από τους ρυθμούς κατακρήμισης και τον αριθμό των πυρηνικών δοκιμών που πραγματοποιούνταν κάθε χρόνο. Εκτιμάται ότι η απόθεση του Cs-137 άρχισε το 1954, κορυφώθηκε την διετία 1963-1964 και στη συνέχεια άρχισε να μειώνεται. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 και μετά ήταν συχνά κάτω από τα επίπεδα ανίχνευσης. Μεμονωμένα γεγονότα, τα οποία ακολούθησαν, όπως το ατύχημα του Τσερνομπίλ, τον Απρίλιο του 1986, προκάλεσε επίσης πολύ μεγάλη διασπορά Cs-137 στο περιβάλλον και απόθεσή του στο έδαφος, η οποία μάλιστα παρουσιάζει εξαιρετικά έντονη ανομοιομορφία. Το Cs-137, το οποίο είναι ένα ισότοπο με μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού (~30 χρόνια) μπορεί να ανιχνευτεί εύκολα στο έδαφος, για πολλές δεκαετίες μετά την απόθεσή του, με τεχνικές γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, μέσω των φωτονίων ενέργειας 662keV, τα οποία εκπέμπει με υψηλό ποσοστό εκπομπής (~85%).

Ο Pb-210 είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο, θυγατρικό της ραδιενεργού σειράς του U-238, το οποίο τοποθετείται μετά το ραδιενεργό αέριο Rn-222 και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού ~22 χρόνια. Καθώς ένα ποσοστό του Rn-222 το οποίο παράγεται στο χώμα διαφεύγει στην ατμόσφαιρα, μία ποσότητα Pb-210 παράγεται τελικά στον αέρα και στην συνέχεια αποτίθεται στην επιφάνεια του εδάφους. Ως αποτέλεσμα, στο επιφανειακό χώμα δεν υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του Pb-210 και των πατρικών του ραδιενεργών πυρήνων, καθώς το επιφανειακό χώμα

εμπλουτίζεται συνεχώς από το Pb-210 που αποτίθεται. Αυτό το οποίο συνήθως εκτιμάται σε μελέτες διάβρωσης είναι η περίσσεια (excess) του Pb-210, έναντι ενός εκ των πατρικών του πυρήνων, που συνήθως είναι το Ra-226 (Robbins, 1978). Εκτιμώντας τη ραδιενέργεια του Pb-210 και του Ra-226 στο χώμα, μπορεί να υπολογιστεί η περίσσεια Pb-210 και να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους. Η επιφανειακή απόθεση του Pb-210 από την ατμόσφαιρα παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα που έχει εύρος από 30-370 Bq·m⁻²·yr⁻¹ (Robbins, 1978). Πρέπει να επισημανθεί τέλος ότι, η εκροή του ραδονίου εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όσο και από την εποχή, λόγω π.χ. της υγρασίας του εδάφους. Ο προσδιορισμός του Pb-210 γίνεται με τεχνικές γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης από τα φωτόνια ενέργειας 46.5keV που εκπέμπει, αν και παρουσιάζονται πολλές δυσκολίες λόγω της χαμηλής ενέργειας των φωτονίων αυτών.

Το Be-7 είναι ένα βραχύβιο (T_{1/2}=53 ημέρες) φυσικό ραδιενεργό ισότοπο που δημιουργείται στην ανώτερη ατμόσφαιρα από τον βομβαρδισμό της από την κοσμική ακτινοβολία¹. Η ημερήσια επιφανειακή απόθεση του Be-7 έχει εύρος από 170-740 Bq·m⁻² (Wallbrink and Murray, 1994). Ο προσδιορισμός του Be-7 γίνεται με τεχνικές γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, από τα φωτόνια ενέργειας 477 keV που εκπέμπει.

Όταν το Cs-137, ο Pb-210 και το Be-7 φτάνουν στην επιφάνεια του εδάφους, απορροφούνται πολύ γρήγορα στο χώμα. Οι βιολογικές και χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος, έχουν ως αποτέλεσμα μετανάστευση μικρού μόνο ποσοστού των ραδιοϊσοτόπων αυτών σε άλλη περιοχή. Όμως, οι φυσικές διεργασίες του νερού και του αέρα, που είναι οι κύριοι παράγοντες της μετακίνησης του χώματος, έχουν ως συνέπεια τη μετακίνηση και των ραδιενεργών ισοτόπων που είναι προσκολλημένα σε αυτό. Κατά συνέπεια, η μέτρηση της κατανομής του Cs-137, του Pb-210 και του Be-7 στην επιφάνεια του εδάφους, μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τον βραχυχρόνιο (μικρότερο από 30 μέρες), ή το μακροχρόνιο (λίγες δεκαετίες έως ~100 χρόνια) ρυθμό αναδιανομής του χώματος στο έδαφος.

2.1.2.1 Η τεχνική προσδιορισμού διάβρωσης με χρήση του ισοτόπου Cs-137

2.1.2.1.1 Γενικά στοιχεία για την τεχνική του Cs-137

Οι μελέτες των Rogowski και Tamura (1965, 1970 a,b) και των Dahlan and Auerbach (1968) έδειξαν σημαντική συσχέτιση μεταξύ της απώλειας χώματος και της απώλειας Cs-137. Έτσι, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η μετακίνηση του Cs-137 σε

¹ Γι' αυτό το λόγο χαρακτηρίζεται ως ισότοπο κοσμικής προέλευσης (cosmogenic)

μία περιοχή μπορεί να συσχετιστεί με την μετακίνηση του χώματος και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της διάβρωσης του χώματος. Οι Ritchie και McHenry (1975) επιβεβαίωσαν ότι υπάρχει μία εκθετική σχέση ανάμεσα στην απώλεια χώματος και στην απώλεια του Cs-137, ενώ έδειξαν ακόμα και ότι η χωρική κατανομή του Cs-137 σε μία περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό, τόσο των περιοχών που έχουν υποστεί διάβρωση, όσο και των περιοχών που έχουν υποστεί ιζηματογένεση.

Ο προσδιορισμός της αναδιανομής του χώματος σε μία περιοχή (διάβρωση ή ιζηματογένεση) βασίζεται στην σύγκριση των μετρούμενων συγκεντρώσεων Cs-137 ($Bq \cdot m^{-2}$) των δειγμάτων της περιοχής, με μία εκτίμηση της συγκέντρωσης του Cs-137 που αντιπροσωπεύει την επιφανειακή απόθεση Cs-137 στην περιοχή. Επειδή τις περισσότερες φορές η μέτρηση της επιφανειακής απόθεσης από την ατμόσφαιρα είναι αδύνατη, για την εκτίμηση της επιφανειακής απόθεσης χρησιμοποιείται δειγματοληψία και ανάλυση των δειγμάτων σε μία περιοχή που κατά τεκμήριο δεν έχει υποστεί διάβρωση ή ιζηματογένεση. Αυτή η περιοχή ονομάζεται θέση αναφοράς. Όταν η συγκέντρωση του Cs-137 ($Bq \cdot m^{-2}$) ενός δείγματος είναι μικρότερη από την συγκέντρωση στη θέση αναφοράς, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει απώλεια χώματος, στο οποίο έχει προσκολληθεί Cs-137, όποτε η θέση έχει υποστεί διάβρωση. Αντίστοιχα, όταν η συγκέντρωση του δείγματος είναι μεγαλύτερη, το σημείο έχει υποστεί ιζηματογένεση (Walling and He, 1999a). Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει και χρησιμοποιήσει κατάλληλα μοντέλα υπολογισμού, που συσχετίζουν τον ρυθμό διάβρωσης ή ιζηματογένεσης, με το βαθμό της μείωσης ή της αύξησης της συγκέντρωσης του Cs-137 (Ritchie and McHenry, 1990 , Walling and He , 1997, 1999a). Αυτά τα μοντέλα θα αναλυθούν στο Κεφ. 5.

2.1.2.1.2 Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνικής του Cs-137

Τα πλεονεκτήματά της τεχνικής του Cs-137 είναι ότι:

- Βασίζεται σε δειγματοληψία που μπορεί να γίνει με μία απλή επίσκεψη σε μία περιοχή και παρέχει μία εκτίμηση του ρυθμού της ανακατανομής του χώματος για μία περίοδο μερικών δεκαετιών.
- Καθώς τα αποτελέσματα της εκτίμησής του ρυθμού διάβρωσης ή ιζηματογένεσης αναφέρονται σε μία μεγάλη χρονική περίοδο δεν επηρεάζονται τόσο πολύ από ακραία καιρικά φαινόμενα.
- Η δειγματοληψία δεν απαιτεί σημαντική διατάραξη της περιοχής προς μελέτη.

- Ο ρυθμός της αναδιανομής του χώματος αντιπροσωπεύει τις επιδράσεις από όλες τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες της περιοχής, που προκαλούν την μετακίνηση του χώματος.
- Δεν υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί, εκτός από τον αριθμό των δειγμάτων που πρέπει να συλλεχθούν.

Τα μειονεκτήματα της τεχνικής του Cs-137 είναι ότι:

- Απαιτείται πραγματοποίηση της μελέτης από εξειδικευμένο προσωπικό, κάτι που αποτελεί περιορισμό για τις αναπτυσσόμενες χώρες.
- Απαιτούνται ειδικευμένα εργαστήρια για την προετοιμασία του δείγματος και την γ-φασματοσκοπική του ανάλυση.
- Αποτελεί μία έμμεση μέθοδο, που εξαρτάται από τη συσχέτιση της αναδιανομής του χώματος, με την αναδιανομή του Cs-137.
- Υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες και παραδοχές στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης και ιζηματογένεσης, από τις μετρήσεις της συγκέντρωσης του Cs-137.
- Δεν υπάρχει δυνατότητα για βραχυχρόνιες μελέτες, π.χ. για μελέτη της επίδρασης της καλλιέργειας της γης στον ρυθμό διάβρωσης.

2.2 Στάδιο αναγνώρισης της περιοχής προς μελέτη

Πριν από την πραγματοποίηση της δειγματοληψίας στην περιοχή που θα μελετηθεί για διάβρωση και στην θέση αναφοράς, πρέπει να προηγηθεί ένα αναγνωριστικό στάδιο. Δηλαδή να γίνει μία αρχική επίσκεψη στην περιοχή για την οποία θα γίνει η μελέτη καθώς και να εξεταστούν και να προσδιοριστούν στοιχεία (μέσω της επίσκεψης στην περιοχή, βιβλιογραφικών αναφορών, χαρτών, μετεωρολογικών δεδομένων κλπ) που είναι χρήσιμα ή και αναγκαία για την πραγματοποίηση της μελέτης στην εν λόγω περιοχή (κλίμα, μορφολογία εδάφους, ιδιότητες χώματος, χρήση γης κλπ). Επίσης, στο αναγνωριστικό στάδιο πραγματοποιείται δοκιμαστική δειγματοληψία χώματος στη θέση αναφοράς και σε μία ή περισσότερες τοποθεσίες όπου το χώμα είναι διαταραγμένο. Ο σκοπός αυτής της δειγματοληψίας είναι να προσδιοριστεί η συγκέντρωση του Cs-137 στην θέση αναφοράς και να διασφαλισθεί ότι έχει παραμείνει στην τοποθεσία που έχει υποστεί διάβρωση επαρκής ποσότητα Cs-137, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή της τεχνικής. Ακόμα, συλλέγονται δείγματα στην θέση αναφοράς, για την εύρεση της κατά βάθος κατανομής του Cs-137 και πρωτίστως, του μέγιστου βάθους στο οποίο αυτό έχει φτάσει.

Μετά το αναγνωριστικό στάδιο ακολουθεί το στάδιο της επιλογής θέσης αναφοράς και στην συνέχεια η πραγματοποίηση του σχεδιασμού της δειγματοληψίας. Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός της δειγματοληψίας ξεκινά η διαδικασία της δειγματοληψίας για την μελέτη της διάβρωσης στην περιοχή.

2.2.1 Παράγοντες που εξετάζονται στο στάδιο αναγνώρισης της τοποθεσίας προς μελέτη

2.2.1.1 Περιβαλλοντικοί και τοπικοί παράγοντες

Κατά τον επιλογή της προς μελέτη περιοχής θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μία σειρά από παράμετροι, με σημαντικότερες τις παρακάτω:

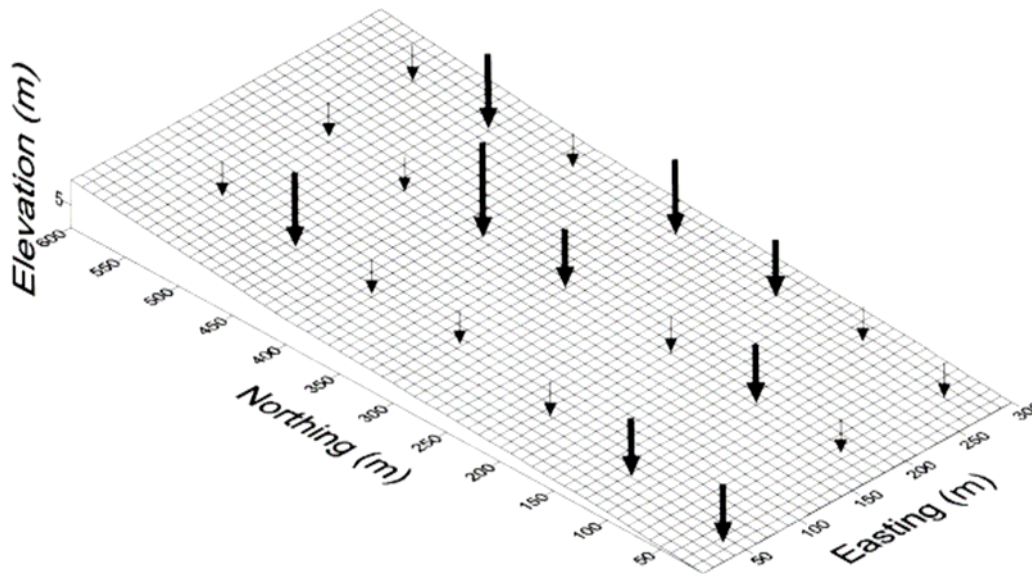
- Κλίμα : Θα πρέπει να διατίθενται στοιχεία για περισσότερα από 20 χρόνια από τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό), για τη μέση μηνιαία βροχόπτωση, τις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες μηνιαίως και να υπάρχουν πληροφορίες για ακραία καιρικά φαινόμενα (πλημμύρες, κατολισθήσεις κτλ).

- ρήση της γης: Ο τύπος της χρήσης της γης (ετήσια καλλιέργεια, παραγωγή ρυζιού, καλλιέργεια δέντρων και χαμηλής βλάστησης, κήπος, βοσκότοποι, δάσος, κλπ), οι αλλαγές που έχουν γίνει στην χρήση της γης από το 1950, η διάρκεια των εκάστοτε πρακτικών κατά τη χρήση γης, η συχνότητα και ο τύπος του οργώματος, η συχνότητα της βοσκής για τους βοσκότοπους.

X

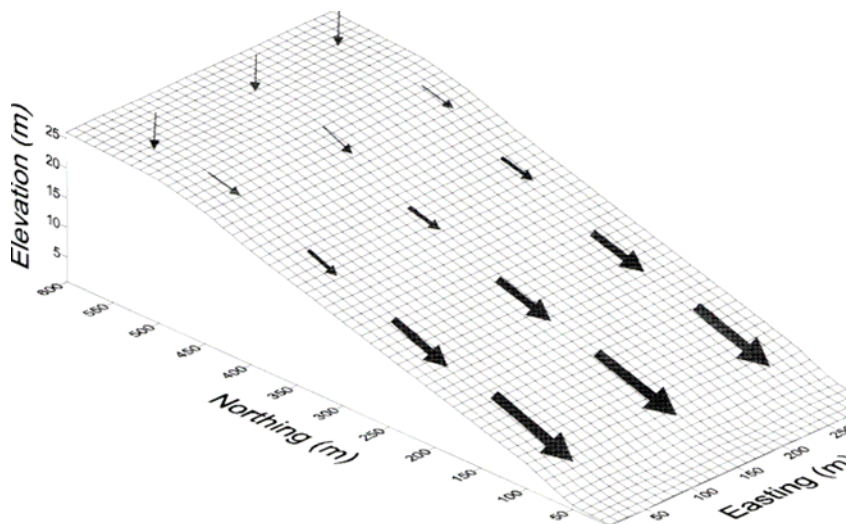
2.2.1.2 Σχηματισμοί εδάφους

Το εύρος των σχηματισμών του εδάφους (landforms) που υπάρχουν στην περιοχή πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον σχεδιασμό του προγράμματος δειγματοληψίας. Οι τυπικοί σχηματισμοί μπορούν να παρασταθούν σχηματικά (Σχ. 2.1-2.4). Είναι σίγουρο ότι η μορφολογία του εδάφους είναι ένας σημαντικός παράγοντας της ανακατανομής του χώματος και η θέση ενός δεδομένου σημείου στο τοπίο είναι πολύ σημαντική, για να γίνει κατανοητή η πιθανή αναδιανομή χώματος στο σημείο. Οι επίπεδες επιφάνειες έχουν πολύ μικρές κλίσεις και δεν λαμβάνουν επιφανειακό χώμα από ψηλότερα σημεία (Σχ. 2.1). Αυτές οι επίπεδες επιφάνειες εάν δεν είναι καλλιεργήσιμες, μπορεί να υποστούν διάβρωση λόγω νερού μόνο αν οι βροχοπτώσεις είναι πολύ ισχυρές και με μεγάλη διάρκεια. Οπότε, εάν είναι αδιατάραχτες, αυτές οι περιοχές είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για θέσεις αναφοράς.



Σχήμα 2.1 Επίπεδη επιφάνεια

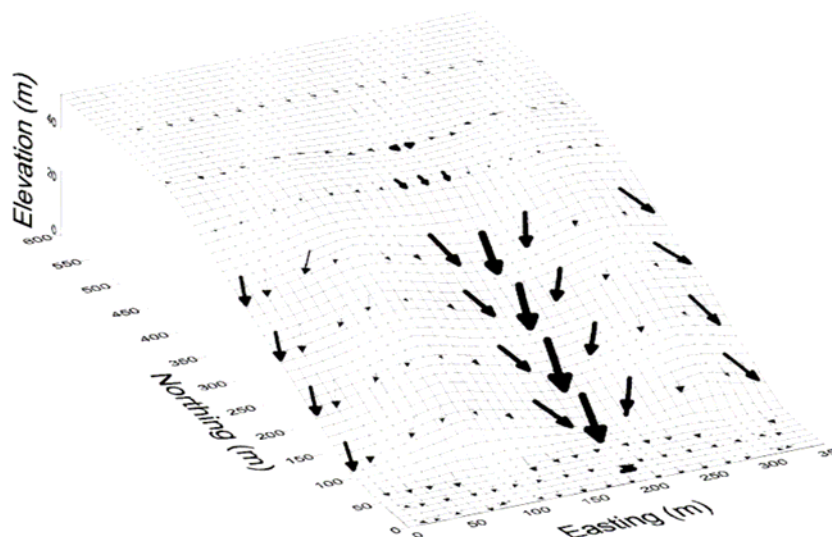
Όταν η κλίση του εδάφους είναι αρκετά μεγάλη για να υποστεί διάβρωση λόγω νερού, μπορούμε να ταξινομήσουμε τις μορφολογίες εδάφους σε τρεις κατηγορίες (Σχ. 2.2-2.4). Αυτές οι μορφολογίες μπορούν να περιγραφούν μέσω τριών χαρακτηριστικών μεγεθών της πλαγιάς: την κλίση της πλαγιάς, την καμπυλότητα κατά μήκος της (down-slope curvature) και την καμπυλότητα κατά πλάτος της (across-slope curvature). Σε πλαγιές που έχουν έλλειψη καμπυλότητας κατά πλάτος, θεωρείται ότι υπάρχει ροή νερού μόνο κατά μήκος (Σχ. 2.2).



Σχήμα 2.2 Κεκλιμένη επιφάνεια με μηδενική καμπυλότητα κατά πλάτος

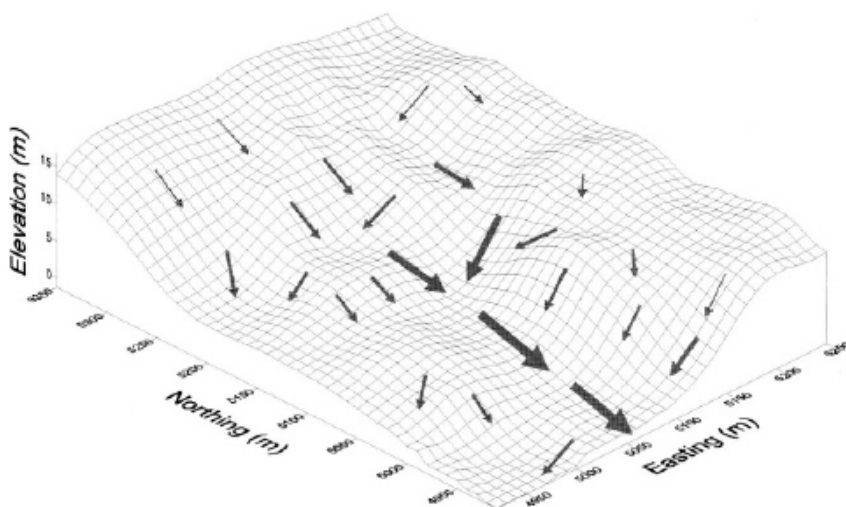
Οι πλαγιές που έχουν καμπυλότητα κατά πλάτος δημιουργούν σύγκλιση και απόκλιση της ροής κατά πλάτος, ανάλογα με την καμπυλότητα τους (Σχ. 2.3). Οι επιφάνειες αυτές ονομάζονται κυματοειδείς, αν οι κοιλότητες και οι κυρτότητες κατά

πλάτος και κατάτμητες, αν οι κοιλότητες είναι ιδιαίτερος βαθιές. Σε αυτή τη μορφολογία του εδάφους πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις τόσο κατά μήκος, όσο και κατά πλάτος της πλαγιάς, καθώς η ροή δεν είναι ομοιόμορφη όπως στην περίπτωση του Σχήματος 2.2.



Σχήμα 2.3 Κεκλιμένη επιφάνεια με καμπυλότητα κατά μήκος και κατά πλάτος

Η τρίτη περίπτωση μορφολογίας εδάφους είναι ένας συνδυασμός όλων των προηγούμενων, χωρίς καθορισμένη κλίση και πολλαπλές λεκάνες απορροής (Σχ. 2.4). Σε ορισμένες περιπτώσεις η μελέτη γίνεται σε ολόκληρη της επιφάνεια της πλαγιάς, σε άλλες, η μελέτη μπορεί να γίνει μόνο σε ένα τμήμα της επιφάνειας το οποίο θεωρείται αντιπροσωπευτικό. Στο στάδιο αναγνώρισης πρέπει να προσδιοριστούν οι σχηματισμοί του εδάφους στην κάθε περιοχή που θα μελετηθεί.



Σχήμα 2.4 Σύνθετη επιφάνεια

2.2.1.3 Ιδιότητες του χώματος

Οι ιδιότητες του χώματος θα πρέπει να περιγραφούν και ενδεχομένως να μετρηθούν, κάτι που θα επιτρέψει την κατάταξη του χώματος σε εθνικά και διεθνή συστήματα ταξινόμησης. Οι ιδιότητες του χώματος που είναι πιο σημαντικές για την μελέτη της διάβρωσης είναι η υφή του χώματος (soil texture) και η παρουσία στρωμάτων χώματος κατά βάθος, που εμποδίζουν την βλάστηση. Οι πρώτη ιδιότητα είναι ρυθμιστικός παράγοντας της διαδικασίας της διάβρωσης. Η δεύτερη είναι κρίσιμη για τον προσδιορισμό πιθανών επιπτώσεων της διάβρωσης στην ανάπτυξη βλάστησης. Σε μία επίπεδη τοποθεσία, συνήθως οι ιδιότητες του χώματος δεν ποικίλουν πάρα πολύ και μπορούν να προσδιοριστούν στο στάδιο αναγνώρισης (reconnaissance stage) σκάβοντας έναν μικρό αριθμό τυχαία επιλεγμένων λάκκων. Σε τοποθεσίες που βρίσκονται υπό κλίση, οι ιδιότητες του χώματος από θέση σε θέση πιθανόν θα διαφέρουν και αυτή η διαφορά τους, εξαρτάται από την θέση τους στην τοποθεσία προς μελέτη. Ο χάρτης της κατανομής των ιδιοτήτων του χώματος σε μία περιοχή που μπορεί να προκύψει κατά το στάδιο της αναγνώρισης της περιοχής ονομάζεται *soil catena* και μπορεί να είναι πολύ σημαντικός για το όλο εγχείρημα.

2.3 Θέση αναφοράς

Όπως προαναφέρθηκε η όλη μεθοδολογία προσδιορισμού του ρυθμού διάβρωσης βασίζεται στη σύγκριση της συγκέντρωσης του Cs-137 στην υπό μελέτη περιοχή, με την συγκέντρωση σε μία θέση αναφοράς.

2.3.1 Επιλογή θέσης αναφοράς

Η επιλογή της θέσης αναφοράς είναι καθοριστική για την επιτυχή εκτέλεση της μελέτης της διάβρωσης που είναι βασισμένη στο Cs-137. Η θέση αναφοράς χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η διαφορά της συγκέντρωσης του Cs-137 σε αυτήν και στην διαταραγμένη τοποθεσία. Ο Sutherland (1996) συνόψισε τις πιο πλήρεις βιβλιογραφικές αναφορές που αναφέρονται στην επιλογή των θέσεων αναφοράς. Επίσης, οι Bunzl et al. (1997, 2000), Schuller et al. (1997), Lettner et al. (2000), and Golosov et al. (1999) παραθέτουν την πλέον πρόσφατη βιβλιογραφία σχετικά με τις μεθοδολογίες που πρέπει να ακολουθούνται για την επιλογή των θέσεων αναφοράς. Έτσι, συνοψίζοντας τα παραπάνω, η επιλογή της θέσης αναφοράς πρέπει να γίνεται βάσει των παρακάτω κανόνων:

- Η ιδανική θέση αναφοράς δεν πρέπει να έχει υποστεί απώλεια χώματος (soil loss), ούτε απόθεση ιζήματος (sediment deposition). Η συγκέντρωση

αντανακλά την επιφανειακή απόθεση (fallout) του Cs-137 από την ατμόσφαιρα και τον χρόνο υποδιπλασιασμού του (decay through time). Οι προτιμότερες θέσεις είναι επίπεδες τοποθεσίες στις οποίες δεν ρέει νερό από υψηλότερα σημεία.

- Η ιδανική θέση αναφοράς βρίσκεται κάτω από συνεχιζόμενη χαμηλή βλάστηση από την περίοδο που ξεκίνησε να αποτίθεται Cs-137, που είναι στις αρχές της δεκαετίας του 1950. Η λήψη πληροφοριών από τον ιδιοκτήτη της περιοχής – εφόσον πρόκειται για ιδιωτική έκταση – είναι σημαντική, για να προσδιοριστεί όσο είναι δυνατόν το ιστορικό των αλλαγών στην κάθε τοποθεσία.
- Το καταλληλότερο είδος βλάστησης για την πραγματοποίηση της μελέτης είναι πολυετές γρασίδι ή χαμηλό χόρτο. Η χωρική μεταβλητότητα της επιφανειακής απόθεσης Cs-137 είναι μεγαλύτερη στις δασώσεις επιφάνειες επειδή τα δάση έχουν μεγάλη ποικιλία δέντρων, οπότε η αεροδυναμική των φυλλωμάτων είναι διαφορετική, κάτι που επηρεάζει διαφορετικά την απόθεση του Cs-137 που προέρχεται από την ατμόσφαιρα, στο έδαφος. Το περισσότερο Cs-137 συγκεντρώνεται γύρω από τους κορμούς, επειδή το περισσότερο νερό συγκεντρώνεται κοντά στους κορμούς λόγω των ριζών του δέντρου. Η διαταραχή του επιφανειακού χώματος λόγω της πτώσης φύλλων και λόγω των βιολογικών διεργασιών αυξάνει την περιπλοκότητα στο χώμα των δασών, οπότε η πραγματοποίηση δειγματοληψίας σε δασώδη περιοχή δεν ενδείκνυται.
- Οι προστατευόμενες περιοχές όπως πάρκα, νεκροταφεία, ναοί συνήθως χρησιμοποιούνται ως θέσεις αναφοράς γιατί είναι πολύ πιθανόν ότι το χώμα έχει υποστεί αμελητέα διαταραχή.
- Η θέση αναφοράς πρέπει να βρίσκεται όσο γίνεται πιο κοντά στην διαταραγμένη περιοχή που είναι προς μελέτη.

Πολύ συχνά, είναι εξαιρετικά δύσκολο να ανευρεθούν κατάλληλες τοποθεσίες που πληρούν τα παραπάνω κριτήρια. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται η καλύτερη δυνατή περιοχή. Για παράδειγμα ο Nagle et al. (2000) εργάστηκε σε μία ιδιαίτερα απότομη πλαγιά στην Δομινικανή Δημοκρατία και χρησιμοποίησε ως θέση αναφοράς μια περιοχή με καφεόδεντρα. Όμως, η επαρκής δειγματοληψία του, επέτρεψε τελικά την αξιοποίηση των δειγματοληψιών και μετρήσεων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

2.3.2 Μεταβλητότητα στην θέση αναφοράς

Η μεταβλητότητα της συγκέντρωσης που Cs-137 στα δείγματα που συλλέγονται στη θέση αναφοράς είναι ένα πολύ σημαντικό σημείο και θα πρέπει

κατά το δυνατόν να ελαχιστοποιείται, με κατάλληλο σχεδιασμό της δειγματοληψίας και επιλογή του μεγέθους δείγματος. Ο Owens και ο Walling το 1996 διαπίστωσαν ότι η μεταβλητότητα της συγκέντρωσης του Cs-137 στη θέση αναφοράς μπορεί να διαχωριστεί στις εξής κατηγορίες:

- Τυχαία χωρική μεταβλητότητα, που μπορεί να υπάρχει εξαιτίας μεταβολών στην πυκνότητα του χώματος (bulk density), εξαιτίας της παρουσίας ρωγμών και πετρών στο χώμα, λόγω της επίδρασης της βλάστησης και των ριζών καθώς και της πιθανής διαταραχής του χώματος από ανθρώπους και ζώα.
- Συστηματική χωρική μεταβλητότητα μπορεί να υπάρξει λόγω της επίδρασης των καιρικών φαινομένων (βροχή, αέρας, χιόνι) την στιγμή της επιφανειακής απόθεσης του Cs-137 στο χώμα.
- Μεταβλητότητα δειγματοληψίας, η οποία εξαρτάται από την επιφάνεια δειγματοληψίας και τη συσκευή δειγματοληψίας.
- Μεταβλητότητα εξαιτίας της τεχνικής προετοιμασίας και ανάλυσης των δειγμάτων. Η μεταβλητότητα αυτή επηρεάζεται από την συγκέντρωση Cs-137 του δείγματος, από την χρονική διάρκεια της μέτρησης την απόδοση του ανιχνευτή κλπ. Αυτή η πηγή μεταβλητότητας είναι υψηλότερη όταν τα επίπεδα Cs-137 στο χώμα είναι χαμηλά.

2.4 Δειγματοληψία χώματος

Όπως έχει ήδη γίνει σαφές, η δειγματοληψία χώματος είναι μία διαδικασία απαραίτητη σε μελέτες του ρυθμού διάβρωσης, καθώς δεν είναι δυνατόν να μελετηθεί η περιοχή ελέγχου σε όλη της την έκταση. Αντί για αυτό, μπορεί να γίνει λήψη δειγμάτων από την περιοχή και στη συνέχεια, με κατάλληλη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων προκύπτουν συμπεράσματα για όλη την περιοχή. Για το σχεδιασμό της δειγματοληψίας πρέπει να γίνει κατάλληλος ορισμός του πληθυσμού από όπου θα συλλεχθούν δείγματα, κάτι που εξαρτάται από τους στόχους του ερευνητή. Σε μία έρευνα για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του Cs-137 σε μία θέση αναφοράς, ο πληθυσμός είναι ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων που μπορούν να εξαχθούν από αυτή την θέση. Σε μία μελέτη για τη σύγκριση των ρυθμών διάβρωσης εδαφών όπου έχουν γίνει διαφορετικές αγροτικές εργασίες, κάθε θέση με συγκεκριμένη χρήση της γης είναι ένα αντικείμενο στον συνολικό πληθυσμό των εδαφών. Σε μία μελέτη που συγκρίνει τους ρυθμούς διάβρωσης σε διαφορετικές πλαγιές, κάθε χωρικά ανεξάρτητο κεκλιμένο κομμάτι, αποτελεί ένα αντικείμενο του πληθυσμού. Στις παραπάνω περιπτώσεις δεν μετρείται η συγκέντρωση του Cs-137 ολόκληρου του αντικειμένου, αλλά λαμβάνεται ένα δείγμα, αποσπώντας ένα ποσοστό του αντικειμένου το οποίο ονομάζεται μονάδα εκτίμησης.

Στον σχεδιασμό της δειγματοληψίας, ο αριθμός των αντικειμένων από στα οποία θα γίνει δειγματοληψία και η διαδικασία επιλογής των αντικειμένων αυτών, γίνονται από τον ερευνητή. Ο σχεδιασμός της δειγματοληψίας και ο αριθμός των δειγμάτων που απαιτούνται εξαρτώνται από το σκοπό της υπό εκπόνηση μελέτης.

2.4.1 Οι κατηγορίες μελέτης εδαφών με βάση το Cs-137

Οι Eberhardt και Thomas (1991) προσδιόρισαν οκτώ κατηγορίες μελέτης εδαφών, οι τρεις εκ των οποίων βασίζονται στο Cs-137 και συγκεκριμένα:

- οι περιγραφικές μελέτες (descriptive studies)
- οι αναλυτικές μελέτες και (analytical studies)
- οι πρότυπες μελέτες (pattern-development studies)

Στις περιγραφικές μελέτες, ο σκοπός της δειγματοληψίας είναι ο προσδιορισμός της μέσης τιμής και της διασποράς (συντελεστής μεταβολής) της συγκέντρωσης του Cs-137 για όλο τον πληθυσμό. Αυτές οι τιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί το διάστημα εμπιστοσύνης της συγκέντρωσης γύρω από τη μέση τιμή. Ο αριθμός των δειγμάτων επιλέγεται για να διασφαλίσει ότι τα όρια εμπιστοσύνης γύρω από τη μέση τιμή θα είναι όσο το δυνατόν μικρότερα.

Στις αναλυτικές μελέτες, ο ερευνητής ξεκινά με τον ορισμό μίας υπόθεσης που θα εξεταστεί μέσα στην έρευνα. Για παράδειγμα, συγκρίσεις στους ρυθμούς αναδιανομής του χρώματος ανάμεσα σε διαφορετικά σημεία της πλαγιάς, ή σε χώματα με διαφορετικές ιδιότητες, ή σε εκτάσεις με διαφορετικές αγροτικές εργασίες. Ο αριθμός των δειγμάτων επιλέγεται ώστε να μεγιστοποιήσει την ακρίβεια της εκάστοτε σύγκρισης (Peterman, 1990).

Οι πρότυπες (pattern-development) μελέτες έχουν ως στόχο την δημιουργία χαρτών των περιοχών που είναι υπό μελέτη. Η αρχή που αποτελεί τη βάση αυτής της εκτίμησης είναι ότι η χωρική κατανομή του Cs-137 αντανακλά τις όποιες διεργασίες έχουν πραγματοποιηθεί στην εν λόγω περιοχή. Η χωρική απεικόνιση της κατανομής του Cs-137 η οποία πραγματοποιήθηκε από πολλούς ερευνητές (Govers et al. 1999) τις δεκαετίες του 1980 και του 1990, ήταν πολύ χρήσιμη για να αποδειχτεί ότι οι γεωργικές εργασίες ήταν ένας σημαντικός παράγοντας διάβρωσης του εδάφους. Αυτού του τύπου μελέτες είναι από τις σημαντικότερες που βασίζονται στη μελέτη της κατανομής του Cs-137. Δειγματοληψίες για πρότυπες μελέτες έχουν γίνει τόσο σε γεωργικές εκτάσεις, όσο και σε λεκάνες απορροής.

2.4.2 Αριθμός δειγμάτων και ανάμιξη δειγμάτων

Ο βέλτιστος αριθμός των δειγμάτων που θα συλλεχθούν για μία μελέτη εξαρτάται από το είδος της δειγματοληψίας που θα πραγματοποιηθεί και από τον αριθμό των αντικειμένων (π.χ. αντικείμενα μπορεί να είναι τρεις περιοχές, με διαφορετικά είδη καλλιέργειας). Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη ότι ο αριθμός δειγμάτων που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί η έρευνα εξαρτάται από τους πόρους που είναι διαθέσιμοι. Εάν οι πόροι και τα μέσα δεν επαρκούν, τότε είτε πρέπει να επανακαθοριστούν τα αντικείμενα της μελέτης ή να εγκαταλειφθεί εντελώς η έρευνα.

2.4.2.1 Αριθμός δειγμάτων για περιγραφικές μελέτες

2.4.2.1.1 Απαιτούμενος αριθμός δειγμάτων για περιγραφικές μελέτες

Ο Sutherland (1996) στην εργασία του παρουσιάζει μία σύνοψη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που αφορά σε δειγματοληψίες σε θέσεις αναφοράς. Ένα μέγεθος που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι ο συντελεστής μεταβολής² (CV), ο οποίος συχνά χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του μεγέθους της μεταβλητότητας διαφόρων φυσικών και χημικών ιδιοτήτων στο χώμα, αλλά και ως μέτρο της μεταβλητότητας της συγκέντρωσης του Cs-137 στο χώμα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του Sutherland (1996), από τις 75 θέσεις αναφοράς που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, μόνο για τις 40 αναφέρεται η τιμή του CV της συγκέντρωσης του Cs-137 στο χώμα. Έτσι από αυτές τις αναφορές εκτίμησε την μέση τιμή του CV για την συγκέντρωση του Cs-137, η οποία ήταν 19,3%. Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, τα όρια εμπιστοσύνης ήταν από 13-23,4%, ενώ το εύρος των τιμών του CV ήταν από 1,5-86,4%. Ο ίδιος ερευνητής, στην εργασία του Sutherland et al. (1991), κατάστρωσε την παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό του ελάχιστου πλήθους δειγμάτων (n') που είναι αναγκαίο να συλλεχθούν για τον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης του Cs-137 με σφάλμα που δεν θα υπερβαίνει καθορισμένο όριο, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90%:

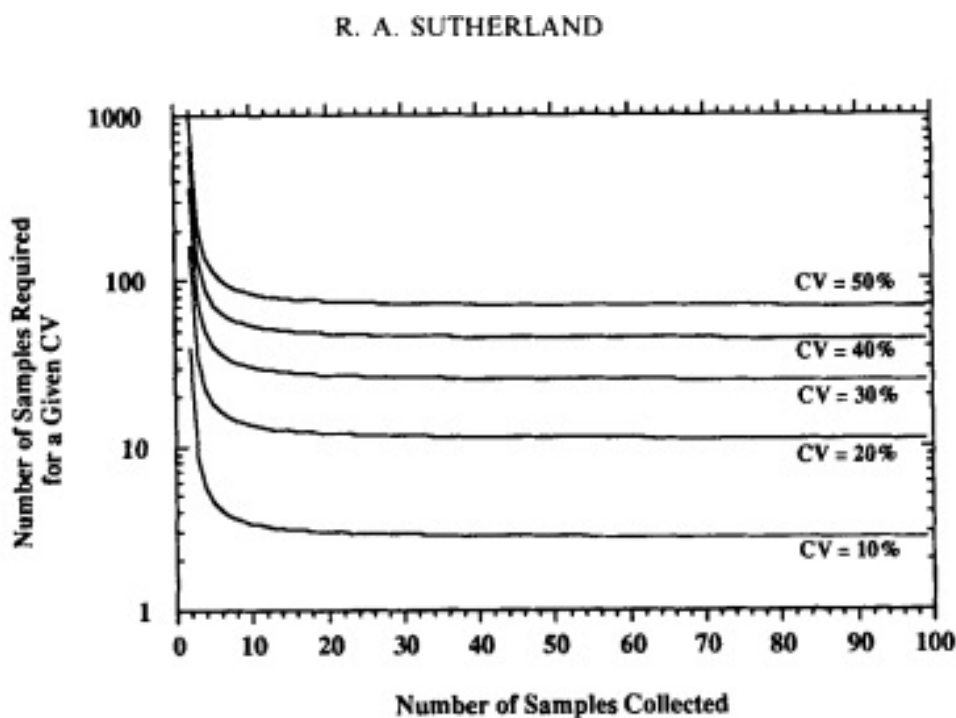
$$n' = \left[\frac{t_{(a,n-1)} \square CV}{AE} \right]^2 \quad (1)$$

t : είναι η τιμή της κατανομής Student για επίπεδο εμπιστοσύνης 90%, με $n-1$ βαθμούς ελευθερίας,

² πρόκειται για το λόγο της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων προς τη μέση τιμή

- n : είναι ο αριθμός των δειγμάτων που έχουν συλλεχθεί,
 CV : είναι ο συντελεστής μεταβολής και
 AE : το καθορισμένο όριο του επιτρεπόμενου σφάλματος, (π.χ. 10%).

Κατά την προσέγγιση του Sutherland, η τιμή του n' που υπολογίζεται από τη σχέση (1) συγκρίνεται με το n και εξακριβώνεται η επάρκεια του μεγέθους του δείγματος. Με εφαρμογή της σχέσης (1) και με ένα επιτρεπόμενο σφάλμα $AE=10\%$, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90%, εκτιμάται ότι το απαιτούμενο μέγεθος δείγματος για κάθε θέση (χρησιμοποιώντας για το CV τη μέση τιμή 19,3% που εκτίμησε ο Sutherland) είναι 11, με περιοχή εμπιστοσύνης [6-16] σε για επίπεδο εμπιστοσύνης 90%. Το σχήμα 2.5 απεικονίζει το απαιτούμενο μέγεθος δείγματος που πρέπει να συλλεχθεί, με επιτρεπόμενο σφάλμα 10% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90% για τιμές του CV από 10-50%.



Σχήμα 2.5 Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της σχέσης (1)

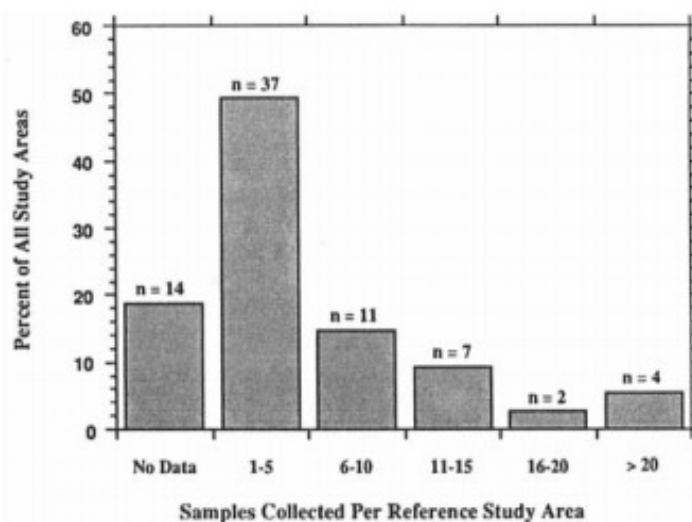
Το σχήμα αυτό αποκαλύπτει το πρόβλημα της χαμηλής ακρίβειας, όταν ο αριθμός των δειγμάτων που συλλέγονται είναι μικρός.

Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται κατά την εκτίμηση του απαιτούμενου αριθμού δειγμάτων σε μία θέση, είναι ότι οι συσκευές δειγματοληψίας που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία δεν είναι τυποποιημένες, δηλαδή δεν έχουν ίδια επιφάνεια δειγματοληψίας. Δύο προσεγγίσεις είναι συνηθισμένες. Η μία χρησιμοποιεί

κυλινδρικούς σωλήνες επιφανειών δειγματοληψίας από 20-80 cm^2 και η άλλη χρησιμοποιεί ορθογωνικά πλαίσια επιφάνειας δειγματοληψίας έως 1000 cm^2 . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκύψουν διαφορετικά CV, από την δειγματοληψία σε μία περιοχή, με συσκευές δειγματοληψίας που συλλέγουν διαφορετικά εμβαδά δειγμάτων. Γενικά, η τιμή του CV θα είναι μικρότερη, όσο μεγαλύτερες θα είναι οι επιφάνειες δειγματοληψίας. Παρ' όλα αυτά, το CV για 12·N δείγματα που θα συλλεχθούν από επιφάνεια δειγματοληψίας 80 cm^2 θα είναι ίδιο με N δείγματα που θα συλλεχθούν από επιφάνεια δειγματοληψίας³ 1000 cm^2 .

2.4.2.1.2 Επισκόπηση του αριθμού δειγμάτων στην θέση αναφοράς, που χρησιμοποιήθηκαν σε μελέτες διάβρωσης

Από την έρευνα που πραγματοποίησε ο Sutherland (1996) προέκυψε ότι γενικά, έντεκα δείγματα είναι ένας επαρκής αριθμός για τις περισσότερες περιπτώσεις θέσεων αναφοράς, υποθέτοντας ότι τα δείγματα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και τυχαία. Από διερεύνηση στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, διαπιστώθηκε, ότι μόνο το 17% των ερευνών (13 από τις 75) ικανοποίησαν αυτή την απαίτηση, όπως φαίνεται στο (Σχ. 2.6)

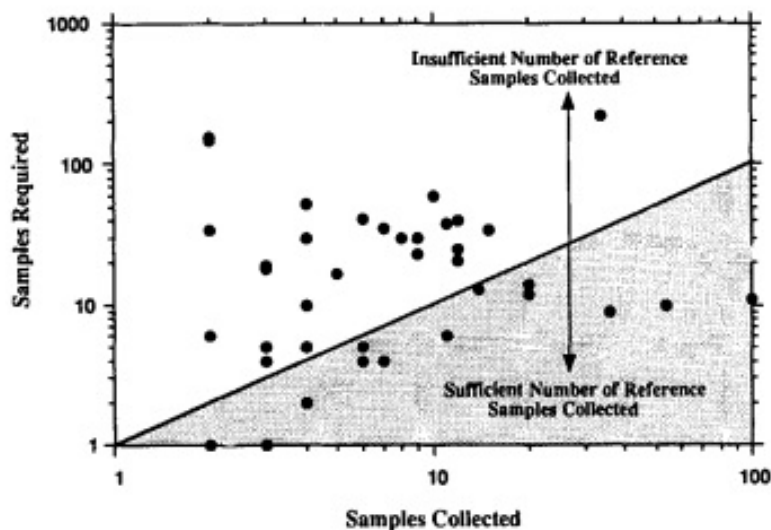


Σχήμα 2.6 Τα δείγματα που έχουν συλλεχθεί στις μελέτες θέσεων αναφοράς

Αυτό το διάγραμμα, αποδεικνύει ότι η προσοχή που δίνεται στην συλλογή του σωστού αριθμού δειγμάτων στη θέση αναφοράς, είναι πολύ μικρή. Αυτό αποδεικνύεται και από το Σχ. 2.7, από το οποίο διαπιστώνεται ότι μόνο από το 1/3 των θέσεων αναφοράς (13 από τις 40) για μελέτη Cs-137 συλλέχθηκαν επαρκή

³ 12·80 cm^3 = 960 cm^3 \approx 1000 cm^3

δείγματα. Πάντως, θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο περιορισμένος αριθμός δειγμάτων πιθανότατα οφείλεται όχι σε κακό σχεδιασμό της έρευνας, αλλά σε δυσκολίες κατά τη δειγματοληψία.



Σχήμα 2.7 Η σχέση μεταξύ του αριθμού των δειγμάτων που συλλέχθηκαν και του αριθμού των δειγμάτων που απαιτούνταν

2.4.2.2 Αριθμός δειγμάτων για αναλυτική δειγματοληψία

Στην αναλυτική μελέτη ο κύριος σκοπός είναι να συγκρίνουμε τις τιμές του Cs- 137 σε δύο ή περισσότερες ομάδες δειγμάτων⁴ κάνοντας στατιστικά τεστ. Στην απλούστερη μορφή του στατιστικού τεστ, διατυπώνονται δύο στατιστικές υποθέσεις: η μηδενική υπόθεση (H_0) της μη σημαντικής διαφοράς ανάμεσα στις δύο ομάδες και η εναλλακτική υπόθεση μίας σημαντικής διαφοράς μεταξύ τους.

Υπάρχουν δύο τύποι σφαλμάτων τα οποία μπορεί να εμφανισθούν κατά την εκτέλεση του test: το σφάλμα τύπου I, που συμβαίνει όταν απορρίπτουμε την μηδενική υπόθεση, ενώ στην πραγματικότητα αυτή είναι αληθής και το σφάλμα τύπου II, που συμβαίνει όταν αποδεχόμαστε την μηδενική υπόθεση, ενώ στην πραγματικότητα αυτής είναι ψευδής. Η πιθανότητα να έχουμε υποπέσει σε σφάλμα τύπου I, ονομάζεται επίπεδο σημαντικότητας και συμβολίζεται διεθνώς με το γράμμα « α ». Η ονομασία αυτή οφείλεται στο ότι, η πιθανότητα αναφέρεται στον κίνδυνο να κρίνουμε ως σημαντική μία διαφορά, ενώ δεν είναι. Η πιθανότητα να έχουμε πέσει σε σφάλμα τύπου II συμβολίζεται με το « β » και η ονομασία της προκύπτει έμμεσα από

⁴ Στην περίπτωση μας μία ομάδα δειγμάτων (με τουλάχιστον 11 δείγματα) αντιστοιχεί σε μία περιοχή.

την ονομασία του συμπληρωματικού της μεγέθους « $I-\beta$ », που ονομάζεται ισχύς του test. Έτσι, προκειμένου να καθορίσουμε το μέγεθος του δείγματος, θα πρέπει να προεπιλέξουμε τις εξής δύο πιθανότητες: το επίπεδο σημαντικότητας (α) και την πιθανότητα (β). Ο Peterman (1990) διατύπωσε την άποψη ότι οι συνέπειες της διάπραξης του σφάλματος τύπου II είναι δυσμενέστερες από αυτές του σφάλματος τύπου I. Τα τεστ χαμηλής ισχύος (υψηλή τιμή του β) είναι πολύ πιθανό να μην μπορούν να εντοπίσουν μία διαφορά ανάμεσα σε 2 ή περισσότερες ομάδες δειγμάτων, όταν πράγματι αυτή η διαφορά υπάρχει. Για παράδειγμα, ένα χαμηλής ισχύος τεστ ίσως να μην εντοπίσει μία αξιοσημείωτη διαφορά στη συγκέντρωση του Cs-137 ανάμεσα σε μία αδιατάραχτη περιοχή και σε μία περιοχή που έχει υποστεί διάβρωση. Αν και το κατάλληλο επίπεδο ισχύος του τεστ, πρέπει να αντανακλά το είδος και την ακρίβεια της μελέτης που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε, ο Peterman (1990) πρότεινε ότι γενικά στις μελέτες αυτού του είδους η μέγιστη τιμή του β πρέπει να είναι 0.2, επομένως η ισχύς του τεστ να είναι 0.80. Η ισχύς του τεστ θα πρέπει να επιλέγεται, λαμβάνοντας υπόψη 4 παράγοντες:

- το επίπεδο σημαντικότητας α που επιλέγεται,
- την τιμή του συντελεστή μεταβολής (CV) για κάθε ομάδα,
- τον μέγεθος δείγματος (N) σε κάθε ομάδα και
- την πραγματική διαφορά στις τιμές της συγκέντρωσης Cs-137 ανάμεσα στις ομάδες.

Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την ισχύ του τεστ ως εξής (Peterman, 1990): Όσο μικρότερη είναι η πιθανότητα για σφάλμα τύπου I (α), τόσο μικρότερη είναι η ισχύς του τεστ (διατηρώντας τους άλλους παράγοντες σταθερούς). Επιπλέον, όσο μεγαλύτερο είναι το CV στις ομάδες, τόσο μικρότερη θα είναι η ισχύς του τεστ. Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο (2.4.2.1.1) η τιμή του CV των θέσεων αναφοράς έχει μέση τιμή 19,3%, ενώ στις διαταραγμένες θέσεις είναι υψηλότερο. Το CV εξαρτάται από την χωρική κατανομή του Cs-137 και δεν μπορεί να μειωθεί (Bunzl et al., 1997, Lettner et al., 2000). Οπότε, η μελέτη πρέπει να γίνει έχοντας τους περιορισμούς εξαιτίας της μεταβλητότητας της τιμής του Cs-137, ανάλογα το σημείο. Οι Mc Gee et al., (1995) προσπάθησε να διερευνήσει την επίδραση που έχει στο απαιτούμενο μέγεθος δείγματος, η επιλογή των πιθανοτήτων α και β , συναρτήσει και της πραγματικής διαφοράς μεταξύ των δύο δειγμάτων⁵ (size effect). Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής παρατίθενται στον Πίνακα 1.1. Τα αποτελέσματα του Πίνακα έχουν ληφθεί για δίπλευρο t-test με σταθερό CV = 20% και ισχύ του τεστ στο 80%.

⁵ Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η πραγματική διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στην μέση τιμή της συγκέντρωσης του Cs-137 για τη θέση αναφοράς και για τη διαταραγμένη περιοχή.

<i>Effect size (% real difference between beans)</i>	<i>Probability of Type I error (α)</i>			
	<i>0.01</i>	<i>0.05</i>	<i>0.10</i>	<i>0.20</i>
<i>Number of samples required for power of 0.80</i>				
5	376	253	199	145
10	96	64	51	37
15	44	29	23	17
20	26	17	14	10
25	17	12	9	7
30	13	9	7	5
40	8	6	4	3
50	6	4	3	3

Πιν. 1.1 Ο αριθμός των δειγμάτων που απαιτούνται για την επίτευξη ισχύος 0.80, για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων

Όπως γίνεται φανερό από τον Πίνακα 1.1, διαφορές ανάμεσα στις δύο μέσες τιμές που είναι μικρότερες από 5%, απαιτούν για ισχύ 0.8 έναν τεράστιο αριθμό δειγμάτων, ακόμα και για πολύ υψηλές τιμές του επίπεδου σημαντικότητας α . Κατά συνέπεια, είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευτούν χαμηλά επίπεδα απώλειας χρώματος σε μία τοποθεσία, χρησιμοποιώντας την παραπάνω τεχνική. Αντίθετα, αν η διαφορά των μέσων τιμών είναι 25%, τότε αρκούν 10 δείγματα σε κάθε ομάδα, για ισχύ του τεστ 0.80, για τιμή του $\alpha=0.10$.

2.4.2.3 Αριθμός δειγμάτων για πρότυπες μελέτες

Σε μία πρότυπη μελέτη το αντικείμενο της δειγματοληψίας είναι η δημιουργία ενός χάρτη της επιφάνειας προς μελέτη, όπου θα διακρίνονται αναλυτικά οι περιοχές, ανάλογα την ποσότητα του Cs-137 που θα έχει αποτεθεί. Ο βέλτιστος αριθμός δειγμάτων εξαρτάται από την χωρική κατανομή των ραδιοϊσοτόπων στην τοποθεσία, την τοπογραφική και εδαφολογική πολυπλοκότητα της τοποθεσίας.

2.4.2.4 Ανάμιξη δειγμάτων

Πολύ συχνά, κατά τη δειγματοληψία επιλέγεται να γίνει ανάμιξη δειγμάτων. Κατά τη διαδικασία αυτή, δύο ή περισσότερα ανεξάρτητα μεταξύ τους δείγματα, αναμιγνύονται. Η ανάμιξη αναφέρεται συνήθως σε δύο ξεχωριστές περιπτώσεις:

- ανάμιξη υπο-δειγμάτων του ίδιου σημείου και
- ανάμιξη χωρικά ανεξαρτήτων δειγμάτων από διαφορετικά σημεία.

Στην πρώτη περίπτωση, αναμιγνύονται δείγματα που δεν είναι χωρικά ανεξάρτητα. Η αναφορά που έχει γίνει στον αριθμό των δειγμάτων, υποθέτει ότι τα δείγματα είναι χωρικά ανεξάρτητα, δηλαδή ότι η απόσταση μεταξύ τους είναι μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο όριο. Αυτό το όριο δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά ορίζεται για κάθε μελέτη ξεχωριστά και ονομάζεται εύρος της χωρικής ανεξαρτησίας. Για λόγους απλότητας, μπορεί να θεωρηθεί ως γενικός κανόνας ότι κάθε δείγμα, για να θεωρηθεί χωρικά ανεξάρτητο, θα πρέπει να απέχει από τα άλλα δείγματα τουλάχιστον 10 μέτρα (εύρος χωρικής ανεξαρτησίας) (Sutherland, 1994). Εάν 2 ή περισσότερα δείγματα βρίσκονται μέσα στο εύρος της χωρικής εξάρτησης, τότε δεν είναι χωρικά ανεξάρτητα, αποτελούν υπο-δείγματα του ίδιου σημείου και θα πρέπει να αναμιχθούν.

Η ανάμιξη χωρικά ανεξάρτητων δειγμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένων ειδών μελέτες. Σε μελέτες που μας ενδιαφέρουν μόνο συνοπτικά στατιστικά, χωρίς να ενδιαφέρει η εκτίμηση της μεταβλητότητας της συγκέντρωσης στην περιοχή, η ανάμιξη δειγμάτων μπορεί να αποδειχτεί χρήσιμη. Επίσης είναι πολύ σημαντικό, όλα τα δείγματα που αναμιγνύονται σε ένα σύνθετο, να είναι ίσου μεγέθους και να έχουν συλλεχθεί με παρόμοια διαδικασία. Ενώ τα σύνθετα δείγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις περιγραφικές και αναλυτικές μελέτες, η χρήση τους στις πρότυπες μελέτες είναι πολύ περιορισμένη, καθώς μειώνεται η ακρίβεια η οποία μπορεί να επιτευχθεί.

2.4.2.5 Σύνοψη των κανόνων για τον αριθμό των δειγμάτων

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε ότι για την περίπτωση δειγματοληψίας χωρικά ανεξάρτητων δειγμάτων:

- Οι περιγραφικές μελέτες για τον καθορισμό της συγκέντρωσης σε μία θέση αναφοράς απαιτούν κατ' ελάχιστον 11 δείγματα.
- Η δειγματοληψία για αναλυτικές μελέτες (σύγκριση μεταξύ 2 ή περισσότερων ομάδων) απαιτούν κατ' ελάχιστον 10 δείγματα σε κάθε ομάδα για να ανιχνευτούν διαφορές στη συγκέντρωση του Cs-137. Ο αριθμός των δειγμάτων που απαιτείται για να ανιχνευτούν διαφορές <10% ανάμεσα στις μέσες τιμές των συγκεντρώσεων του Cs-137, είναι πολύ μεγάλος προκειμένου να επιτευχθούν λογικά επίπεδα ισχύος.
- Η δειγματοληψία για την δημιουργία χαρτών Cs-137, απαιτεί 20-30 δείγματα για απλές επιφάνειες, 30-50 δείγματα για πιο σύνθετες επιφάνειες και 100 δείγματα και άνω για γεωστατιστικές εκτιμήσεις.

2.5 Σχεδιασμός δειγματοληψίας

Ο σχεδιασμός της δειγματοληψίας αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο επιλέγονται τα σημεία από τα οποία θα συλλεχθεί δείγμα και η σχέση τους με τα άλλα σημεία που θα συλλεχθούν δείγματα. Ο Gilbert (1987) έκανε μία επισκόπηση των μεθόδων σχεδιασμού δειγματοληψίας και τους χώρισε σε αυτούς που έχουν βάση την πιθανότητα (probability based) και σε αυτούς που δεν έχουν βάση την πιθανότητα (non-probability-based).

2.5.1 Τυχαίος και κριτικός σχεδιασμός

Ο τυχαίος σχεδιασμός είναι ο κύριος τύπος του σχεδιασμού δειγματοληψίας σε μη-πιθανολογική βάση. Όπως αναφέρει και το όνομά του, ο τυχαίος σχεδιασμός είναι ένα σχεδιασμός που δεν έχει συγκεκριμένη λογική βάση και τα δείγματα συλλέγονται από τυχαία σημεία, ανάλογα με την τοποθεσία. Αυτός ο σχεδιασμός σύμφωνα με τους περισσότερους ερευνητές, πρέπει να αποφεύγεται. Ο Sutherland (1996) έχει σχολιάσει αρνητικά μεγάλο αριθμό δειγματοληψιών στην δημοσιευμένη βιβλιογραφία για θέσεις αναφοράς, που έχουν πραγματοποιηθεί με τον συγκεκριμένο σχεδιασμό.

Στον σχεδιασμό σε κριτική βάση (judgement design) ο ερευνητής πραγματοποιεί μία επισκόπηση της προς μελέτη περιοχής, ώστε να επιλέξει τα σημεία της δειγματοληψίας. Για παράδειγμα, ένας ερευνητής με καλή κατανόηση της σχέσης μεταξύ της αναδιανομής χρώματος και των εδαφών υπό κλίση, ίσως επιλέξει να πραγματοποιήσει δειγματοληψία μόνο στις περιοχές που βρίσκονται υπό κλίση, για να κατατάξει τον ρυθμό διάβρωσης, διαφορετικών τοποθεσιών. Πάντως, οι Webster και Yaalon (1994) εξέφρασαν διαφωνία στο σκεπτικό ότι μερικά καλά επιλεγμένα δείγματα από έναν έμπειρο ερευνητή έχουν μεγαλύτερη αξία από έναν πρόχειρο σχεδιασμό σε πιθανολογική βάση.

Η δειγματοληψία σε κριτική βάση ενδείκνυται για το αναγνωριστικό στάδιο της μελέτης. Έτσι, θα συλλεχθούν ορισμένα δείγματα που θα δίνουν ενδείξεις για την παρουσία Cs-137 στην περιοχή και τον ρυθμό διάβρωσης και θα αποτελέσουν ένα βοήθημα στην πραγματοποίηση της τελικής δειγματοληψίας. Τα δείγματα που συλλέγονται με αυτόν τον τρόπο όμως, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στατιστική ανάλυση και τεστ.

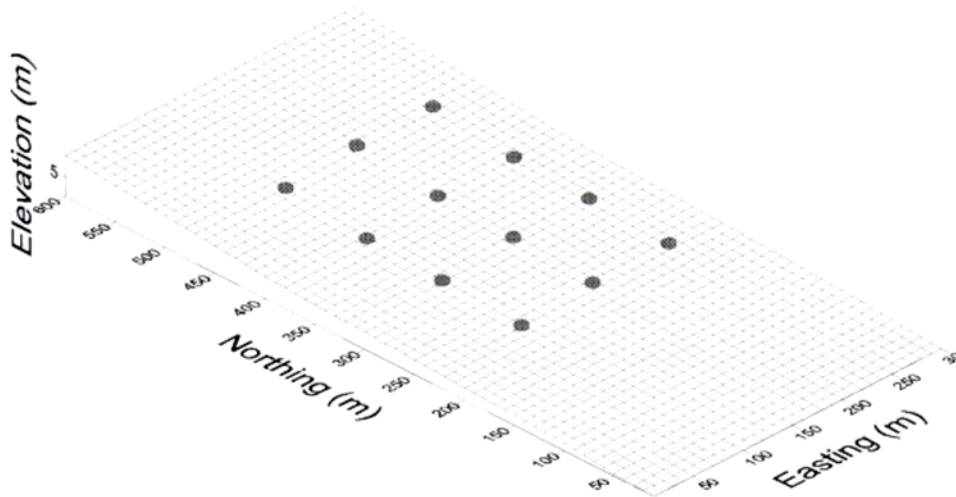
2.5.2 Σχεδιασμός σε πιθανολογική βάση

Αυτού του είδους ο σχεδιασμός βασίζεται στην πιθανότητα ότι οποιοδήποτε σημείο στην τοποθεσία μπορεί να επιλεγεί για δειγματοληψία. Ο σχεδιασμός σε πιθανολογική βάση απαιτείται στις περιγραφικές, αναλυτικές και πρότυπες μελέτες. Ο σχεδιασμός αυτός επίσης χωρίζεται σε 2 είδη: τη στρωματοποιημένη και τη μη-στρωματοποιημένη μελέτη. Στην μη-στρωματοποιημένη μελέτη, όλα τα σημεία της προς μελέτη τοποθεσίας έχουν ίση πιθανότητα να επιλεγούν για δειγματοληψία, ενώ την στρωματοποιημένη μελέτη τα σημεία χωρίζονται σε καθορισμένες ομάδες και η πιθανότητα να επιλεγούν εξαρτάται από την ομάδα στην οποία βρίσκονται.

2.5.2.1 Σχεδιασμός δειγματοληψίας για περιγραφικές και πρότυπες μελέτες

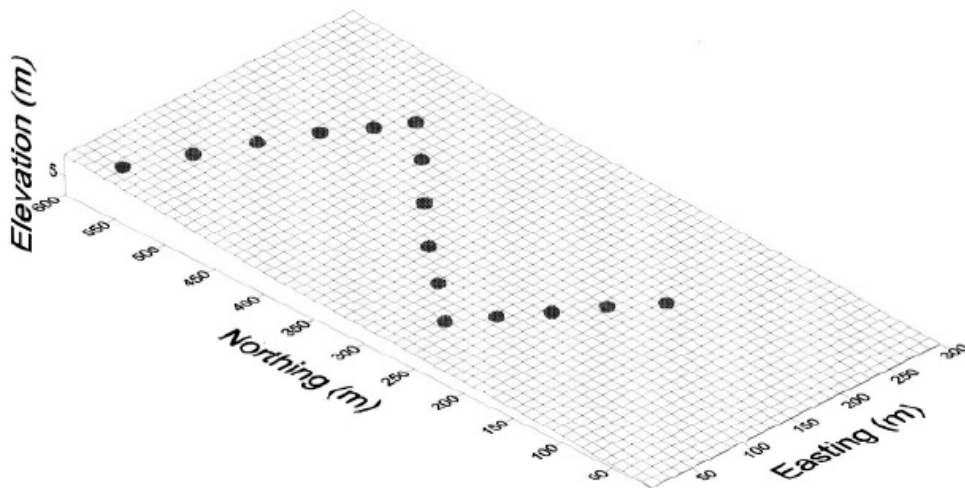
Αν και υπάρχουν αρκετοί τύποι σχεδιασμού δειγματοληψιών, μόνο δύο τύποι χρησιμοποιούνται στις γεωλογικές επιστήμες, η τυχαία και η συστηματική. Η τυχαία δειγματοληψία είναι, η συλλογή δειγμάτων από τυχαία σημεία της τοποθεσίας προς μελέτη. Όμως, σύμφωνα με τους Wolcott και Church (1991) απαιτούνται πάνω από 500 τυχαία επιλεγμένα σημεία για δειγματοληψία για να επιτύχουμε την ίδιας ποιότητας στατιστική πληροφορία με 100 συστηματικά επιλεγμένα σημεία.

Ο πιο συνηθισμένος σχεδιασμός δειγματοληψίας για μελέτες μέσω ραδιοϊσοτόπων είναι η συστηματική, μη στρωματοποιημένη δειγματοληψία χρησιμοποιώντας διατομές ή πλέγματα (transects ή grids), όπως φαίνεται στα σχήματα 2.9 έως 2.14. Αυτό το πλάνο δειγματοληψίας είναι πολύ χρήσιμο για την στατιστική ανάλυση στις περιγραφικές μελέτες. Ο σχεδιασμός πλέγματος είναι ο πιο κατάλληλος για την δημιουργία χαρτών στις πρότυπες μελέτες. Ο συστηματικός σχεδιασμός συχνά υφίσταται κριτική από τους επιστήμονες της στατιστικής, άλλα η ευκολία με την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η ικανότητα με την οποία μπορούμε να συλλέξουμε πληροφορίες τον κάνει πολύ δημοφιλή στις γεωλογικές μελέτες. Στις περισσότερες μελέτες η απόσταση μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας είναι σταθερή για όλα τα σημεία σε μία δεδομένη διατομή ή πλέγμα.



**Σχήμα 2.9 Παράδειγμα δειγματοληψίας πλέγματος
(αποτελεί την βέλτιστη επιλογή για μία τοποθεσία αναφοράς)**

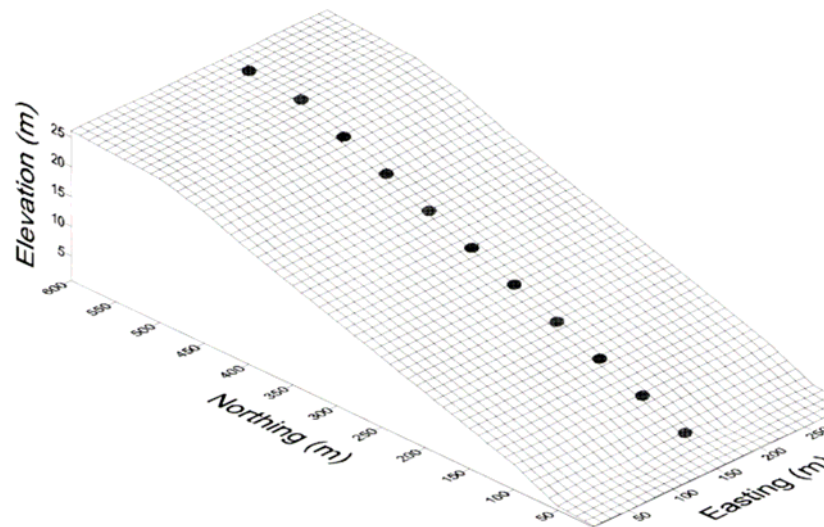
Η επιλογή για το αν θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη διατομές ή πλέγματα πρέπει να γίνει στην βάση της μορφολογίας και της πολυπλοκότητας της τοποθεσίας προς μελέτη. Για τις επίπεδες τοποθεσίες, όπως η ιδανική τοποθεσία αναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διατομές και πλέγματα (Σχ. 2.9). Ο Sutherland (1996) πρότεινε την χρήση πλέγματος για την δειγματοληψία σε θέση αναφοράς. Σε γεωπονική δειγματοληψία προτείνεται η χρήση μίας σειράς διατομών διατεταγμένες σε ζιγκ-ζαγκ (Σχ. 2.10).



Σχήμα 2.10 Παράδειγμα δειγματοληψίας ζιγκ-ζαγκ

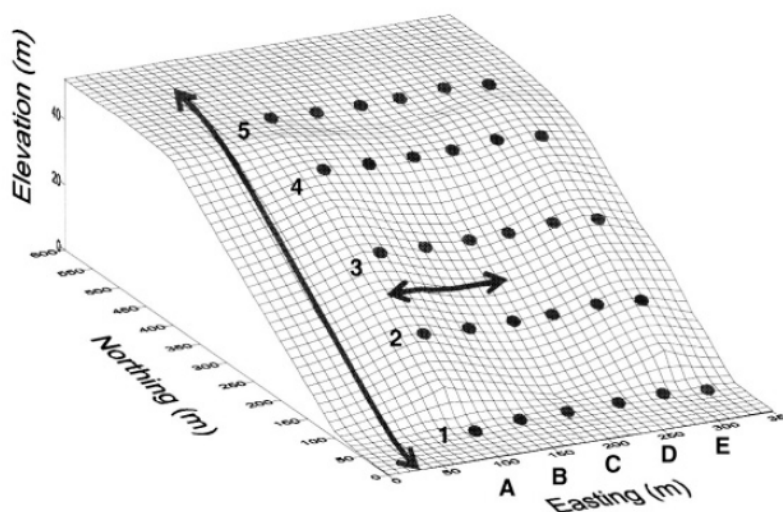
Η καταλληλότητα των διατομών σε επιφάνειες με κλίση εξαρτάται από την καμπυλότητα κατά πλάτος της πλαγιάς. Όταν υπάρχει μηδενική καμπυλότητα κατά πλάτος, κάθε σημείο της διατομής λαμβάνει ροή μόνο από τα σημεία που είναι πάνω

από αυτό (Σχ. 2.11). Σε αυτήν την περίπτωση, η μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων του ραδιοϊσοτόπου μπορούν να βρεθούν με μία απλή διατομή.



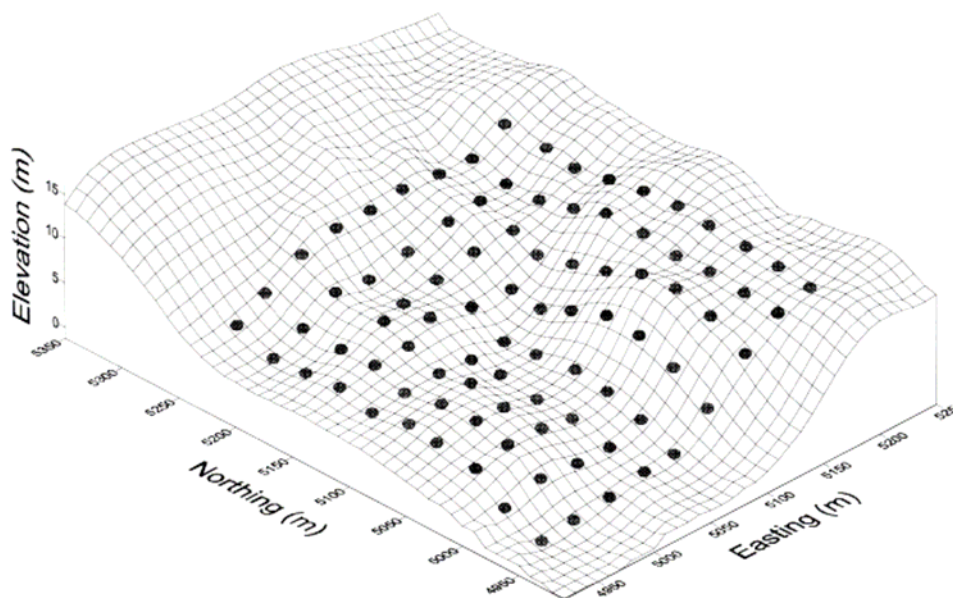
Σχήμα 2.11 Παράδειγμα δειγματοληψίας απλής διατομής σε κεκλιμένο επίπεδο

Εάν όμως υπάρχει καμπυλότητα κατά πλάτος, τότε η απλή διατομή δεν θα είναι κατάλληλη για την πραγματοποίηση της μελέτης. Για το τοπίο του σχήματος 2.12, η δειγματοληψία στην διατομή A θα γινόταν μόνο σε αποκλίνοντα τμήματα της πλαγιάς, ενώ η διατομή C θα περιλάμβανε μόνο συγκλίνοντα τμήματα της πλαγιάς. Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να γίνει χρήση διατομών διατεταγμένων σε ζιγκ-ζαγκ ή πολλαπλές διατομές σε τυχαίες θέσεις. Συνήθως όμως σε τέτοια περίπτωση μορφολογίας εδάφους χρησιμοποιείται πλέγμα, δηλαδή ένας αριθμός διατομών παράλληλων μεταξύ τους και σε ίσες αποστάσεις.



Σχήμα 2.12 Παράδειγμα δειγματοληψίας πλέγματος σε επιφάνεια με καμπυλότητα κατά μήκος και κατά πλάτος

Είναι σημαντικό να διασφαλισθεί ότι όλα τα τμήματα της πλαγιάς περιλαμβάνονται στα όρια του πλέγματος. Ένας κανόνας είναι ότι το πλέγμα θα πρέπει να περιλαμβάνει όλη την επιφάνεια από την κορυφή της πλαγιάς έως τους πρόποδες της και να περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα αποκλίνων-συγκλίνων τμήμα κατά πλάτος της επιφάνειας.

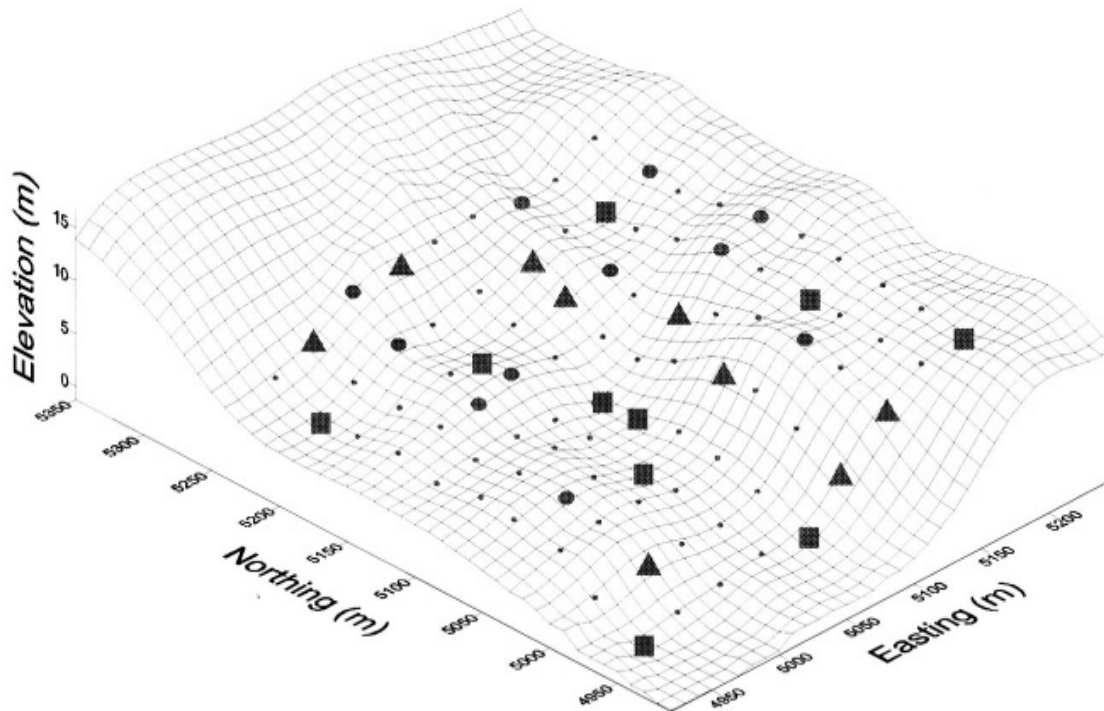


Σχήμα 2.13 Δειγματοληψία πλέγματος σε σύνθετη επιφάνεια

Σε πολύπλοκες επιφάνειες όπως του σχήματος 2.13, το μεγάλο εύρος καμπυλωτών και κυρτών τμημάτων απαιτεί την χρήση ενός πλέγματος δειγματοληψίας. Η απόσταση μεταξύ των σημείων του πλέγματος εξαρτάται από την επιφάνεια όπου θα συλλεχθούν τα δείγματα, αλλά γενικά η απόσταση μεταξύ των ευθειών του πλέγματος είναι μεταξύ 10 και 25 μέτρων.

2.5.2.2 Σχεδιασμός δειγματοληψίας στις αναλυτικές μελέτες

Για την αναλυτική δειγματοληψία (ο σχεδιασμός έχει ως σκοπό την εύρεση διαφορών μεταξύ 2 ομάδων), η χρήση μη-στρωματοποιημένου, συστηματικού σχεδιασμού ίσως είναι ακατάλληλη. Για παράδειγμα, σε μία τοποθεσία όπου το 60% έχει ταξινομηθεί ως μία κατηγορία μορφολογίας και 5% έχει ταξινομηθεί ως μία δεύτερη κατηγορία μορφολογίας, ένα πλέγμα 100 σημείων θα καλύψει περίπου 60 σημεία από την πρώτη κατηγορία και 5 σημεία από την δεύτερη κατηγορία. Αν λάβουμε υπόψη τους βασικούς κανόνες που απαιτούν 10 δείγματα για κάθε ομάδα, για ένα στατιστικό τεστ με ικανοποιητική ισχύ, η πρώτη κατηγορία έχει πλεόνασμα δειγμάτων, ενώ η δεύτερη έχει έλλειμμα δειγμάτων.



Σχήμα 2.14 Τυχαία επιλογή 10 σημείων από κάθε μία από τις 3 μορφολογίες εδάφους

Σύμφωνα με του Eberhardt et al (1976), ο κατάλληλος αριθμός δειγμάτων για μια αναλυτική μελέτη μπορεί να συλλεχθεί από μία a-priori κατάταξη των σημείων σε σχετικές ομάδες και μετά μία τυχαία επιλογή των σημείων μίας ομάδας, μέχρι να συγκεντρωθεί ο επιθυμητός αριθμός. Στο σχήμα 2.14 σχεδιάστηκε ένα πλέγμα στην επιφάνεια και μετά κάθε σημείο του πλέγματος ταξινομήθηκε σε μία από τις τρεις ομάδες, η οποίες χωρίστηκαν ανάλογα την κλίση στον κάθε σημείο. Τα σημεία του πλέγματος επιλέγονται τυχαία μέχρι να συγκεντρωθούν 10 δείγματα σε κάθε μία από τις 3 ομάδες. Τα αποτελέσματα για ολόκληρη την τοποθεσία μπορούν να εκτιμηθούν σταθμίζοντας τα αποτελέσματα της κάθε ομάδας, ανάλογα το ποσοστό της επιφάνειας που καλύπτει στην τοποθεσία, υποθέτοντας ίδιο CV σε κάθε ομάδα. Επισημαίνεται ότι το στρωματοποιημένο συστηματικό πλέγμα δεν είναι σε θέση να δημιουργήσει μία ομάδα τιμών η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία ενός χάρτη, κάτι που είναι το ζητούμενο σε μία πρότυπη μελέτη.

2.5.2.3 Σύνοψη των κανόνων για την επιλογή του κατάλληλου σχεδιασμού δειγματοληψίας

- Στις επίπεδες θέσεις αναφοράς πρέπει να συλλεχθούν δείγματα χρησιμοποιώντας συστηματική δειγματοληψία πλέγματος.

- Στις απλές πλαγιές χωρίς καμπυλότητα κατά πλάτος, μπορούν να συλλεχθούν δείγματα χρησιμοποιώντας μία διατομή. Η διατομή πρέπει να εκτείνεται από την κορυφή έως τους πρόποδες της πλαγιάς.
- Στις πλαγιές με καμπυλότητα κατά πλάτος θα πρέπει να πραγματοποιηθεί συστηματική, μη στρωματοποιημένη δειγματοληψία πλέγματος για περιγραφικές μελέτες. Το πλέγμα θα πρέπει να περιλαμβάνει όλη την επιφάνεια από την κορυφή της πλαγιάς έως του πρόποδες της και να περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα αποκλίνων-συγκλίνων τμήμα κατά πλάτος της επιφάνειας.
- Για σύνθετες επιφάνειες θα πρέπει να χρησιμοποιείται συστηματική δειγματοληψία πλέγματος. Η απόσταση μεταξύ των σημείων πρέπει να είναι μεταξύ 10 και 25 μέτρων. Για αναλυτικές μελέτες πρέπει να γίνεται στρωματοποιημένη δειγματοληψία πλέγματος. Η επιφάνεια πρέπει να χωρίζεται σε κατηγορίες ανάλογα την μορφολογία του εδάφους και να συλλέγονται τυχαία δείγματα από τουλάχιστον 10 σημεία.

3. Μέθοδοι δειγματοληψίας

Όπως έχει γίνει σαφές από τα αναφερόμενα στο προηγούμενο Κεφάλαιο, ανεξάρτητα από το είδος της μελέτης η οποία πρόκειται να πραγματοποιηθεί, απαιτείται η συλλογή μίας σειράς δειγμάτων χώματος, τα οποία μετά από κατάλληλη επεξεργασία θα αναλυθούν στο εργαστήριο με στόχο τον προσδιορισμό του ραδιενεργού ισότοπου που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη μελέτη. Οι μέθοδοι για την συλλογή δειγμάτων χώματος, προκειμένου να καθοριστούν τα επίπεδα του Cs-137 και άλλων ραδιοϊσοτόπων, όπως ο Pb-210 και το Be-7, εξαρτώνται από τους σκοπούς της συγκεκριμένης μελέτης, την τοποθεσία, τα χαρακτηριστικά του χώματος, τον συνολικό αριθμό των δειγμάτων που απαιτούνται και την μάζα δείγματος που απαιτείται.

Ένα μεγάλο πλήθος μεθόδων δειγματοληψίας, οι οποίες χρησιμοποιούνται για διαφορετικές περιπτώσεις και συνθήκες, έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 25 χρόνια. Οι μέθοδοι αυτές προέρχονται κυρίως από τις επιστήμες του χώματος (soil science) και την ιζηματολογία. Για τις μελέτες διάβρωσης χρησιμοποιείται κυρίως το Cs-137, ενώ η χρήση του Pb-210 και του Be-7 είναι ακόμα στη φάση της ανάπτυξης. Αν και είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις όλων των παραπάνω ισότοπων ταυτόχρονα, είναι σύνηθες στις μελέτες να χρησιμοποιείται μόνο το Cs-137. Οι μελέτες μέσω του Cs-137 απαιτούν τη σύγκριση της συγκέντρωσης του σε μία διαβρωμένη τοποθεσία (eroded) με τη συγκέντρωσή του στη θέση αναφοράς. Συνήθως μάλιστα, προκειμένου να είναι δυνατή η εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης από τη διαφορά των συγκεντρώσεων, απαιτείται η εύρεση της κατά βάθος κατανομής του υπό μελέτη ισότοπου.

Ανάλογα με το υπό μελέτη ισότοπο, η κατά βάθος κατανομή διαφέρει και ομοίως διαφέρει και το βήμα της κατά βάθος δειγματοληψίας που απαιτείται να γίνει. Για παράδειγμα, στο αδιατάρακτο έδαφος το Cs-137 έχει κατά βάθος κατανομή που συχνά μπορεί να θεωρηθεί εκθετική, ενώ σε άλλες περιπτώσεις παρουσιάζει κατανομή Weibull, με μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης περί τα 2-3cm (Dahm et al., 2002). Αντίθετα, η κατά βάθος κατανομή του Pb-210 είναι συνήθως εκθετική, με το μέγιστο στην επιφάνεια (He and Walling, 1997). Το Be-7 βρίσκεται συνήθως στο επιφανειακό χώμα, καθώς έχει πολύ μικρό χρόνο ημιζωής και δεν προλαβαίνει να μεταναστεύσει σε μεγαλύτερα βάθη. Είναι σαφές από τα παραπάνω ότι για κάθε ισότοπο απαιτείται διαφορετική μέθοδος και βήμα δειγματοληψίας.

3.1 Η μέθοδος δειγματοληψίας με χρήση scraper plate

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τους Bryan Campbell, το Australian Nuclear Science και το Technology Organization (ANSTO), για τον προσδιορισμό της κατά βάθος κατανομής του Cs-137 σε επίπεδες και κεκλιμένες επιφάνειες και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως (Campbell et al., 1988, Loughran et al., 1992, Walling and Quine, 1993). Βασίζεται στη χρήση μίας συσκευής δειγματοληψίας (scraper plate) η οποία αποτελείται από δύο συνιστώσες: ένα μεταλλικό πλαίσιο το οποίο τοποθετείται στο έδαφος και ένα μεταλλικό παραλληλόγραμμο έλασμα, το οποίο μπορεί να αφαιρέσει χώμα σταθερού πάχους (Σχ. 3.1).



Σχήμα 3.1 Συνιστώσες του scraper plate

Το πλαίσιο πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικό για να μπορεί να διεισδύσει μέσα στο χώμα, έτσι ώστε η πάνω επιφάνειά του να είναι στο ίδιο επίπεδο με το έδαφος. Το μεταλλικό έλασμα χρησιμοποιείται για κόψει ή να συλλέξει χώμα μέσα στο πλαίσιο, μέχρις ενός επιλεγμένου βάθους. Το έλασμα έχει μία λοξή κοφτερή αιχμή στην μία από τις μικρές πλευρές του και είναι σχεδιασμένο για να προσαρμόζεται μέσα στο μεταλλικό πλαίσιο (πλάτος περίπου 18cm). Η μεγαλύτερη πλευρά του ελάσματος μπορεί να έχει οποιοδήποτε μήκος, για να είναι όμως

εύχρηστη η λειτουργία του, συνήθως κατασκευάζεται γύρω στα 40cm. Κατά μήκος της μεγαλύτερης πλευράς του ελάσματος υπάρχουν δύο σειρές από οπές, οι οποίες ισαπέχουν κατά 1cm και οι οποίες επιτρέπουν σε μία ράβδο να προσαρμόζεται πάνω τους με την βοήθεια κοχλία-περικοχλίου (Σχ. 3.2). Η ράβδος έχει συνολικό μήκος 42cm και διάμετρο 1.7cm, προεξέχει από την πλάκα και λειτουργεί ως οδηγός στο πλαίσιο. Η ράβδος μπορεί να επανατοποθετηθεί ανά 1cm, έτσι ώστε η αιχμηρή πλευρά να μπορεί να συλλέξει χώμα μέσα στο πλαίσιο σε διάφορα βάθη, με βήμα 1cm.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της κατασκευής η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα, είναι ότι μπορεί να αφαιρέσει μεγάλη ποσότητα χώματος από μία μεγάλη επιφάνεια (όση είναι η επιφάνεια του πλαισίου), ενώ αποτελείται από λίγα κομμάτια, συναρμολογείται εύκολα και το κόστος κατασκευής της είναι χαμηλό. Το πλαίσιο μπορεί να κατασκευαστεί από ελάσματα χάλυβα ή αλουμινίου, τα οποία θα είναι συγκολλημένα στις γωνίες και θα καλύπτουν μία σχετικά μεγάλη επιφάνεια δειγματοληψίας, επιτρέποντας τη συλλογή δείγματος από μικρό πάχος εδάφους (π.χ 1 cm) αλλά μεγάλου όγκου.



Σχήμα 3.2 Δειγματοληψία με scraper plate

Η μάζα του χώματος που συλλέγεται μέσα στο πλαίσιο εξαρτάται από την πυκνότητά του (bulk density) και από το πάχος του στρώματος που συλλέγεται. Γενικά, η πυκνότητα του χώματος αυξάνεται κατά βάθος. Το επιφανειακό στρώμα (π.χ. 0-2cm) συνήθως περιέχει υψηλό ποσοστό οργανικής ύλης (φυλλώματα, χόρτο) και γι' αυτό το λόγο έχει χαμηλότερη πυκνότητα. Για το λόγο αυτό, και προκειμένου να συλλέγεται επαρκής ποσότητα χώματος για ανάλυση, συχνά στην επιφάνεια η δειγματοληψία δεν γίνεται με βήμα 1cm αλλά 2cm. Η ποσότητα του χώματος η οποία αποκολλάται από το έδαφος με τη βοήθεια του ελάσματος, μεταφέρεται με τη βοήθεια σπάτουλας έξω από πλαίσιο και συσκευάζεται.

Το συνολικό βάθος της δειγματοληψίας εξαρτάται από το μήκος του scraper plate και την πιθανή παρουσία πετρών. Η απόφαση για το ελάχιστο βάθος της δειγματοληψίας μπορεί να ληφθεί, όταν η ανάλυση του πρώτου δείγματος έχει ολοκληρωθεί και είναι γνωστό το βάθος μέχρι το οποίο φτάνει το Cs-137. Όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Owens et al., 1996), σε αδιατάραχτα χώματα το Cs-137 σπάνια ανιχνεύεται σε βάθος που ξεπερνά τα 25cm, το οποίο αποτελεί ένα καλό βάθος για την πραγματοποίηση της δειγματοληψίας. Πάντως, επειδή η κατά βάθος κατανομή του Cs-137 είναι πολύ σημαντική για την πραγματοποίηση της μελέτης, αλλά δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή στη θέση δειγματοληψίας, είναι προτιμότερη η συλλογή δειγμάτων και από μεγαλύτερα βάθη, ακόμα και αν εν τέλει αποδειχθούν άχρηστα. Πάντως, εφόσον φυσικά είναι εφικτό, προτείνεται να γίνεται μία αρχική-δοκιμαστική δειγματοληψία, προκειμένου να προσδιορισθεί η κατά βάθος κατανομή του Cs-137, και κυρίως το μέγιστο βάθος στο οποίο ανιχνεύεται και στη συνέχεια να σχεδιάζεται η συλλογή του μεγάλου πλήθους δειγμάτων. Οι δυσκολίες που πιθανώς να προκύψουν κατά την δειγματοληψία μέσω του scraper plate είναι οι εξής:

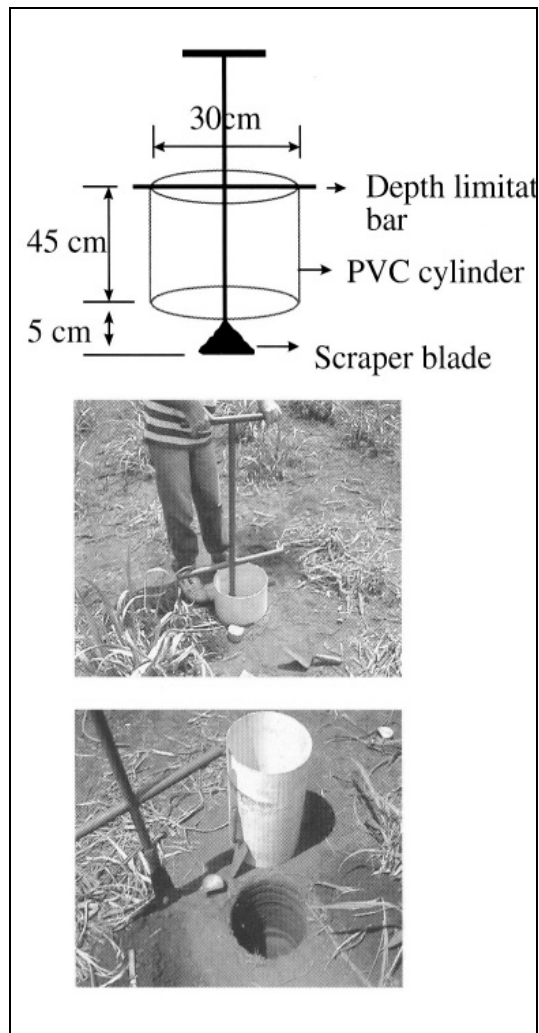
- Η βλάστηση και οι πέτρες οι οποίες καλύπτουν την επιφάνεια του εδάφους. Αυτά τα αντικείμενα συνήθως πρέπει να συλλεχθούν για πιθανή περαιτέρω ανάλυση. Εάν μία επιφάνεια είναι πολύ πετρώδης αντί να γίνει δειγματοληψία μέσω του scraper plate, μπορεί η δειγματοληψία να γίνει μέσω ενός σωλήνα (core tube) που θα διεισδύσει στο χώμα.
- Η επιφάνεια του εδάφους ίσως είναι κεκλιμένη ή έχει προεξοχές. Αυτές οι προεξοχές μπορούν να συλλεχθούν ξεχωριστά, πριν την δειγματοληψία μέσω του scraper plate και να ενσωματωθούν στο χώμα που θα συλλεχθεί από κάτω.
- Κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας, τα τοιχώματα του χώματος που δημιουργούνται καθώς το πλαίσιο χαμηλώνει μέσα στο έδαφος ίσως να είναι ασταθή και ένα τμήμα τους να καταρρεύσει. Αυτό το χώμα ή οι πέτρες που

θα καταρρεύσουν δεν πρέπει να συμπεριληφθούν στο δείγμα και θα πρέπει να υπάρχει ιδιαίτερη προσοχή σε πιθανό τέτοιο γεγονός. Η ψεκασμός των τοιχωμάτων με νερό ίσως μπορεί να βοηθήσει ώστε να είναι πιο στερεά.

- Κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας ίσως βρεθούν πέτρες. Εάν βρίσκονται ανάμεσα σε 2 στρώματα δείγματος, πρέπει να αποφασιστεί σε ποιο από τα 2 στρώματα βρίσκεται το μεγαλύτερο τμήμα τους και να συλλεχθούν μαζί με το χώμα αυτού του στρώματος. Η εκσκαφή του λάκκου πρέπει να γίνεται με την ακρίβεια αρχαιολογικής εκσκαφής. Τα εργαλεία που συνήθως χρειάζονται για την δειγματοληψία είναι βούρτσες (για να μπορούν να συλλεχθούν όλα τα εναπομείναντα χώματα), μαχαίρια (για την κοπή των ριζών), ηλεκτρικές σκούπες (για τον συλλογή χώματος από όλες τις επιφάνειες) και δοχεία νερού με ψεκασμό (για την σταθεροποίηση των τοιχωμάτων).

3.2 Μέθοδος δειγματοληψίας, μέσω ενός PVC κυλίνδρου

Υπάρχουν μερικές περιπτώσεις, όπως όταν το χώμα είναι πολύ αμμώδες (sandy), όπου η κατάρρευση των τοιχωμάτων είναι πολλή πιθανή και γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται μία εναλλακτική μέθοδος σε σχέση με την κλασική του scraper plate. Μια τέτοια μέθοδος απαιτεί την χρήση ενός κυλίνδρου από PVC. Αυτή η μέθοδος έχει τον διττό ρόλο του καθορισμού της επιφάνειας δειγματοληψίας, και την εξασφάλιση της σταθερότητας της στήλης χώματος που συλλέγεται. Η μέθοδος απαιτεί την τοποθέτηση ενός κυκλικού εργαλείου συλλογής του χώματος, μέσα σε έναν κύλινδρο PVC διαμέτρου 30cm. Το εργαλείο περιστρέφεται χειροκίνητα για να αποκολλήσει το χώμα (Σχ. 3.3). Η μέθοδος συνήθως χρησιμοποιείται για να συλλέγονται δείγματα με βήμα 5cm για συνολικό βάθος έως 40cm. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ο κύλινδρος PVC διεισδύει διαδοχικά όλο και πιο βαθιά στο χώμα, κάθε φορά που συλλέγεται ένα δείγμα. Αυτό προστατεύει τα τοιχώματα από κατάρρευση και εμποδίζει την ανάμιξη των δειγμάτων με χώμα από τα άλλα στρώματα.



Σχήμα 3.3 Δειγματοληψία μέσω του κυλίνδρου PVC

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν παρουσιάζει δυσκολίες κατά την δειγματοληψία και ότι εμποδίζει τα χώματα από διαφορετικά στρώματα να αναμιχθούν. Τα μειονεκτήματα είναι ότι συνήθως το βήμα είναι σχετικά μεγάλο με συνέπεια να μην επιτρέπει τον προσδιορισμό της κατά βάθος κατανομής με μεγάλη λεπτομέρεια. Εξυπακούεται ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο στην περίπτωση που είναι δυνατή η διείδυση του σωλήνα από PVC στο χώμα, είναι δηλαδή μέθοδος κατάλληλη για συγκεκριμένου τύπου χώματα.

3.3 Μέθοδος δειγματοληψίας μέσω κυλινδρικών μεταλλικών σωλήνων

Σε μερικές περιπτώσεις, όπως σε υγρά και συνεκτικά χώματα γίνεται να συλλεχθεί ένα δείγμα χώματος χρησιμοποιώντας έναν μεταλλικό κύλινδρο. Ο μεταλλικός κύλινδρος έχει στο κάτω μέρος του μία κυλινδρική αιχμή η οποία έχει διάμετρο μικρότερη από την εσωτερική διάμετρο του κυλίνδρου, ώστε να είναι πιο

εύκολο για τον κύλινδρο να διεισδύσει στο χώμα. Ο κύλινδρος φτάνει μέχρι το επιθυμητό βάθος και στην συνέχεια εξάγεται από το χώμα. Στο εσωτερικό του σωλήνα θα έχει μείνει το χώμα μέχρι του βάθους στο οποίο έχει διεισδύσει ο κύλινδρος.

Η διαδικασία ξεκινά επιλέγοντας έναν κύλινδρο κατάλληλου μήκους, ώστε να μπορεί να φτάσει στο επιθυμητό βάθος. Η απλούστερη μορφή είναι ένας χαλύβδινος σωλήνας με αιχμηρό το κάτω μέρος του. Δεν υπάρχει σταθερή εσωτερική διάμετρος για τον σωλήνα, αλλά συνήθως είναι 7-10cm. Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος, τόσο πιο εύκολο είναι να διεισδύσει στο χώμα. Ο σωλήνας πρέπει να έχει πάχος τουλάχιστον 5mm, εάν το χώμα είναι πετρώδες, ώστε να υπάρχει αντοχή σε κάμψη, λόγω της μεγαλύτερης καταπόνησής του. Στην περίπτωση των συνεκτικών χωμάτων, υπάρχει μία τάση να υπάρχουν δυσκολίες κατά την εξαγωγή του δείγματος από τον σωλήνα. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι αναγκαίο να διασφαλισθεί ότι η διάμετρος της αιχμηρής άκρης θα είναι ελάχιστα μικρότερη από την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα. Αυτό θα συμπιέζει διαμετρικά το χώμα που θα εισέρχεται στον σωλήνα και αυτό θα κάνει πιο εύκολη την εξαγωγή του. Η αιχμηρή άκρη μπορεί να γίνει μέσω κατεργασίας ενός κομματιού χάλυβα, που στη συνέχεια θα συγκολληθεί στην κάτω άκρη του σωλήνα (Walling and Quine, 1993).

Κατά τη δειγματοληψία, ο κύλινδρος διεισδύει στο έδαφος με χρήση κατάλληλου σφυριού, με διεύθυνση κατακόρυφο ή καθέτως προς την επιφάνεια, αν αυτή είναι κεκλιμένη. Συνήθως, σε αυτήν τη μέθοδο χρησιμοποιείται και μία προστατευτική χαλύβδινη πλάκα, η οποία είναι τοποθετημένη στο επάνω μέρος του κυλίνδρου. Εάν ο σωλήνας εισέλθει κάθετα σε ένα κεκλιμένο επίπεδο, τότε η επιφάνεια δειγματοληψίας θα είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση που ο σωλήνας διείσδυσε στην επιφάνεια κανονικά, και αυτό θα πρέπει να διορθώνεται με χρήση του συνημίτονου της γωνίας της του κεκλιμένου επιπέδου. Για τη συγκράτηση του χώματος μέσα στον κύλινδρο, ενδεχομένως να απαιτείται πρώτα η αφαίρεση του χώματος γύρω από τον κύλινδρο και η τοποθέτηση από κάτω μεταλλικού ελάσματος, το οποίο να συγκρατήσει το χώμα. Πρέπει πάντως να επισημανθεί ότι η εξαγωγή του χώματος από τον κύλινδρο, με τρόπο που να εξασφαλίζει τη μη ανάμιξη των διαφόρων στρωμάτων δεν είναι μία εύκολη διαδικασία.

Μετά την εξαγωγή του χώματος από τον κύλινδρο, το δείγμα χώματος θα πρέπει προσεκτικά να συσκευαστεί και μετά μπορεί να χωριστεί σε στρώματα ανάλογα το βάθος. Παρ' όλα αυτά είναι σύνηθες, κατά την διείσδυση του κυλίνδρου στο έδαφος, το χώμα μέσα στον κύλινδρο να υποστεί συμπίεση. Ο βαθμός της συμπίεσης μπορεί να υπολογιστεί συγκρίνοντας το μήκος του κυλίνδρου, με το

μήκος του δείγματος χώματος όταν αυτό εξαχθεί. Εάν υποθεθεί ότι η συμπίεση είναι ομοιόμορφη καθ' όλο το βάθος του χώματος, μπορεί να εκτιμηθεί η συμπίεση για κάθε στρώμα χώματος κατά βάθος. Προβλήματα παρουσιάζονται αν ο βαθμός συμπίεσης έχει μεγάλη ανομοιομορφία κατά βάθος του χώματος. Παρ' όλα αυτά, εάν το προφίλ του βάθους οριστεί με κατά μάζα βάθος (mass depth) (kg / m^2), αντί για γραμμικό βάθος (linear depth), οι μεταβολές στην πυκνότητα του χώματος (bulk density) που έχουν προέλθει από την συμπίεση, είναι περιορισμένες.

Όταν απαιτείται η δειγματοληψία μεγάλου αριθμού δειγμάτων ή όταν το χώμα είναι ξηρό, η διείδυση του κυλίνδρου στο έδαφος παρουσιάζει δυσκολία. Ερευνητές από το Πανεπιστήμιο του Έξετερ χρησιμοποιούν ένα μηχανοκίνητο κρουστικό σφυρί για να διείδυει ευκολότερα ο σωλήνας μέσα στο χώμα. Έτσι, το σφυρί προσαρμόζεται στην κορυφή του σωλήνα και η διείδυσή του στο χώμα γίνεται με μεγάλη ταχύτητα. Όταν πραγματοποιείται δειγματοληψία σε συνεκτικά χώματα δεν είναι αναγκαίο να σκαφτεί το χώμα μέχρι τη βάση του κυλίνδρου, ώστε να συγκρατηθεί από κάτω, το χώμα που έχει συλλεχτεί. Αυτό συμβαίνει διότι η υφή του χώματος κάνει το δείγμα συμπαγές και έτσι είναι δύσκολο να σπάσει. Σε τέτοιες περιπτώσεις όμως είναι συχνά αναγκαία η χρήση βαρούλκου για να εξαχθεί ο κύλινδρος από το χώμα.

3.4 Μέθοδος δειγματοληψίας μέσω μεταλλικών δακτυλίων

Εάν η μελέτη για την οποία γίνεται η δειγματοληψία βασίζεται στον προσδιορισμό της κατανομής του Be-7, τότε οι μέθοδοι που περιγράφονται προηγουμένως δεν είναι κατάλληλες. Το Be-7, λόγω του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού του, ανιχνεύεται μόνο στην επιφάνεια του εδάφους. Κατά συνέπεια, αν ληφθεί δείγμα μεγάλου πάχους (π.χ 10cm) η συγκέντρωση του Be-7 μπορεί να έχει αραιώσει σε τέτοιο βαθμό που να μην είναι ανιχνεύσιμο, ή να ανιχνεύεται με κακή στατιστική. Αντίστοιχα προβλήματα μπορεί να παρουσιάζονται και με το Pb-210 στα ακαλλιέργητα χώματα, αν και σε μικρότερο βαθμό. Μία μέθοδος για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα είναι να γίνουν δοκιμαστικές δειγματοληψίες με διαφορετικά κατά βάθος βήματα και στο τέλος να επιλεγεί η δειγματοληψία εκείνη με το μικρότερο βήμα⁶ που παρέχει αξιοποιήσιμα αποτελέσματα.

⁶ Μικρότερο βήμα κατά τη δειγματοληψία συνεπάγεται και μικρότερη ποσότητα συλλεγόμενου χώματος, κάτι που εισάγει μεγαλύτερες αβεβαιότητες κατά τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των ισotόπων που ενδιαφέρουν.

Για τέτοιου είδους δειγματοληψίες απαιτείται η κατασκευή μίας συσκευής δειγματοληψίας, με ύψος πολύ μικρότερο από αυτό του χαλύβδινου σωλήνα που χρησιμοποιείται για δειγματοληψίες Cs-137. Αυτή η κατασκευή αποτελείται από μία σειρά μεταλλικών δακτυλίων μικρού ύψους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται διαδοχικά, κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας. Ο πρώτος μεταλλικός δακτύλιος είναι ύψους 30mm και διαμέτρου 100mm και καρφώνεται στο έδαφος. Ο δακτύλιος διεισδύει μέχρι βάθους 20mm και έχει προσαρμοσμένο πάνω του ένα τρυπάνι χώματος το οποίο είναι σχεδιασμένο να εξάγει χώμα μέχρι βάθος 20mm. Στη συνέχεια ο πρώτος μεταλλικός δακτύλιος εξάγεται και εισάγεται ένας δεύτερος μεταλλικός δακτύλιος ύψους 60mm και ίδιας διαμέτρου, χρησιμοποιώντας την μέθοδο που περιγράφηκε και συλλέγει το χώμα από τα 20-50mm με την βοήθεια ενός διαφορετικού τρυπανιού που είναι σχεδιασμένο για αυτό το βάθος.

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι με τον τρόπο αυτό μπορούν να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις και των τριών ραδιοϊσοτόπων με την ίδια δειγματοληψία, εάν η αλληλουχία των δακτυλίων φτάσει έως τα περίπου 20cm, για να περιλαμβάνει σχεδόν και όλο το Cs-137. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι πρόκειται για χρονοβόρο διαδικασία σε σχέση με την απλή δειγματοληψία μέσω ενός σωλήνα. Επίσης, αντί για χειροκίνητο τρυπάνι μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανοκίνητα για μεγαλύτερη ταχύτητα και απόδοση. Τέλος, για σαθρά χώματα (π.χ. αμμώδη) είναι συχνά δύσκολη η συλλογή χώματος μέχρι συγκεκριμένου βάθους.

3.5 Μέθοδος δειγματοληψίας που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ.

Στον παρελθόν, έχουν χρησιμοποιηθεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ διάφορες μέθοδοι για τη συλλογή χώματος με στόχο τη γ-φασματοσκοπική του ανάλυση. Συνήθως αυτό που ενδιέφερε ήταν η συλλογή επιφανειακού χώματος, που είναι μία σχετικά απλή διαδικασία, αλλά όταν δεν χρησιμοποιείται ειδικός δειγματολήπτης απαιτεί εμπειρία και προσοχή. Η συλλογή χώματος από μεγαλύτερο βάθος, συχνά γινόταν χωρίς χρήση εξειδικευμένου δειγματολήπτη. Η τεχνική βασιζόταν σε προσεκτικό άνοιγμα οπής στο έδαφος μέχρι το επιθυμητό βάθος και αφαίρεση του χώματος με όσο γίνεται μεγαλύτερη προσοχή. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι δεν υπάρχει επαρκής έλεγχος του βάθους, ενώ επιπλέον τίποτα δεν εξασφαλίζει ότι λαμβάνεται χώμα ομοιόμορφα από όλα τα στρώματα χώματος. Έτσι, για παράδειγμα, κατά τη συλλογή χώματος 0-10cm με την παραπάνω τεχνική, τίποτα δεν εγγυάται ότι δεν συλλέγεται περισσότερο χώμα από την επιφάνεια του εδάφους

και λιγότερο από το βάθος 9-10cm. Τέλος, τίποτα δεν εγγυάται ότι τα τοιχώματα της οπής δεν θα καταρρεύσουν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Ως αποτέλεσμα, με την τεχνική αυτή εισάγεται μεγάλη αβεβαιότητα, λόγω της δειγματοληψίας του χώματος, με προφανή επίδραση στα αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποιείται.

Με στόχο τη βελτίωση της τεχνικής δειγματοληψίας χώματος από βάθος, στο ΕΠΤ-ΕΜΠ έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί και άλλες τεχνικές, όπως:

- Δειγματοληψία με χρήση ηλεκτρικού δράπανου, το οποίο χρησιμοποιείται για άνοιγμα κυλινδρικής οπής μέχρι του επιθυμητού βάθους. Το χώμα στη συνέχεια συλλέγεται με αναρρόφηση από ηλεκτρική σκούπα βιομηχανικού τύπου. Η τεχνική αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι παρέχει ικανοποιητικό έλεγχο του βάθους δειγματοληψίας, αλλά έχει ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα και συγκεκριμένα:
 - Υπάρχει δυσκολία δειγματοληψίας με μικρό βήμα, π.χ. 1cm.
 - Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κατάρρευσης των παλιών τοιχωμάτων της οπής, εξαιτίας της λειτουργίας του δραπάνου.
 - Δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι το χώμα που αναρροφάται προέρχεται αποκλειστικά από το βάθος στο οποίο έχει γίνει η κοπή.
 - Το δράπανο διαλύει τις πέτρες της οποίες συναντά, οι οποίες ανακατεύονται με το χώμα που συλλέγεται.
 - Απαιτείται παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από γεννήτρια, ενώ ο συνολικός εξοπλισμός είναι μεγάλου όγκου και βάρους, καθιστώντας δυσκίνητη την ομάδα δειγματοληψίας, ειδικά σε ανώμαλα εδάφη και αυξάνοντας σημαντικά το κόστος της δειγματοληψίας.
 - Δοκιμές που έχουν γίνει με χρήση χειροκίνητου τρυπανιού είχαν σχετική αποτελεσματικότητα μόνο σε αργιλώδη και υγρά εδάφη.
- Δειγματοληψία με χρήση ηλεκτρικού δραπάνου, το οποίο έχει ενσωματωμένο ειδικό δειγματολήπτη χώματος. Πρόκειται για βελτίωση της προηγούμενης τεχνικής, η οποία επιτρέπει τη συλλογή μέσα σε ειδικό κύλινδρο «καρότου» χώματος για εν συνεχεία επεξεργασία. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται το ηλεκτρικό δράπανο και ο ειδικός δειγματολήπτης χώματος. Η τεχνική αυτή αποτελεί βελτίωση της προηγούμενης τεχνικής, καθώς έτσι αποφεύγεται η κατάρρευση των τοιχωμάτων της οπής. Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα λεπτομερούς δειγματοληψίας του χώματος, με μικρό βήμα, υπό την προϋπόθεση ότι θα καταστεί δυνατή η αφαίρεση του χώματος μέσα από το δειγματολήπτη, με την ελάχιστη δυνατή διαταραχή, κάτι που όπως αποδείχθηκε είναι αρκετά δύσκολο. Κατά τα λοιπά, η μέθοδος παρουσιάζει όλα τα υπόλοιπα μειονεκτήματα που παρουσιάζει και η προηγούμενη

μέθοδος. Η τεχνική αυτή δειγματοληψίας αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια Διδακτορικής Διατριβής υπό εκπόνηση (Γ. Παπαδάκος, Δ.Δ. υπό εκπόνηση).



Σχήμα 3.4 Ηλεκτρικό δράπανο και λοιπός εξοπλισμός δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για δειγματοληψία χώματος από βάθος.

Στα πλαίσια της ΔΕ, για τη μελέτη του ρυθμού διάβρωσης του εδάφους έπρεπε να γίνουν δειγματοληψίες με στόχο:

- τον προσδιορισμό της κατά βάθος κατανομής του Cs-137,
- τον προσδιορισμό του μέγιστου βάθους μέχρι το οποίο έχει μεταναστεύσει το Cs-137,
- τη συλλογή όλου του χώματος, μέχρι το παραπάνω βάθος.

Στα πλαίσια της ΔΕ αποφασίσθηκε να αναπτυχθεί μία νέα τεχνική δειγματοληψίας, η οποία θα οδηγούσε στη συλλογή του χώματος, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι παραπάνω στόχοι, μειώνοντας όσο γίνεται την αβεβαιότητα λόγω δειγματοληψίας. Επιπλέον, η τεχνική αυτή θα έπρεπε να είναι όσο γίνεται απλούστερη και να απαιτεί όσο γίνεται μικρότερο ανθρώπινο δυναμικό για την εφαρμογή της, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος δειγματοληψίας. Δεδομένου μάλιστα ότι η δειγματοληψία θα έπρεπε να μπορεί να γίνει σε περιοχές με σχετικά μεγάλες κλίσεις, θα έπρεπε να ελαχιστοποιηθεί και το βάρος του αναγκαίου εξοπλισμού.

Η αρχική ιδέα για τη νέα μέθοδο που αναπτύχθηκε στηρίχθηκε σε χαλύβδινο σωλήνα τύπου Mannesmann χωρίς ραφή, κυκλικής διατομής, το ένα άκρο του οποίου είχε τροχισθεί. Ο σωλήνας καρφώνεται στο έδαφος με χρήση βαριοπούλας, μέχρι του επιθυμητού βάθους. Λόγω της συμπίεσης του χώματος, αυτό παραμένει σταθερό μέσα στο σωλήνα. Μετά την προσεκτική αφαίρεση του σωλήνα από το

έδαφος, το χώμα που βρίσκεται μέσα στο σωλήνα συλλέγεται και συσκευάζεται. Η απλή αυτή κατασκευή παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα, όπως:

- Δυσκολία διείσδυσης στο χώμα
- Δυσκολία αφαίρεσης του χώματος από το σωλήνα, ειδικά στην περίπτωση που ενδιέφερε η λήψη διαδοχικών δειγμάτων από διάφορα βάθη με μικρό βήμα (π.χ. 1-2 cm).

Στα πλαίσια των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε αντί για το σωλήνα και δειγματολήπτης κατασκευασμένος από τροχισμένη χαλύβδινη κοίλη δοκό τετραγωνικής διατομής 8x8cm, η οποία όμως δεν παρουσίασε κανένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα.

Με στόχο τη βελτίωση του παραπάνω δειγματολήπτη επελέγη τυποποιημένος σωλήνας κατά DIN με εξωτερική διάμετρο 82,5 mm και πάχος 3,2mm. Η διάμετρος επιλέχτηκε, όσο τον δυνατόν μικρότερη ώστε η διείσδυση να πραγματοποιηθεί πιο εύκολα και το πάχος έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να μπορεί να εισχωρήσει εύκολα στο χώμα, αλλά να είναι και ανθεκτικό στον λυγισμό. Επιπρόσθετα, στις κάτω άκρες της σωλήνας διαμορφώθηκε κωνικότητα ώστε να διευκολύνεται η διείσδυση μέσα στο χώμα. Η ουσιαστική βελτίωση του δειγματολήπτη ήταν η διαίρεση της σωλήνας σε δύο τμήματα με κατά μήκος τομή της σωλήνας, έτσι ώστε τελικά να δημιουργηθούν δύο μεταλλικά ελάσματα ημικυκλικής διατομής. Τα μεταλλικά αυτά ελάσματα κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας συγκρατούνταν μεταξύ τους με 3 μεταλλικούς δακτυλίους συγκράτησης, έτσι ώστε να σχηματίζουν έναν δειγματολήπτη κυκλικής διατομής (Σχ. 3.5).



Σχήμα 3.5 Ο δειγματολήπτης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ΔΕ

Για τη διείδυση του δειγματολήπτη στο έδαφος χρησιμοποιείται βαριοπούλα. Προκειμένου να μην καταπονείται η σωλήνα από τη χρήση της βαριοπούλας, κατασκευάστηκε χαλύβδινη φλάντζα με διάμετρο μεγαλύτερη από την εξωτερική διάμετρο της σωλήνα, η οποία φέρει κυκλική αυλάκωση πλάτους ~1cm, βάθους 0.6cm και διαμέτρου κατάλληλης ώστε να προσαρμόζεται πάνω στον δειγματολήπτη. Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η παραστατικά η διαδικασία εισόδου του δειγματολήπτη στο έδαφος.



Σχήμα 3.6 Διαδικασία εισόδου του δειγματολήπτη στο έδαφος

Όταν ο δειγματολήπτης φτάσει στο επιθυμητό βάθος, αφαιρείται το χώμα περιφερειακά, με χρήση σφυριού και καλεμιού, προκειμένου να διευκολύνεται η αφαίρεσή του από το έδαφος (Σχ. 3.7).



Σχήμα 3.7 Διαδικασία εξαγωγής του σωλήνα από το έδαφος

Όταν ο δειγματολήπτης έχει αποκαλυφθεί πλήρως, και πριν ανασυρθεί από το έδαφος, χρησιμοποιείται μία σπάτουλα, η οποία τοποθετείται κάτω από την είσοδο του δειγματολήπτη για να εξασφαλίσει ότι δεν θα καταρρεύσει το κατώτερο τμήμα του χώματος που έχει συλλεχθεί μέσα στο δειγματολήπτη. Μετά την αφαίρεση του δειγματολήπτη από το έδαφος, αφαιρούνται οι δακτύλιοι και ο δειγματολήπτης διαιρείται σε δύο μέρη, επιτρέποντας την αφαίρεση του χώματος με μεγάλη ευκολία. Συνήθως το χώμα παραμένει συμπαγές στο ένα από τα δύο τμήματα του δειγματολήπτη (Σχ. 3.8).



Σχήμα 3.8 Το προφίλ του χώματος

Φυσικά, σε ορισμένες περιπτώσεις, ανάλογα από τον τύπο του εδάφους, το προφίλ δεν είναι συμπαγές και διαμοιράζεται στα 2 τμήματα του δειγματολήπτη, όπως φαίνεται στο (Σχ. 3.9).



Σχήμα 3.9 Προφίλ χώματος, που δεν είναι συμπαγές

Ανάλογα με το είδος της δειγματοληψίας που πραγματοποιείται, το χώμα μπορεί να συλλέγεται συνολικά, στην περίπτωση που το ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός της ολικής συγκέντρωσης του Cs-137 σε όλο το προφίλ του χώματος. Στην περίπτωση που είναι επιθυμητός ο προσδιορισμός της κατά βάθος κατανομή του Cs-137, τότε ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Τοποθετείται μία μετρητική ταινία κατά μήκος του δειγματολήπτη και με την βοήθεια μίας σπάτουλας διαιρείται το χώμα σε τμήματα, ανάλογα με το επιθυμητό βήμα (Σχ. 3.10). Κάθε τμήμα χώματος συσκευάζεται ανεξάρτητα.



Σχήμα 3.10 Διάρθρωση του προφίλ του χώματος σε τμήματα, προκειμένου να προσδιορισθεί η κατά βάθος κατανομή του Cs-137

Η παραπάνω μέθοδος δειγματοληψίας, η οποία εισάγεται στα πλαίσια της ΔΕ παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, τα σημαντικότερα των οποίων είναι:

- Απλή και χαμηλού κόστους κατασκευή, η οποία δεν απαιτεί ιδιαίτερη μηχανουργική επεξεργασία.
- Διάταξη απλή στη χρήση, η οποία επιτρέπει τη δειγματοληψία σε σύντομο χρόνο, χωρίς να απαιτείται άλλος εξοπλισμός.
- Εξασφάλιση ότι γίνεται δειγματοληψία χώματος ομοιόμορφα από ολόκληρο το βάθος.
- Εύκολη συλλογή προφίλ χώματος με πολύ μικρό βήμα (έως και 1cm). Εξυπακούεται βέβαια ότι για τόσο μικρό βήμα, και λόγω της μικρής διατομής του δειγματολήπτη, η ποσότητα του χώματος που συλλέγεται ενδεχομένως να είναι ανεπαρκής για τις ανάγκες της έρευνας. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να συλλεχθεί και δεύτερο προφίλ χώματος με το ίδιο βήμα και να αναμιχθούν τα δείγματα που προέρχονται από το ίδιο βάθος.

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι ότι κατά τη διαδικασία εισαγωγής του δειγματολήπτη στο

έδαφος με τη χρήση βαριοπούλας, παρουσιάζονται φθορές στις άκρες των σωλήνων, κυρίως λόγω κάμψης (Σχ. 3.11). Τα άνω άκρα του δειγματολήπτη καταπονούνται εξαιτίας της δύναμης που δέχονται από την φλάντζα, ενώ τα κάτω άκρα λόγω της αντίστασης που προβάλλουν πέτρες που ενδεχομένως υπάρχουν στο έδαφος. Έτσι, μετά από μερικές δειγματοληψίες, και ανάλογα φυσικά και με τη σκληρότητα του εδάφους, παρουσιάζεται λυγισμός στα άνω και κάτω άκρα του δειγματολήπτη (Σχ. 3.12), κάτι που δυσκολεύει ή και καθιστά αδύνατη τη συνέχιση της δειγματοληψίας. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να διατίθενται περισσότεροι από ένας δειγματολήπτες. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι η όλη διαδικασία είναι αρκετά επίπονη, ιδιαίτερα κατά τη φάση της εισαγωγής του δειγματολήπτη στο έδαφος, αλλά και κατά τη φάση της εξαγωγής του.

Πάντως, παρόλα τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει αυτή η τεχνική δειγματοληψίας, είναι αρκετά απλή στην εφαρμογή της και επιτρέπει τη λήψη δειγμάτων χώματος με ικανοποιητική ακρίβεια. Για το λόγο αυτό η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε εξ ολοκλήρου στις δειγματοληψίες που έγιναν στα πλαίσια της ΔΕ.



Σχήμα 3.11 Φθορές του άνω άκρου του σωλήνα

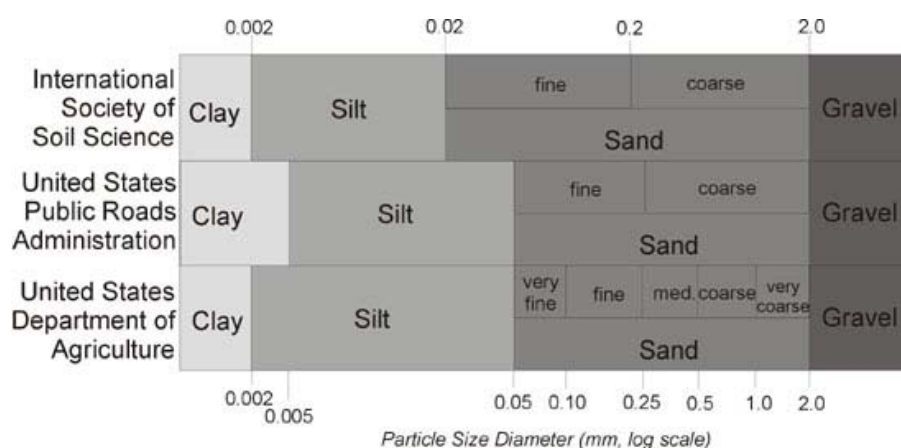


Σχήμα 3.12 Η φθορά του άνω άκρου (αριστερά) και του κάτω άκρου (δεξιά)

4. Επεξεργασία και ανάλυση των δειγμάτων χώματος

4.1 Γενικά στοιχεία για το χώμα

Το χώμα αποτελείται από ανόργανα σωματίδια και οργανικές ουσίες, ενώ ενδιάμεσα σε αυτά πιθανώς να υπάρχουν συσσωρευμένα αέρια και υδατοειδή διαλύματα. Το ανόργανο τμήμα του χώματος χαρακτηρίζεται από σωματίδια διαφόρων χαρακτηριστικών και μεγεθών. Αυτά τα σωματίδια κατατάσσονται ανάλογα με το μέγεθός τους σε επιμέρους κατηγορίες. Η κατάταξη αυτή έχει πραγματοποιηθεί από διάφορα ινστιτούτα στον κόσμο. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η κατάταξη που έχει γίνει από ορισμένα από αυτά.



Σχήμα 4.1 Κατάταξη των σωματιδίων του χώματος

Στα πλαίσια της ΔΕ υιοθετήθηκε η κατάταξη σύμφωνα με US DA (United States Department of Agriculture) (Davis et. Al., 1927), όπου το χώμα κατατάσσεται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Άργιλος (Clay) με σωματίδια μεγέθους μικρότερου από 0.002 mm
- Ιλύς (Silt) με σωματίδια μεγέθους από 0.002 – 0.05 mm (2 - 50μm)
- Άμμος (Sand) με σωματίδια μεγέθους από 0,05 – 2 mm (50μm - 2mm)
- Λίθοι (Gravels) με σωματίδια μεγέθους μεγαλύτερου από 2 mm

Μία άλλη συνιστώσα του χώματος είναι το οργανικό τμήμα, το οποίο αποτελείται από προϊόντα της αποσύνθεσης των φυτών και μικροοργανισμούς όπως: πρωτόζωα, βακτήρια και μύκητες. Το οργανικό τμήμα του χώματος είναι πολύ σημαντικός παράγοντας, καθώς επηρεάζει τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του χώματος αλλά και την συμπεριφορά και κινητική των ιχνοστοιχείων και ραδιοϊσοτόπων μέσα σε αυτό.

4.1.1 Ιδιότητες του χώματος

Τα διάφορα είδη χώματος που απαντώνται στο περιβάλλον μπορούν να περιγραφούν με βάση πλήθος ιδιοτήτων, ανάλογα με το είδος και τη σκοπιμότητα της 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 0.02 ως 2 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.

- 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 καθορίζεται από τον όγκο που έχουν τα διάκενα του εδάφους. Το ειδικό βάρος ορίζεται ως ο λόγος του βάρους ενός συγκεκριμένου όγκου του χώματος, 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.

4.2 Γενικά στοιχεία για τις μεθόδους επεξεργασίας δείγματος

4.2.1 Ξήρανση δείγματος χώματος

Η διαδικασία της ξήρανσης θεωρείται απαραίτητη, ως πρώτο βήμα επεξεργασίας δειγμάτων χώματος που πρόκειται να υποστούν γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων κάθε ισοτόπου γίνεται εν τέλει ανά μονάδα μάζας ξηρού υλικού, ώστε τα δείγματα που συλλέγονται από την ίδια θέση δειγματοληψίας, αλλά κατά διαφορετικά χρονικά διαστήματα, να μπορούν να θεωρηθούν συγκρίσιμα. Παράλληλα, μέσω της ξήρανσης δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες για την προετοιμασία δειγμάτων υψηλότερης συγκέντρωσης ραδιενέργειας ανά μονάδα μάζας υλικού, διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό τη φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλής ραδιενέργειας. Επίσης, η διαδικασία της ξήρανσης θεωρείται αναγκαία, λόγω συγκεκριμένων φαινομένων που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, και ειδικότερα αυτό της «αυταπορρόφησης», τα οποία επηρεάζονται από τη χημική σύσταση του δείγματος και από το ποσοστό υγρασίας που περιέχει. Πιο αναλυτικά, όσον αφορά τους συντελεστές διόρθωσης της «αυταπορρόφησης» που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, αυτοί είναι υπολογισμένοι για ένα ποσοστό υγρασίας που δεν υπερβαίνει το 5% και δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για δείγματα με πολύ υψηλότερες τιμές της υγρασίας.

Η ξήρανση δειγμάτων χώματος πραγματοποιείται κυρίως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μπορεί όμως να υλοποιηθεί και με θέρμανση σε φούρνο. Επομένως, οι θερμοκρασίες θέρμανσης κυμαίνονται από 25 ως 120°C, όπως αναλόγως ποικίλλει και η διάρκεια της θέρμανσης, από μία ώρα ως και μία ολόκληρη ημέρα. Ενδεικτικά:

- 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 το US-EPA⁷ προτείνεται η θέρμανση σε φούρνο στους 60- 110°C (EPA, 2004).
- Στο εγχειρίδιο HASL-300, το οποίο εκδίδεται από το US-DOE⁸ 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).
- Στο πρότυπο ASTM C999-05 αναφέρεται η θέρμανση σε φούρνο στους 110°C για τουλάχιστον 24 ώρες (ASTM, 2009).

Είναι όμως σημαντικό να γνωρίζουμε την πιθανή επίδραση της θέρμανσης σε φούρνο, στην συγκέντρωση της ραδιενέργειας στο δείγμα χώματος, καθώς για ορισμένα ισότοπα είναι δυνατόν να υπάρξει απώλεια λόγω εξάτμισης.

Στη ΔΕ (Παλαμάρα, 2010), πραγματοποιήθηκε μελέτη για την επίδραση των μεθόδων προετοιμασίας δείγματος χώματος στην συγκέντρωση της ραδιενέργειας (Bq/kg) και εξετάστηκαν οι επιπτώσεις λόγω της θέρμανσης του δείγματος σε φούρνο. Εκεί έγινε θέρμανση δειγμάτων σε φούρνο σε θερμοκρασίες 50, 100 και 150 °C. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο φούρνος Ka 120P του ΕΠΤ-ΕΜΠ. 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 3 ραδιοϊσότοπα (Cs-137, Pb-210, Be-7) που ενδιαφέρουν στις μελέτες διάβρωσης/ιζηματογένεσης. 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, σε θερμοκρασίες μέχρι 150 °C.

4.2.2 Κοσκίνισμα δείγματος χώματος

Η διαδικασία του κοσκινίσματος αποτελεί μία από τις πλέον συνηθισμένες μεθόδους επεξεργασίας του χώματος, ενώ η εφαρμογή της γίνεται για πολλούς και διαφορετικούς λόγους. Ο σημαντικότερος λόγος είναι ότι τα χονδρόκοκα κλάσματα, που πιθανότατα να αποτελούνται από πέτρες και άλλα ξένα υλικά,

⁷ United States Environmental Protection Agency

⁸ United States Department of Energy

αναμένεται να έχουν πολύ χαμηλότερη συγκέντρωση ραδιενέργειας⁹ από τα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα του χώματος, αλλοιώνοντας το αποτέλεσμα της μέτρησης του. Ακόμη, το χώμα κοσκινίζεται με σκοπό το διαχωρισμό του μεγαλύτερου χονδρόκοκκου κλάσματος, το οποίο ορίζεται από την εκάστοτε μελέτη ως το κλάσμα άνω του 0.5 mm, 1 mm ή 2 mm, ώστε αυτό να αφαιρεθεί από το δείγμα.

Επισημαίνεται ότι σε μελέτες που αφορούν στη ραδιενέργεια του χώματος, συχνά αναφέρεται και η διαδικασία της λειοτρίβησης. Η διαδικασία της λειοτρίβησης δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα ΔΕ, καθώς σύμφωνα με τον Bates (1993), για μελέτες διάβρωσης εδάφους προτείνεται μόνο κοσκίνισμα του χώματος, για να αφαιρεθούν τα χονδρόκοκκα κλάσματα, και όχι λειοτρίβηση.

Η διαδικασία του κοσκίνισματος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, γίνεται μέσω της συσκευής κοκκομετρικής ανάλυσης AS-200 Control, η οποία αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα:

- Συσκευή δόνησης με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά για όλες τις απαραίτητες ρυθμίσεις.
- Δύο μεταλλικές ράβδοι στήριξης των κόσκινων.
- Κόσκινα με διαφορετικά μεγέθη οπών, που κυμαίνονται από 45 μm έως μερικά 2 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 γίνεται ως εξής (Πέππας, 2008) :

- 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

⁹ Αυτό ισχύει κυρίως για τα ισότοπα που αποτίθενται στο έδαφος από τον αέρα, όπως τα Cs-137, Be-7 και δευτερευόντως για το Pb-210, το οποίο παράγεται και στο χώμα από τη διάσπαση του Ra-226.

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.

4.2.2.1 Η διαδικασία κοσκίνισματος που χρησιμοποιήθηκε για τα δείγματα της ΔΕ

Στην παρούσα ΔΕ ενδιέφερε ο διαχωρισμός του χώματος στα δύο κλάσματα¹⁰ άνω και κάτω των 2mm. Η διαδικασία του κοσκίνισματος των δειγμάτων ήταν η εξής:

- Για το κοσκίνισμα των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε μόνο το κόσκινο με μέγεθος οπών 2 mm (§ 4.3.1).
- Αρχικά, ζυγίστηκε η βάση στήριξης (341.46 g) και το κόσκινο των 2 mm (332.60 g).
- Στη συνέχεια, η βάση στήριξης τοποθετήθηκε στη μηχανή και ακριβώς από πάνω τοποθετήθηκε το κόσκινο των 2 mm. Μέσα στο κόσκινο αυτό εισήχθη το χώμα.
- Πάνω από το κόσκινο των 2 mm τοποθετήθηκαν και τα υπόλοιπα 6 κόσκινα, για λόγους σωστής ζυγοστάθμισης της μηχανής και αποφυγής των κραδασμών κατά τη λειτουργία. (Πέππας, 2008).
- Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκε κοσκίνισμα διάρκειας 20 λεπτών με πλάτος ταλάντωσης 2 mm.
- Το κλάσμα άνω των 2 mm αφαιρέθηκε και δεν χρησιμοποιήθηκε περαιτέρω
- Τα κλάσμα κάτω των 2 mm, χρησιμοποιήθηκε για περαιτέρω επεξεργασία και γ-φασματοσκοπική ανάλυση (§ 4.3 & 4.4)

¹⁰ Όπως περιγράφεται με περισσότερες λεπτομέρειες στην § 4.3.2

4.2.2.2 Επίδραση της κοκκομετρίας του χώματος στην συγκέντρωση των ισοτόπων Cs-137, Pb-210, Be-7

Λόγω της συμπεριφοράς ορισμένων ραδιενεργών ισοτόπων στο περιβάλλον, είναι δυνατό να παρατηρούνται διαφορές στη συγκέντρωσή τους στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του χώματος. Για παράδειγμα το ισότοπο, Be-7 και εν μέρει το ισότοπο Pb-210 παράγονται στον αέρα, ενώ το Cs-137 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 προσφέρονται έτσι ώστε τα παραπάνω ισότοπα να προσκολληθούν στην επιφάνειά τους, με αποτέλεσμα συχνά να εμφανίζουν αυξημένη ραδιενέργεια ($Bq \cdot kg^{-1}$) σε σχέση με τα πλέον χονδρόκοκκα κλάσματα. Στην ΔΕ της Παλαμάρα (2010) πραγματοποιήθηκε μελέτη της επίδρασης του χονδρόκοκκου κλάσματος στην συγκέντρωση ραδιενέργειας των Cs-137, Pb-210, Be-7. Έγινε μάλιστα διερεύνηση της εξάρτησης της συγκέντρωσης ραδιενέργειας από το μέγεθος των κόκκων ενός δείγματος μέσω πειράματος κοκκομετρικής ανάλυσης. Τα συμπεράσματα της μελέτης αυτής ήταν τα εξής:

- Για τα ραδιοϊσότοπα Cs-137, Pb-210 παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στη συγκέντρωση ραδιενέργειας των διαφόρων κλασμάτων.
- Η συγκέντρωση ραδιενέργειας των δύο πιο λεπτόκοκκων κλασμάτων είναι αισθητά αυξημένη για το Cs-137 και το Pb-210, κάτι αναμενόμενο, καθώς τα δύο αυτά ραδιοϊσότοπα επικάθονται στο έδαφος και δεδομένης της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας που έχουν τα λεπτόκοκκα σωματίδια, εύλογα παρουσιάζουν και αυξημένη συγκέντρωση ραδιενέργειας.
- 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. Όταν 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.

4.3 Μέθοδοι επεξεργασίας δείγματος χώματος που χρησιμοποιούνται στις μελέτες διάβρωσης του εδάφους

Ο βασικός στόχος της επεξεργασίας του δείγματος είναι η ξήρανση και το κοσκίνισμα, προκειμένου να αφαιρεθούν τα χονδρόκοκκα κλάσματα χώματος, καθώς η πιθανή ύπαρξη τους κατά την γ-φασματοσκοπική ανάλυση θα αλλοιώσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Στην συνέχεια αναλύονται δύο μέθοδοι επεξεργασίας δείγματος χώματος που χρησιμοποιούνται στις μελέτες διάβρωσης του εδάφους. Η πρώτη είναι μία μέθοδος επεξεργασίας που προτείνεται από τους Pennock et al. (2002). Η δεύτερη μέθοδος επεξεργασίας είναι αυτή που προτείνεται στα πλαίσια της ΔΕ.

4.3.1 Μέθοδος επεξεργασίας που προτείνεται από τους Pennock et al. (2002)

4.3.1.1 Ξήρανση και κοσκίνισμα δείγματος

Τα αρχικά στάδια του χειρισμού του δείγματος είναι παρόμοια στις περισσότερες διαδικασίες επεξεργασίας τους. Αρχικά γίνεται ξήρανση του δείγματος μέσω του αέρα. Σε αυτό το στάδιο το δείγμα κοσκινίζεται από ένα κόσκινο των 2mm για να διαχωριστεί το χώμα (κόκκοι <2 mm) από τα λίθινα στοιχεία (>2 mm). Το χώμα με διάμετρο κόκκων μικρότερη από 2mm, χρησιμοποιείται για την γ-φασματοσκοπική ανάλυση, ενώ τα λίθινα στοιχεία δεν χρησιμοποιούνται. Και τα δύο τμήματα που διαχωρίζονται από το κόσκινο και ζυγίζονται. Η μάζα των κόκκων χώματος με διάμετρο μικρότερη από 2mm (η οποία έχει ξηρανθεί προηγουμένως) κωδικοποιείται ως εξής: $M_{<2,AD}$ (Mass <2mm, Air-Drying) ενώ η μάζα των κόκκων χώματος με διάμετρο μεγαλύτερη από 2mm (η οποία έχει ξηρανθεί προηγουμένως) κωδικοποιείται ως εξής $M_{>2,AD}$ (Mass >2mm, Air-Drying) και μετρούνται σε g. Στην περίπτωση που η $M_{>2,AD}$ αποτελεί μεγαλύτερο από το 5%, της συνολικής μάζας του δείγματος, οι Anderson και Ingram (1993) πρότειναν ότι το τμήμα με διάμετρο κόκκων μεγαλύτερη από 2mm, θα χρησιμοποιηθεί περαιτέρω (βλέπε § 4.3.1.3). Στην περίπτωση που η $M_{>2,AD}$ αποτελεί μικρότερο από το 5% της συνολικής μάζας, τότε δεν χρησιμοποιείται περαιτέρω στην μέθοδο επεξεργασίας.

Η μεταχείριση των οργανικών υλικών σε αυτό το στάδιο εξαρτάται από την μέγεθός τους. Τα οργανικά υλικά με διάμετρο μικρότερη των 2 mm θα διαπεράσουν το κόσκινο και θα αναλυθούν μαζί με τα μη οργανικά υλικά, κάτι που δεν αποτελεί

αλλοίωση της ποιότητας του δείγματος (McGee et al., 1995). Τα οργανικά υλικά με διάμετρο μεγαλύτερη από 2 mm είναι κυρίως ρίζες και απορρίμματα, τα οποία αφού δεν μπορούν να διαπεράσουν το κόσκινο, δεν θα χρησιμοποιηθούν περαιτέρω.

4.3.1.2 Διαχωρισμός δειγμάτων σε υπο-δείγματα και προσδιορισμός της πυκνότητας του χώματος (bulk density)

Στην συνέχεια πραγματοποιείται μία επεξεργασία των δειγμάτων με σκοπό να προσδιοριστεί η πυκνότητα του χώματος (bulk density) για κάθε δείγμα. Αυτό το μέγεθος είναι πολύ κρίσιμο καθώς χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την μετρούμενη, από την φασματοσκοπική ανάλυση, συγκέντρωση ραδιενέργειας από Bq/kg σε Bq / m^2 .

Η διαδικασία προσδιορισμού της πυκνότητας του χώματος για κάθε δείγμα είναι η εξής:

- Αρχικά δημιουργείται ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα χώματος. Το αντιπροσωπευτικό δείγμα δημιουργείται, γιατί σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαία η ανάλυση ενός υλικού που διατίθεται σε μεγάλη ποσότητα. 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. Μία μέθοδος δημιουργίας αντιπροσωπευτικού δείγματος είναι γνωστή ως “*Coning and quartering*” (Tan, 1996), η οποία και χρησιμοποιείται στην μέθοδο επεξεργασίας δείγματος των Pennock et al. (2002). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το χώμα 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 συμπίπτει 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.
- Ζυγίζεται ένα υπο-δείγμα και τοποθετείται σε ένα αλουμινένιο δοχείο. Η μάζα του υπο-δείγματος κωδικοποιείται ως MSS_{AD} (Air-Dry Mass of Sub-Sample) και μετρείται σε g. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ξήρανση του υπο-δείγματος σε φούρνο στους $105^{\circ} C$, ώσπου η μάζα του να καταστεί σταθερή. Σύμφωνα με τον

Top (1993) η μάζα του δείγματος θεωρείται σταθερή, όταν μέσα σε μία περίοδο 6 ωρών μέσα στον φούρνο, η μάζα του έχει μειωθεί λιγότερο από το 0,1%. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η ξήρανση διαρκεί 2-3 ημέρες (Top, 1993). Η μάζα του υπο-δείγματος που θα προκύψει μετά την ξήρανση, κωδικοποιείται ως MSS_{OD} (Oven-Dry Mass of Sub-Sample) και μετρείται σε g.

- Στην συνέχεια υπολογίζεται τη σταθμισμένη υγρασία (h) του χόματος ως εξής:

$$h = \frac{MSS_{AD} - MSS_{OD}}{MSS_{OD}} \quad (1)$$

- Υπολογίζεται η τιμή της μάζας του δείγματος, που έχει ξηρανθεί στον φούρνο ($M_{<2_{OD}}$) (Mass <2mm, Oven-Drying) από τον εξής τύπο:

$$M_{<2_{OD}} = M_{<2_{AD}} - (M_{<2_{AD}} \cdot h) \quad (2)$$

- Τελικά, η πυκνότητα του χόματος με διάμετρο κόκκων μικρότερη από 2mm ($D_{b<2}$) υπολογίζεται ως εξής:

$$D_{b<2} (g / cm^3) = \frac{M_{<2_{OD}} (g)}{V (cm^3)} \quad (3)$$

όπου V ο όγκος του δείγματος χόματος.

4.3.1.3 Επεξεργασία δειγμάτων για χόματα με σημαντικό περιεχόμενο λίθων

Όταν το ποσοστό των λίθων (διάμετρος μεγαλύτερη από 2mm) στο δείγμα του χόματος είναι μικρότερο από 5%, τότε οι λίθοι δεν χρησιμοποιούνται καθόλου στην μελέτη. Όταν όμως το ποσοστό τους είναι μεγαλύτερο από 5%, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην μελέτη. Οι Auerswald και Schimmack (2000) προσδιόρισαν πιθανά σφάλματα που μπορεί να προκύψουν στις μελέτες διάβρωσης, εξαιτίας της παρουσίας σημαντικών ποσοτήτων λίθων στο δείγμα που συλλέγεται. Ένα από τα πιθανά σφάλματα είναι ο ελλιπής διαχωρισμός των κόκκων χόματος από τους λίθους. Αυτό μπορεί να συμβεί εξαιτίας της προσκόλλησης κόκκων χόματος, που περιέχουν το υπό μελέτη ραδιοϊσότοπο, στους λίθους. Επομένως, η συγκέντρωση του ραδιοϊσότοπου που έχει προσκολληθεί στο πετρώδες τμήμα του δείγματος, δεν θα ληφθεί υπόψη στην μελέτη. Εάν το χόμα που έχει προσκολληθεί αποτελείται από

λεπτόκοκκα κλάσματα χώματος, τα οποία έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση ραδιοϊσοτόπων από το χώμα ως ολότητα, τότε το σφάλμα γίνεται ακόμα μεγαλύτερο. Σφάλμα επίσης μπορεί να προκύψει, επειδή το δείγμα που έχει συλλεχθεί δεν περιέχει αντιπροσωπευτικό ποσοστό λίθων στο χώμα.

Στην έρευνά τους οι Auerswald και Schimmack (2000) διαπίστωσαν ότι έως και το 10% του Cs-137 που υπάρχει στο χώμα που ανέλυσαν, παραμένει στους λίθους, μετά το κοσκίνισμα. Έτσι, εφάρμοσαν μία τεχνική πλύσης του λίθινου τμήματος του χώματος, με την οποία αφαιρέθηκε το 90% του Cs-137, παρ' όλα αυτά όμως παρέμεινε το 10% στην επιφάνεια των λίθων. Τελικώς, οι Auerswald και Schimmack κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατόν να εισάγεται μεγάλη αβεβαιότητα κατά τον υπολογισμό της διάβρωσης του εδάφους, εάν αγνοηθούν η ανομοιογένεια του χώματος και η προσκόλληση χώματος που περιέχει Cs-137 στους λίθους. Οπότε στην περίπτωση που η μάζα των λίθων $M_{>2,AD}$ (διάμετρος μεγαλύτερη από 2mm), αποτελεί ποσοστό μεγαλύτερο από το 5%, της συνολικής μάζας του δείγματος, το δείγμα προτείνεται ότι πρέπει να ξεπλένεται, και το χώμα το οποίο αφαιρείται από τους λίθους προστίθεται στο δείγμα που θα αναλυθεί. Με αυτόν τον τρόπο, το ποσοστό Cs-137 που θα παραμείνει στους λίθους, θα είναι πολύ μικρό και θα μειώσει τις αβεβαιότητες στην εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης του χώματος.

4.3.2 Μέθοδος επεξεργασίας δείγματος χώματος που ακολουθείται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ στις μελέτες διάβρωσης του εδάφους

4.3.2.1 Ξήρανση και κοσκίνισμα του δείγματος

Στον ΕΠΤ-ΕΜΠ ακολουθείται μία συγκεκριμένη διαδικασία, για την προετοιμασία δειγμάτων χώματος, πριν την γ-φασματοσκοπική ανάλυση (Μ. Anagnostakis, 1996). Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε και στην παρούσα ΔΕ, με κάποιες διαφοροποιήσεις, οι οποίες εισάγονται στα πλαίσια της ΔΕ προκειμένου να εκπληρωθούν οι ιδιαίτερες απαιτήσεις οι οποίες προκύπτουν σε μία μελέτη του ρυθμού διάβρωσης. Για παράδειγμα, η συνήθης διαδικασία που ακολουθείται για την προετοιμασία ενός δείγματος το οποίο πρόκειται να υποστεί γ-φασματοσκοπική ανάλυση δεν προβλέπει ομογενοποίηση, κοσκίνισμα, σπάσιμο των χονδρόκοκκων κλασμάτων, ή άλλη επεξεργασία του χώματος.

Στην παρούσα ΔΕ, για τις ανάγκες της μελέτης διάβρωσης χώματος θα πραγματοποιηθεί κοσκίνισμα του χώματος, όπως προτείνεται από τους Pennock et al. (2002). Στην (§ 4.2.2.1), έχουν αναφερθεί οι λόγοι για τους οποίους πρέπει να απομακρύνονται τα χονδρόκοκκα κλάσματα του χώματος, μέσω του κοσκίνισματος. Άλλη μία διαφοροποίηση της μεθόδου προετοιμασίας δείγματος ήταν ότι σε ορισμένες περιπτώσεις που το χώμα ήταν υγροσκοπικό και μετά από αεροξήρανση 7 ημερών η υγρασία ήταν άνω του 5%, χρησιμοποιήθηκε η ξήρανση στον φούρνο του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Εκτός, από το κοσκίνισμα και την ξήρανση σε φούρνο που δεν περιλαμβάνεται στην τυπική διαδικασία προετοιμασίας του δείγματος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, η υπόλοιπη διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα ΔΕ, είναι ίδια και περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω:

- Το δείγμα απλώνεται πάνω σε φύλλα από χαρτόνι (Σχ. 4.2) και αφήνεται να ξηραθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μέχρις ότου η υγρασία του χώματος να μη ξεπερνά το επιθυμητό όριο, που έχει οριστεί στο 5%. Η διάρκεια της αεροξήρανσης αυτής κυμαίνεται, ανάλογα με τη μάζα του δείγματος και το αρχικό ποσοστό υγρασίας που περιέχει, από 2 μέρες έως και πάνω από μία βδομάδα. Μετά από τις 2 πρώτες μέρες μετρείται η υγρασία ανά μία μέρα, για να διαπιστωθεί αν έχει πέσει κάτω από 5%.
- Η υγρασία υπολογίζεται με τη βοήθεια ζυγού προσδιορισμού υγρασίας. Για τη συγκεκριμένη μέτρηση καθορισμένη ποσότητα 10.0 g από το δείγμα τοποθετείται σε ανοιχτό δοχείο. Η συσκευή διαθέτει λάμπα η οποία θερμαίνει το υλικό προκαλώντας την εξάτμιση του νερού. Τυπικά, η ισχύς ρυθμίζεται στα 5 Watt για χρονικό διάστημα των 5 λεπτών. Μετά το πέρας του προκαθορισμένου διαστήματος υπολογίζεται η ελάττωση του βάρους, ώστε να καθοριστεί το ποσοστό υγρασίας (h) του δείγματος που εξατμίζεται. Εάν η υγρασία μετά από μία βδομάδα δεν μειωθεί κάτω από 5%, τότε το δείγμα τοποθετείται στον φούρνο Ka 120P του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ο χρόνος και η θερμοκρασία εξαρτώνται από το είδος του χώματος (υγροσκοπικότητα) ή τα διάφορα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται (§ 4.2.1). Στην παρούσα ΔΕ, στα δείγματα που παρουσίασαν αυτή την συμπεριφορά, έγινε ξήρανση στον φούρνο για 4 ώρες στους 60^oC. Ύστερα, κατά την μέτρηση της υγρασίας τους, αφού είχε επέλθει εύλογο χρονικό διάστημα για να αποκτήσουν την θερμοκρασία περιβάλλοντος, όλα ήταν κάτω από το όριο του 5%.
- Όταν ολοκληρωθεί η ξήρανση αφαιρούνται με το χέρι μεγάλες πέτρες, ρίζες και άλλα ξένα υλικά, ενώ πραγματοποιείται με το χέρι σπάσιμο των χοντρών συσσωματωμάτων. Λόγω της αναγκαιότητας για αφαίρεση των υλικών που έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 2mm (Pennock et al., 2002), το δείγμα κοσκινίζεται (§

4.2.2.1) Το τμήμα του δείγματος με διάμετρο μεγαλύτερη από 2mm, συσκευάζεται και φυλάσσεται, καθώς δεν θα χρησιμοποιηθεί περαιτέρω.



Σχήμα 4.2 Άπλωμα δειγμάτων σε χαρτόνι, για ξήρανση στον αέρα.

- Στην συνέχεια ζυγίζεται το τμήμα του δείγματος με διάμετρο κόκκων, μικρότερη από 2mm ($M_{<2,AD}$) και συσκευάζεται.
- Η πυκνότητα του χώματος (bulk density) του δείγματος υπολογίζεται ως εξής:

$$D_{b<2}(g/cm^3) = M_{<2,AD}(g) / V(cm^3) \quad (4)$$

όπου V είναι ο όγκος του δείγματος.

4.3.2.2 Συσκευασία δείγματος

Μετά την προετοιμασία του δείγματος ακολουθεί η συσκευασία (για τα δείγματα με διάμετρο κόκκων μικρότερη από 2mm) σε πλαστικό δοχείο καθορισμένων διαστάσεων. Κατά την πλήρωση δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη κενών στο δοχείο. Το δοχείο ζυγίζεται και υπολογίζεται η συνολική μάζα και η μάζα ξηρού χώματος. 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. Ανάλογα το μέγεθος του δείγματος που διατίθεται, το δείγμα συσκευάζεται σε μία από τις τρεις τυποποιημένες κυλινδρικές γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων όγκου:

- γεωμετρία «2», πρόκειται για κυλινδρική γεωμετρία διαμέτρου 72mm, ύψους 69mm και όγκου 282cm^3
- γεωμετρία «5», πρόκειται για κυλινδρική γεωμετρία διαμέτρου 72mm, ύψους 22mm και όγκου 97.2cm^3
- γεωμετρία «8», πρόκειται για κυλινδρική γεωμετρία διαμέτρου 72mm, ύψους 10mm και όγκου 40cm^3 .

Στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, έγινε δειγματοληψία σε 2 περιοχές. Η μία ήταν η περιοχή, στην οποία θα γινόταν η μελέτη για την διάβρωση του χώματος και η άλλη ήταν η θέση αναφοράς. Στην πρώτη περιοχή τα δείγματα είχαν όγκο 910 cm^3 , καθώς είχαν εύρος βάθους 20cm. Στην θέση αναφοράς, τα δείγματα είχαν όγκο 91 cm^3 , καθώς το κάθε δείγμα είχε εύρος βάθους 2cm^{11} .

Για την θέση αναφοράς δεν επαρκούσε ο όγκος για πλήρωση δοχείων γεωμετρίας «5» και για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τις αναλύσεις η γεωμετρία «8». Επειδή η γεωμετρία «8» βασίζεται σε κυλινδρικό δοχείο ύψους 69mm, για το σφράγισμα των δοχείων γεωμετρίας «8» τοποθετείται κυκλικός δίσκος διαμέτρου 72 mm και πάχους 1 mm από PET μέσα στο δοχείο και σε επαφή με το χώμα (σε ύψος 10mm μέσα στο δοχείο) και σταθεροποιείται με σιλικόνη. Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, το δείγμα είναι έτοιμο για της πραγματοποίηση γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.

Στην παρούσα ΔΕ ενδιέφερε μόνον η ανάλυση του Cs-137, αλλά για λόγους πληρότητας αναφέρεται η διαδικασία συσκευασίας του δείγματος, όταν πρόκειται να γίνει και ανάλυση για προσδιορισμό του Ra-226. Αφού ολοκληρωθούν όλα τα παραπάνω βήματα προετοιμασίας και συσκευασίας του δείγματος, βάφεται με λεπτό στρώμα ρητίνης ο πλαστικός δίσκος που καλύπτει το χώμα και τα εσωτερικά τοιχώματα του δοχείου. Το δοχείο κλείνει με το καπάκι του και βάφεται και εξωτερικά. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη ώστε να αποφευχθεί η διαφυγή των αερίων ισοτόπων του ραδονίου (Rn-222 και Rn-220), έτσι ώστε μετά την πάροδο εύλογου χρόνου (~20 ημερών) να αποκατασταθεί ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του Ra-226 και των θυγατρικών του. Στη συνέχεια το δείγμα μπορεί να αναλυθεί στις

¹¹ Το δείγμα βάθους 20cm, χωριζόταν σε 10 κομμάτια εύρους βάθους 2cm

διατάξεις γ-φασματοσκοπίας και για τον προσδιορισμό του Ra-226 να χρησιμοποιηθούν οι ακτίνες-γ που εκπέμπουν τα θυγατρικά του.

4.4 γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων χώματος

4.4.1 Γενικά στοιχεία για την γ-φασματοσκοπική ανάλυση

Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση αποτελεί μία μη καταστροφική μέθοδο προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων. Λειτουργεί με βάση την επεξεργασία του φάσματος των φωτονίων που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων. Μέσω αυτής της διαδικασίας, επιτυγχάνεται ο ποιοτικός προσδιορισμός του είδους των πυρήνων που διασπώνται, δηλαδή του αντίστοιχου ραδιοϊσοτόπου. Ταυτόχρονα, πραγματοποιείται 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 η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη ραδιομετρική τεχνική, καθώς πλεονεκτεί συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους ανάλυσης (π.χ. α-φασματοσκοπία), λόγω του ότι η πλειοψηφία των ραδιενεργών ισοτόπων που συνήθως ερευνούνται εκπέμπουν ακτίνες-γ και επειδή επιπλέον αποτελεί μία μη καταστροφική μέθοδο και η διαδικασία προετοιμασίας του δείγματος είναι ελάχιστη.

4.4.2 Οι φασματοσκοπικοί αναλυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση

Για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χώματος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιούνται οι ανιχνευτές γερμανίου: *HPGe*, *LEGe* και *XtRa*. Τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε ανιχνευτή είναι τα εξής:

- 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».

- Ανιχνευτής LEGe. Ο ανιχνευτής LEGe (Low Energy Germanium) είναι κατασκευασμένος από γερμάνιο υψηλής καθαρότητας και είναι σχεδιασμένος κυρίως για αναλύσεις φωτονίων χαμηλών ενεργειών ($E < 200 \text{ keV}$), επιτυγχάνοντας εύρος ημίσειας ύψους 0.53 keV στα 122 keV . Ο κρύσταλλος 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 $0 - 2000 \text{ keV}$, όπως τυπικά γίνεται στους ανιχνευτές γερμανίου. Σε αυτή την περίπτωση, ο ανιχνευτής έχει την κωδική ονομασία «ανιχνευτής 3».
 - Σε *υψηλή ενίσχυση* το φάσμα περιορίζεται στην περιοχή $0 - 200 \text{ keV}$. Σε αυτή την περίπτωση, ο ανιχνευτής ονομάζεται «ανιχνευτής 6». Στην παρούσα ΔΕ ο ανιχνευτής LEGe χρησιμοποιήθηκε μόνο σε ρύθμιση $0 - 2000 \text{ keV}$ (ανιχνευτής 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 μέγεθός του 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 ανθρακονήματα. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε θωράκιση της εταιρείας Canberra, κατασκευασμένη από ατσάλι και μολύβι μεγάλης ηλικίας. Σύμφωνα με την κωδικοποίηση του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ο ανιχνευτής ονομάζεται «ανιχνευτής 4».

4.4.3 Η διαδικασία της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης που ακολουθήθηκε στα δείγματα που αναλύθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ

Στην παρούσα ΔΕ, έγινε ανάλυση των δειγμάτων, μόνο για Cs-137, αλλά για λόγους πληρότητας θα αναφερθούν στοιχεία σχετικά με την ανάλυση δειγμάτων και για τον προσδιορισμό Pb-210, Ra-226. Το Cs-137 πραγματοποιεί $-\beta$ διάσπαση, παράγοντας Ba-137m, το οποίο είναι μετασταθές με χρόνο ημιζωής 2.552 min . Στην πράξη θεωρείται ότι το Ba-137m διασπάται ακαριαία, παράγοντας φωτόνια ενέργειας 661.62 keV με ποσοστό εκπομπής 85.1% . Τα φωτόνια αυτά χρησιμοποιούνται τελικά για την ανίχνευση του ^{137}Cs . Για τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας του Cs-137 στα δείγματα από την περιοχή όπου μελετήθηκε ως προς τη διάβρωση,

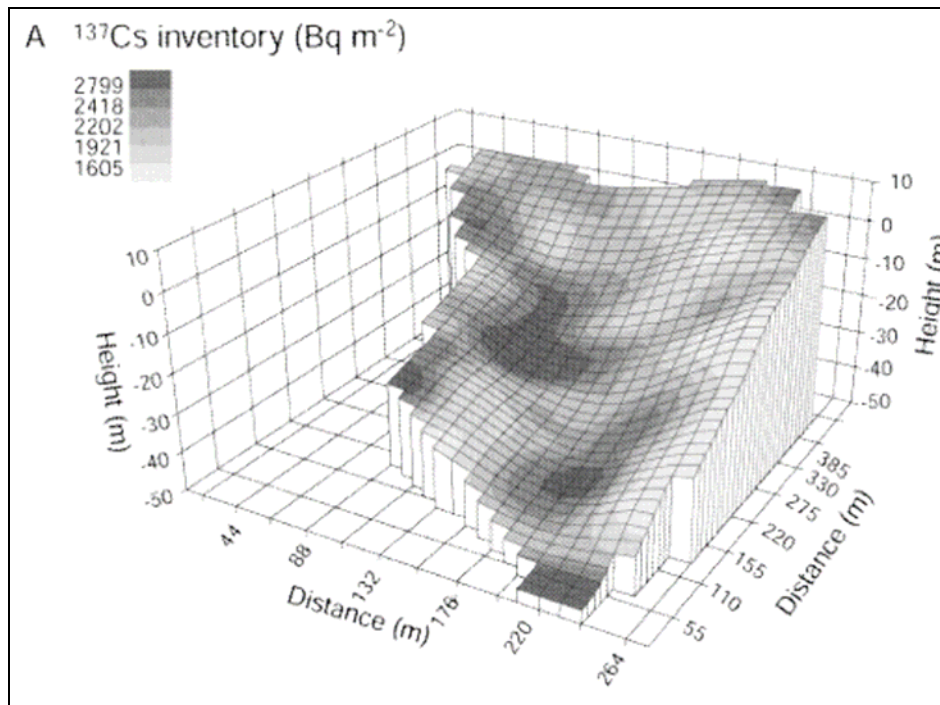
χρησιμοποιήθηκαν οι 2 ανιχνευτές γερμανίου, ο ανιχνευτής HPGe και ο LEGe. Η ανάλυση του κάθε δείγματος διαρκούσε 24 ώρες. Για τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας του Cs-137 στα δείγματα που συλλέχθηκαν στη θέση αναφοράς, χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής XiRa, ο οποίος έχει πολύ υψηλότερη απόδοση. Αυτό ήταν απαραίτητο καθώς η μάζα των δειγμάτων ήταν πολύ μικρή (γεωμετρία 8). Σε αυτόν τον ανιχνευτή, η ανάλυση διαρκούσε 3 μέρες για το κάθε δείγμα, προκειμένου να μειωθεί κατά το δυνατόν η τυχαία αβεβαιότητα λόγω της μέτρησης.

5. Μοντέλα υπολογισμού της διάβρωσης και της ιζηματογένεσης του εδάφους

Στο Κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης του εδάφους και του ρυθμού ιζηματογένεσης, με βάση δειγματοληψίες εδάφους και μετρήσεις συγκέντρωσης φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων σε αυτό. Έμφαση δίνεται στα μοντέλα που στηρίζονται στη μελέτη της συγκέντρωσης του Cs-137, τα οποία είναι και τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα. Πρέπει πάντως να επισημανθεί στο σημείο αυτό ότι τα περισσότερα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί στηριζόμενα σε σενάρια συνεχούς απόθεσης Cs-137, εξαιτίας των πυρηνικών δοκιμών. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν σε περιοχές όπου υπάρχει απόθεση Cs-137 εξαιτίας πυρηνικών ατυχημάτων – κυρίως αυτό του Chernobyl – με αρκετές όμως, αβεβαιότητες.

5.1 Η ανάγκη ύπαρξης μοντέλων εκτίμησης του ρυθμού αναδιανομής χόματος σε μία περιοχή, βάσει των μετρούμενων συγκεντρώσεων του Cs-137 στο χόμα

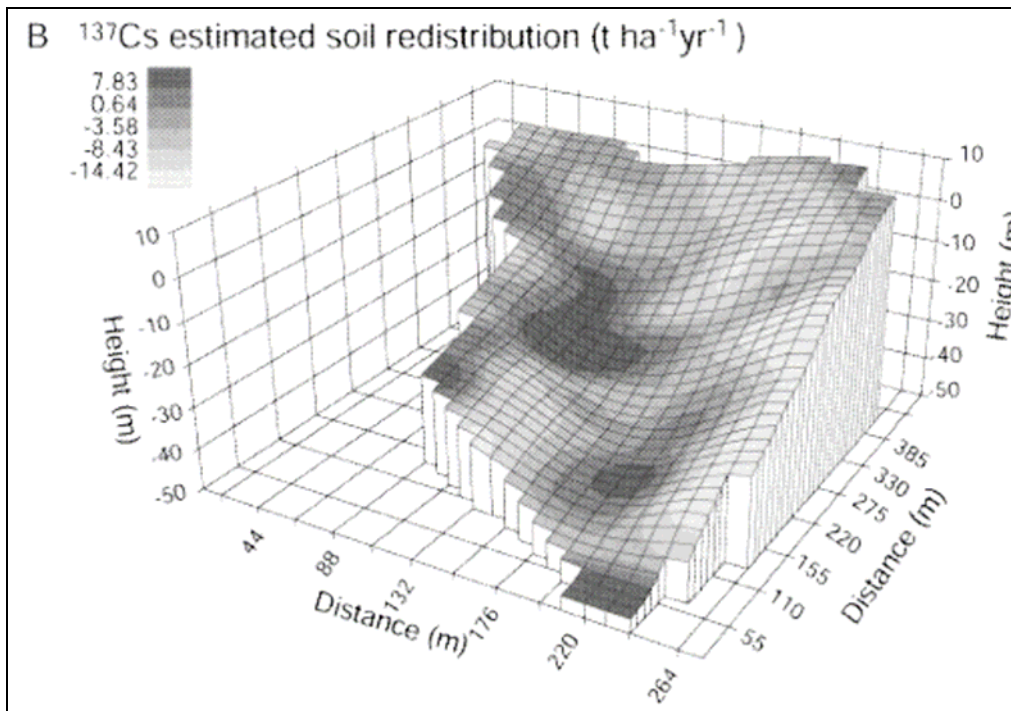
Οι πληροφορίες για το μέγεθος και την χωρική κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137, που προέρχονται από την γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων από μία περιοχή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν μία ένδειξη του ρυθμού διάβρωσης (erosion) ή ιζηματογένεσης (deposition) του εδάφους. Όμως, αυτά τα αποτελέσματα είναι ποιοτικά και όχι ποσοτικά. Για παράδειγμα, ένας χάρτης της συγκέντρωσης του Cs-137, σε μία περιοχή όπως αυτή του σχήματος 5.1 (He and Walling, 1997) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την συγκέντρωση του Cs-137 στη θέση αναφοράς, για την ποιοτική εκτίμηση της διάβρωσης και της ιζηματογένεσης του χόματος. Τα τμήματα της περιοχής με συγκέντρωση Cs-137 μικρότερη από τη συγκέντρωση στη θέση αναφοράς, ίσως έχουν υποστεί διάβρωση, ενώ τα τμήματα με συγκέντρωση μεγαλύτερη από την θέση αναφοράς, ίσως έχουν υποστεί ιζηματογένεση.



Σχήμα 5.1 Χάρτης συγκέντρωσης του Cs-137 σε μία περιοχή με μεγάλες υψομετρικές διαφορές

Στις περισσότερες έρευνες αυτή η ποιοτική εκτίμηση δεν είναι επαρκής και είναι αναγκαία η ύπαρξη μίας ποσοτικής εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης και ιζηματογένεσης του εδάφους. Για αυτόν τον λόγο απαιτούνται κατάλληλα μοντέλα. Στην περίπτωση της μελέτης της διάβρωσης του εδάφους, ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετατρέψει τις μετρούμενες συγκεντρώσεις του Cs-137, οι οποίες προκύπτουν από τις δειγματοληψίες, σε ρυθμό διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του εδάφους. Οι ρυθμοί αναδιανομής¹² του εδάφους οι οποίοι υπολογίζονται από τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη χάραξη του χάρτη που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1, μέσω ενός μοντέλου υπολογισμού του ρυθμού αναδιανομής, παρατίθενται στο χάρτη του σχήματος 5.2. Στο σχήμα αυτό, θετικές τιμές του μεγέθους αναδιανομής χώματος (soil redistribution) ισοδυναμούν με απόθεση χώματος (ιζηματογένεση) ενώ αρνητικές τιμές ισοδυναμούν με διάβρωση του εδάφους. Όπως είναι κατανοητό, η δυνατότητα ποσοτικοποίησης της ποιοτικής πληροφορίας που παρέχει ο χάρτης του σχήματος 5.1 μέσω της χρήσης μοντέλων έχει πολύ μεγάλη σημασία, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του ρυθμού απώλειας του εδάφους και του κινδύνου ερημοποίησης της περιοχής.

¹² Συνήθως ο ρυθμός αναδιανομής του χώματος του εδάφους εκφράζεται σε τόνους χώματος ανά εκτάριο γης και ανά έτος ($t \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$)



Σχήμα 5.2 Χάρτης ρυθμού αναδιανομής (διάβρωσης και ιζηματογένεσης) του χώματος της περιοχής

5.2 Τα μοντέλα προσδιορισμού του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης του εδάφους

Στις περισσότερες έρευνες για την μελέτη της διάβρωσης του εδάφους συνηθίζεται, για την εύρεση του ρυθμού διάβρωσης, να συγκρίνεται η μετρούμενη συγκέντρωση του Cs-137 στην προς μελέτη περιοχή (Bq/m^2), με την τιμή της συγκέντρωσης του Cs-137 σε μία θέση αναφοράς, που θεωρητικά δεν υπάρχει διάβρωση (erosion), ούτε ιζηματογένεση (deposition). Η συγκέντρωση του Cs-137 στην θέση αναφοράς προσδιορίζει την επιφανειακή απόθεση (fallout) του Cs-137 στην περιοχή, αφού ληφθεί φυσικά υπόψη και η ραδιενεργός απομείωση (decay) από την ημερομηνία επίπτωσης έως τη στιγμή της δειγματοληψίας. Ως αποτέλεσμα της χρήσης ενός μοντέλου εκτίμησης της αναδιανομής του χώματος, εκτιμάται ο ρυθμός διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του εδάφους Y ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$) που αντιστοιχεί σε ένα μέσο ρυθμό αναδιανομής για την περίοδο, από τα μέσα της δεκαετίας του 1950 ή του 1960, έως τη στιγμή της δειγματοληψίας, ανάλογα με το μοντέλο υπολογισμού που χρησιμοποιείται.

Ένα άλλο είδος μελετών που γίνονται, αν και όχι τόσο συχνά, είναι ο προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης ή ιζηματογένεσης για μία συγκεκριμένη και

σχετικά περιορισμένη χρονική περίοδο. Αυτό γίνεται συλλέγοντας δείγματα από τα ίδια σημεία σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές και εκτιμώντας την αύξηση ή την μείωση της συγκέντρωσης του Cs-137 μεταξύ των δύο χρονικών στιγμών στα σημεία δειγματοληψίας, λαμβάνοντας υπόψη την ραδιενεργό απομείωση του Cs-137. Είναι σημαντικό η περίοδος μεταξύ των δύο δειγματοληψιών να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε η διαφορά της συγκέντρωσης του Cs-137 να είναι ανιχνεύσιμη, λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες δειγματοληψίας, ανάλυσης κλπ. Για παράδειγμα, αν η συνολική αβεβαιότητα είναι της τάξης του $\pm 10\%$, προκειμένου να είναι δυνατή η διαπίστωση αναδιανομής του χόματος σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% , θα πρέπει η αύξηση ή η μείωση της συγκέντρωσης του Cs-137 στο έδαφος να είναι υψηλότερη από 10% (Walling and He, 1999). Ένα μειονέκτημα των μελετών αυτού του τύπου είναι ότι δεν είναι δυνατή η άμεση εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης ή ιζηματογένεσης, αλλά αυτή είναι δυνατή μετά και τη δεύτερη δειγματοληψία. Για αυτό το λόγο οι περισσότερες μελέτες βασίζονται στη σύγκριση της συγκέντρωσης του Cs-137 στην περιοχή μελέτης και στη θέσης αναφοράς.

Μια βασική κατηγοριοποίηση των μοντέλων προσδιορισμού αναδιανομής χόματος είναι:

- μελέτες που αφορούν εδάφη διαταραγμένα, δηλαδή καλλιεργημένα και
- μελέτες που αφορούν εδάφη αδιατάραχτα.

Ο λόγος της κατηγοριοποίησης αυτής είναι η διαφοροποίηση που υπάρχει στην κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 στις δύο παραπάνω περιπτώσεις εδαφών. Στην περίπτωση του καλλιεργημένου εδάφους, είναι πολύ πιθανό το Cs-137 να είναι καλά αναμεμιγμένο μέσα στο χόμα και επομένως είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο στρώμα καλλιέργειας (το στρώμα του εδάφους στο οποίο επηρεάζεται το χόμα από τις αγροτικές εργασίες). Αντίθετα, στα αδιατάρακτα εδάφη, το Cs-137 συγκεντρώνεται κυρίως κοντά στην επιφάνεια, καθώς η προέλευσή του είναι η επιφανειακή απόθεση. Αυτό έχει ως συνέπεια, η απώλεια ενός συγκεκριμένου ποσοστού του Cs-137, να αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο ρυθμό διάβρωσης στα καλλιεργημένα εδάφη από ό,τι στα αδιατάρακτα.

5.2.1 Μοντέλα προσδιορισμού αναδιανομής χόματος για καλλιεργημένα εδάφη

Σύμφωνα με τους Walling and Quine (1990) υπάρχουν δύο κατηγορίες μοντέλων προσδιορισμού της αναδιανομής χόματος για καλλιεργημένα εδάφη: τα εμπειρικά και τα θεωρητικά μοντέλα. Στα εμπειρικά μοντέλα, χρησιμοποιώντας αποτελέσματα μακροχρόνιων ερευνών για τη αναδιανομή του χόματος, δημιουργείται εμπειρικά σχέση μεταξύ: του ρυθμού αναδιανομής και της

ποσοστιαίας μείωσης ή αύξησης της συγκέντρωσης του Cs-137 ως προς την τιμή που προσδιορίζεται στην θέση αναφοράς. Στα θεωρητικά μοντέλα ο υπολογισμός γίνεται μέσω αναλυτικών σχέσεων, προσδιορίζοντας του κύριους παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό διάβρωσης, οι οποίοι είναι διαφορετικοί για κάθε μοντέλο.

5.2.1.1 Εμπειρικά μοντέλα

Αυτά τα μοντέλα υπολογισμού, είναι απλές εμπειρικές συναρτήσεις που συσχετίζουν τη μέση ετήσια απώλεια χόματος Y ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$) με την ποσοστιαία μείωση της συγκέντρωσης του Cs-137, και είναι της μορφής:

$$Y = a \cdot X^\beta \quad (1)$$

Η ποσοστιαία μείωση της συγκέντρωσης του Cs-137 (X) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$X = \left[\frac{A_{ref} - A}{A_{ref}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

A_{ref} : η μετρούμενη συγκέντρωση του Cs-137 στην θέση αναφοράς (Bq / m^2).

A : η μετρούμενη συγκέντρωση του Cs-137 στο σημείο δειγματοληψίας (Bq / m^2).

a, β : σταθερές που ορίζονται ανάλογα το εμπειρικό μοντέλο.

Δυστυχώς, στις περισσότερες μελέτες δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικά μοντέλα. Αυτό συμβαίνει διότι σε οποιαδήποτε εμπειρική εκτίμηση, η συνάρτηση που χρησιμοποιείται αντανάκλα σε ένα πλήθος τοπικών παραγόντων, όπως τις ιδιότητες του χόματος, την μέθοδο καλλιέργειας του χόματος και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Οπότε, η χρήση της εμπειρικής σχέσης σε ένα περιβάλλον διαφορετικό από αυτό για το οποίο αναπτύχθηκε, είναι πιθανότατα ακατάλληλη. Επίσης, κάθε εμπειρική σχέση μετατροπής αφορά μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Για παράδειγμα, οι Ritcie and McHenry (1975) ανέπτυξαν μία σχέση της μορφής:

$$Y = 0.88 \cdot X^{1,18} \quad (3)$$

από δεδομένα διάβρωσης που συλλέχθηκαν τις δεκαετίες του 1960 και του 1970, και η οποία προφανώς αφορά στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Για το λόγο αυτό δεν θα πρέπει να εφαρμόζεται σε μεταγενέστερες χρονικά μελέτες, όπως αποπειράθηκαν οι Menzel et al. (1987).

Επιπλέον, η χρήση των εμπειρικών μοντέλων είναι κατάλληλη μόνο για τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης και όχι του ρυθμού ιζηματογένεσης. Αυτό συμβαίνει διότι τα εμπειρικά μοντέλα προκύπτουν από δεδομένα που αφορούν την διάβρωση του χώματος σε μία συγκεκριμένη περιοχή, τα οποία δεν μπορούν να δώσουν πληροφορίες για το ρυθμό ιζηματογένεσης. Συνεπώς, τα εμπειρικά μοντέλα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση του ρυθμού ιζηματογένεσης, δηλαδή όταν η συγκέντρωση του Cs-137 σε μία περιοχή είναι μεγαλύτερη από την συγκέντρωση στην θέση αναφοράς.

Ένα άλλου τύπου εμπειρικό μοντέλο έχει αναπτυχθεί είναι από τους Elliot et al. (1990). Για την ανάπτυξη του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα διάβρωσης στην περιοχή South Wales της Αυστραλίας και η εμπειρική σχέση που αναπτύχθηκε είναι η εξής:

$$Y = 80.6 \cdot (1.07^X) \quad (4)$$

Η σχέση αυτή έχει αναπτυχθεί με χρήση 60 πειραματικών σημείων και έχει πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης ($r=0.85$). Στα 60 αυτά σημεία της περιοχής South Wales, έχει υπολογιστεί ο ρυθμός διάβρωσης του χώματος (Y) μέσω της γενικής εξίσωσης απώλειας χώματος (USLE) (§ 2.1.1). Η εμπειρική σχέση (4) έχει δημιουργηθεί μέσω της συσχέτισης της τιμής Y με την αντίστοιχη τιμή X για τα 60 αυτά σημεία. Αυτή η σχέση αφορά συγκεκριμένη χρονική περίοδο και συγκεκριμένη περιοχή, οπότε είναι ακατάλληλη να χρησιμοποιηθεί ως έχει για μετρήσεις συγκέντρωσης του Cs-137 που έγιναν σε μεταγενέστερη χρονική περίοδο ή σε διαφορετική περιοχή. Επιπρόσθετα, οι Loughran and Cambell (1995), επέστησαν την προσοχή για τις αβεβαιότητες που μπορεί να προκύψουν κατά την χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου μοντέλου και ανέφεραν ότι η απώλεια χώματος που υπολογίζεται από το μοντέλο ίσως να υποεκτιμάται έως και 50% στις περιπτώσεις που η μείωση της συγκέντρωσης του Cs-137 είναι χαμηλότερη του 50%.

5.2.1.2 Θεωρητικά μοντέλα

Τα θεωρητικά μοντέλα χρησιμοποιούνται προκειμένου να αποφεύγεται η χρησιμοποίηση εμπειρικών δεδομένων που μοιραία συνοδεύονται από υψηλές αβεβαιότητες, αλλά και προκειμένου να υιοθετηθεί μία θεωρητική σχέση μεταξύ της μείωσης ή της αύξησης της συγκέντρωσης του Cs-137 και της ανακατανομής του χώματος στο έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση προφανώς υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταξύ τους σχέση. Επίσης, μέσω των θεωρητικών μοντέλων θα είναι δυνατό να υπολογιστεί ο ρυθμός της ιζηματογένεσης σε ένα σημείο, αν η συγκέντρωση του Cs-137 σε μία περιοχή είναι μεγαλύτερη από την συγκέντρωση στην θέση αναφοράς, κάτι που είναι αδύνατο με την χρήση των εμπειρικών μοντέλων.

Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες θεωρητικών μοντέλων και μία από τις διαφοροποιήσεις που παρουσιάζουν μεταξύ τους είναι ως προς την πολυπλοκότητα. Υπάρχουν τα απλά αναλογικά μοντέλα, που υποθέτουν ότι το ποσοστό του βάθους καλλιέργειας που αφαιρείται λόγω της διάβρωσης είναι αναλογικό με την μείωση του Cs-137 σε σχέση με την θέση αναφοράς. Και φτάνουμε ως τα πιο πολύπλοκα μοντέλα μάζας-ισορροπίας (mass-balance models) που προσπαθούν να μοντελοποιήσουν την αλλαγή στο περιεχόμενο του χώματος σε Cs-137 σε σχέση με το χρόνο, τις απώλειες του Cs-137 από το προφίλ χώματος εξαιτίας της διάβρωσης, την ενσωμάτωση χώματος που δεν περιέχει Cs-137 από σημεία κάτω του βάθους καλλιέργειας (βάθος μέχρι το οποίο το χόμα επηρεάζεται από την καλλιέργεια του εδάφους). Τα πιο σημαντικά θεωρητικά μοντέλα παρατίθενται στην συνέχεια.

5.2.1.2.1 Το αναλογικό μοντέλο

Το αναλογικό μοντέλο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο για τις μελέτες της διάβρωσης του εδάφους και βασίζεται στην υπόθεση ότι το Cs-137 που προήλθε λόγω της επιφανειακής απόθεσης από την ατμόσφαιρα είναι πλήρως αναμιγμένο στο βάθος καλλιέργειας (plough layer) (Mitchell et. Al., 1980, de Jong et al., 1983, Gredericks and Perrens, 1988, Walling and Quine, 1990) και ότι το βάθος του χώματος που διαφεύγει ως αποτέλεσμα της διάβρωσης, είναι ανάλογο με την μείωση του Cs-137 ως προς τη θέση αναφοράς. Η βασική εξίσωση του αναλογικού μοντέλου είναι η εξής:

$$Y = \frac{B \cdot d \cdot X}{10 \cdot T \cdot P} \quad (5)$$

- d(m): είναι το βάθος του στρώματος καλλιέργειας, δηλαδή το βάθος της περιοχής μέχρι το οποίο το χώμα επηρεάζεται λόγω της καλλιέργειας. Μπορεί να υπολογιστεί από δεδομένα που θα δώσει ο γαιοκτήμονας της περιοχής, σχετικά με το βάθος που φτάνει το αζότι και η φρέζα. Αν δεν μπορούν να βρεθούν τέτοια δεδομένα, θα πρέπει να υπολογιστούν προσεγγιστικά.
- B (kg/m^3): είναι η πυκνότητα του χώματος (bulk density). Προσδιορίζεται διαιρώντας την μάζα του χώματος που έχει ξηρανθεί, προς τον όγκο του δείγματος (Κεφ. 4).
- T (yr): ο χρόνος που μεσολάβησε από την πρώτη επιφανειακή απόθεση Cs-137 στο χώμα, έως την χρονική στιγμή της δειγματοληψίας. Προσδιορίζεται πολύ εύκολα αν ληφθεί υπόψη ότι οι πρώτες πυρηνικές δοκιμές έλαβαν χώρα στα μέσα της δεκαετίας του 1950.
- P: είναι ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους κόκκων και ορίζεται ως ο λόγος της συγκέντρωσης του Cs-137 στο μεταφερόμενο ίζημα, προς αυτού στο χώμα (§ 5.4.1). Επειδή η σύνθεση των κόκκων του μεταφερόμενου χώματος είναι πλούσια σε λεπτόκοκκα κλάσματα σε σχέση με το χώμα που παραμένει στο έδαφος, ο συντελεστής P είναι γενικά μεγαλύτερος από 1. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγαλύτερης συγκέντρωσης του Cs-137 σε λεπτόκοκκα κλάσματα χώματος. Εάν δεν συνυπολογιστεί ο συντελεστής στην εξίσωση, τότε είναι πολύ πιθανό να υπερεκτιμηθεί ο ρυθμός διάβρωσης του χώματος

Αν και το αναλογικό μοντέλο έχει σχεδιαστεί για την εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης του εδάφους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση του ρυθμού ιζηματογένεσης. Το αναλογικό μοντέλο υποθέτει ότι η συγκέντρωση του Cs-137 στο ίζημα που έχει διαβρωθεί, παραμένει σταθερή με το πέρασμα του χρόνου, οπότε και η συγκέντρωση του Cs-137 στο ίζημα που έχει αποτεθεί σε μία περιοχή ιζηματογένεσης, υποτίθεται ότι είναι σταθερή. Έτσι, όταν η συγκέντρωση του Cs-137 σε ένα σημείο δειγματοληψίας (A), είναι μεγαλύτερη από την συγκέντρωση στη θέσης αναφοράς, τότε ο ρυθμός ιζηματογένεσης του χώματος $Y'(t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1})$ μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω σχέση:

$$Y' = \frac{B \cdot d \cdot X'}{10 \cdot T \cdot P'} \quad (6)$$

P' : είναι ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους κόκκων (§ 5.4.1).

X' : είναι η ποσοστιαία αύξηση της συγκέντρωσης του Cs-137 που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$X' = \left[\frac{A - A_{ref}}{A_{ref}} \right] \times 100\% \quad (7)$$

Στις εξισώσεις υπολογισμού του ρυθμού ιζηματογένεσης υπάρχει μία διαφοροποίηση. Είναι ο λόγος της συγκέντρωσης του Cs-137 στο χώμα, προς της συγκέντρωσης στο μεταφερόμενο ίζημα (δηλαδή ο αριθμητής παίρνει την θέση του παρανομαστή σε σχέση με τον συντελεστή P). Οπότε, επειδή η σύνθεση των κόκκων του μεταφερόμενου χώματος είναι πλούσια σε λεπτόκοκκα κλάσματα, σε σχέση με το χώμα που παραμένει στο έδαφος, ο συντελεστής P' είναι γενικά μικρότερος από 1. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγαλύτερης συγκέντρωσης του Cs-137 σε λεπτόκοκκα κλάσματα χώματος (§ 5.4.1).

Το αναλογικό μοντέλο, στην βασική του μορφή απαιτεί πληροφορίες μόνο για το βάθος καλλιέργειας και την πυκνότητα του χώματος και σε συνδυασμό με τις μετρούμενες συγκεντρώσεις Cs- 137 είναι πολύ εύκολο να εφαρμοστεί. Αν και οι υποθέσεις του μοντέλου, δείχνουν φαινομενικά λογικές, είναι μία υπεραπλούστευση των διεργασιών που σχετίζονται με την συμπεριφορά και την συσσώρευση του Cs-137 στο χώμα. Η συσσώρευση του Cs-137 στο χώμα, λαμβάνει χώρα για πολλά χρόνια και υπάρχει πιθανότητα ένα ποσοστό που αποτίθεται από την ατμόσφαιρα να παραμείνει στο επιφανειακό χώμα, πριν από την ενσωμάτωσή του στο βάθος καλλιέργειας. Εάν ένα ποσοστό του πρόσφατα αποτιθέμενου Cs-137 απομακρυνθεί πριν την ενσωμάτωσή του στο βάθος καλλιέργειας, λόγω της διάβρωσης, ο ρυθμός διάβρωσης του χώματος που θα εκτιμηθεί από το μοντέλο θα είναι υπερεκτιμημένος, αφού το μοντέλο υποθέτει ότι όλο το Cs-137 είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο βάθος καλλιέργειας. Επίσης, το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την προοδευτική ενσωμάτωση χώματος, που βρίσκεται κάτω από το βάθος καλλιέργειας, στο στρώμα καλλιέργειας¹³ και αυτό οδηγεί σε υποεκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης.

5.2.1.2.2 Το μοντέλο σταθμικής προσέγγισης

Οι Brown et al. (1981b) και οι Lawrance et al. (1988) ανέπτυξαν το μοντέλο της σταθμικής προσέγγισης. Στο αναλογικό μοντέλο, για κάθε σημείο υπολογίζεται μία τιμή του ρυθμού διάβρωσης ενώ σε αυτήν την προσέγγιση εκτιμάται ο ρυθμός διάβρωσης για μία ολόκληρη περιοχή, αντί για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του

¹³ Όσο το έδαφος διαβρώνεται, επειδή το βάθος του εδάφους που ανασκάπτεται με τα σκαπτικά εργαλεία παραμένει σχετικά σταθερό, το χώμα καλλιέργειας εμπλουτίζεται από κατώτερα στρώματα του εδάφους.

Cs-137 σε μεμονωμένα σημεία. Η μέση συγκέντρωση του Cs-137 για μία διαβρωμένη περιοχή (A), συγκρίνεται με την συγκέντρωση του Cs-137 στην θέση αναφοράς (A_{ref}) και η εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης του χώματος υπολογίζεται ως εξής:

$$Y = 10 \cdot \frac{A_{ref} - A}{C_A T} \quad (8)$$

C_A (Bq/kg): είναι η μέση συγκέντρωση του Cs-137 στο επιφανειακό χώμα της διαβρωμένης περιοχής.

Στο μοντέλο σταθμικής προσέγγισης χρησιμοποιείται η συγκέντρωση του Cs-137 στο επιφανειακό χώμα, αντί για την ολική συγκέντρωση του Cs-137 στο χώμα, όπως συμβαίνει στο απλό αναλογικό μοντέλο. Αυτό γίνεται διότι η ολική συγκέντρωση είναι πιθανό να υπερεκτιμήσει τον ρυθμό διάβρωσης, επειδή η συγκέντρωση του Cs-137 στο στρώμα καλλιέργειας θα μειώνεται με το πέρασμα το χρόνου, εξαιτίας της ενσωμάτωσης σε αυτό χώματος που προέρχεται κάτω από το στρώμα καλλιέργειας και το οποίο δεν περιέχει Cs-137.

5.2.1.2.3 Μοντέλα ισορροπίας μάζας

Τα μοντέλα ισορροπίας μάζας χρησιμοποιούνται ευρέως και προσπαθούν να καλύψουν ορισμένα μειονεκτήματα των αναλογικών μοντέλων, μοντελοποιώντας τις αλλαγές στη περιεκτικότητα του χώματος σε Cs-137 με το πέρασμα του χρόνου, εξαιτίας της επιφανειακής απόθεσης Cs-137. Επίσης, λαμβάνουν υπόψη τη μείωση του Cs-137 λόγω της διάβρωσης του χώματος και την ενσωμάτωση στο στρώμα καλλιέργειας χώματος που δεν περιέχει Cs-137 και το οποίο βρίσκεται βαθύτερα από το στρώμα καλλιέργειας (Kachanoski and de Jong, 1984, Fredericks and Perrens, 1988, Quine, 1989, 1995, Walling and Quine, 1990, 1993, He and Walling, 1997, Yang et al., 1998, Yang et al., 2000).

Η βασική μορφή του μοντέλου ισορροπίας μάζας για μία περιοχή που έχει υποστεί διάβρωση είναι η εξής:

$$\frac{dA(t)}{dt} = I(t) - \left(\lambda + \frac{R}{d} \right) \cdot A(t) \quad (9)$$

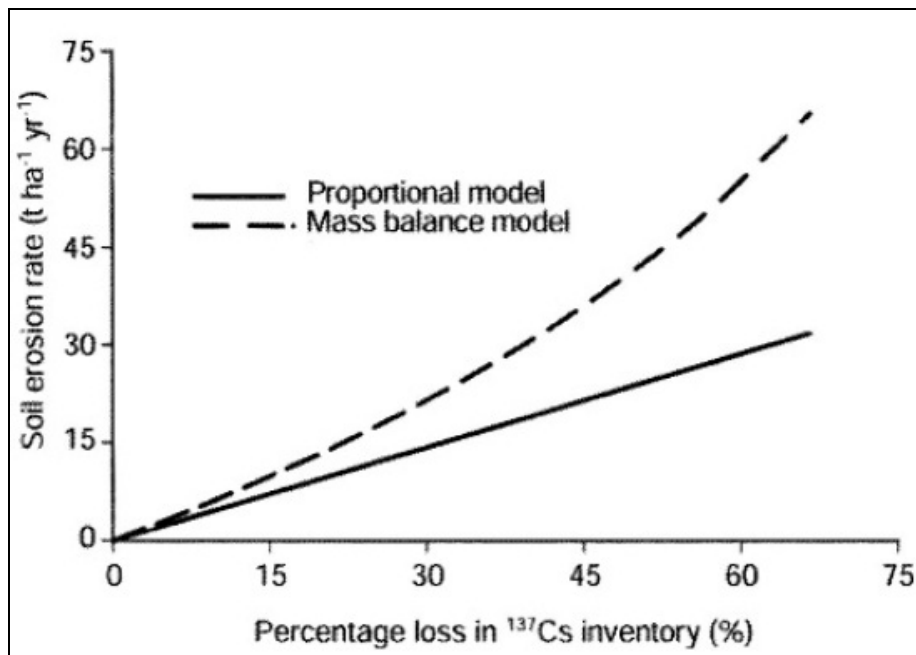
- A(t): είναι η συγκέντρωση του Cs-137 στην περιοχή την χρονική στιγμή t (Bq / m^2).
- t: ο χρόνος που έχει περάσει από την στιγμή της πρώτης επιφανειακής απόθεσης, μέχρι την στιγμή της δειγματοληψίας (yr).
- R: ο ρυθμός διάβρωσης του χώματος ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$).
- d: το μέσο βάθος του στρώματος καλλιέργειας, εκφρασμένο σε κατά μάζα βάθος (mass depth) σε μονάδες (kg / m^2).
- λ: σταθερά ραδιενεργού διάσπασης για το Cs-137 (yr^{-1}).
- I(t): ροή απόθεσης Cs-137 (deposition flux) την χρονική στιγμή t ($Bq \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$). (§5.4.2)

Για τις περισσότερες περιοχές, δεν υπάρχει πληροφορία για την ροή απόθεσης Cs-137 (deposition flux). Για το λόγο αυτό συνήθως χρησιμοποιείται η καταγραφή της επιφανειακής απόθεσης από ένα αντιπροσωπευτικό σταθμό του βορείου ή του νοτίου ημισφαιρίου, ανάλογα που βρίσκεται η περιοχή προς μελέτη (§ 5.4.2).

Η βασική μορφή του μοντέλου ισορροπίας μάζας, αποτελεί τη βάση για τον προσδιορισμό μίας σχέσης μεταξύ του ρυθμού διάβρωσης του χώματος και την διαφοράς της συγκέντρωσης του Cs-137, ανάμεσα στην διαβρωμένη περιοχή και την θέση αναφοράς. Στη βιβλιογραφία ανευρίσκονται δύο μορφές του μοντέλου ισορροπίας μάζας, ένα απλοποιημένο και ένα βελτιωμένο. Τα δύο αυτά μοντέλα παρουσιάζονται στη συνέχεια της παραγράφου.

Στο σχήμα 5.3 συγκρίνεται η σχέση μεταξύ της μείωσης της συγκέντρωσης του Cs-137 και του ρυθμού διάβρωσης, για το απλό αναλογικό μοντέλο και για το μοντέλο ισορροπίας μάζας. Η διαφορά του ρυθμού διάβρωσης που εκτιμάται από το αναλογικό μοντέλο, με τον ρυθμό που εκτιμάται από το μοντέλο ισορροπίας μάζας, αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού της μείωσης της συγκέντρωσης του Cs-137. Όταν η μείωση της συγκέντρωσης του Cs-137 σε σχέση με τη θέση αναφοράς υπερβαίνει το 50%, το αναλογικό μοντέλο υποεκτιμά το ρυθμό διάβρωσης περισσότερο από 40%. Αυτό συμβαίνει διότι το αναλογικό μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την προοδευτική ενσωμάτωση χώματος, που βρίσκεται κάτω από το βάθος καλλιέργειας, στο στρώμα καλλιέργειας¹⁴ και αυτό οδηγεί σε υποεκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης.

¹⁴ Όσο το έδαφος διαβρώνεται, επειδή το βάθος του εδάφους που ανασκάπτεται με τα σκαπτικά εργαλεία παραμένει σχετικά σταθερό, το χώμα καλλιέργειας εμπλουτίζεται από κατώτερα στρώματα του εδάφους.



Σχήμα 5.3 Σύγκριση της σχέσης μεταξύ του ρυθμού διάβρωσης και της ποσοστιαίας μείωσης του Cs-137, για το αναλογικό μοντέλο και το μοντέλο ισορροπίας μάζας.

I. Το απλοποιημένο μοντέλο ισορροπίας μάζας

Ο Zhang et al. (1990) πρότειναν ένα απλοποιημένο μοντέλο ισορροπίας μάζας το οποίο υποθέτει ότι η επιφανειακή απόθεση του συνόλου του Cs-137 έγινε το 1963, αντί να θεωρεί ότι έγινε σταδιακά από την δεκαετία του 1950 έως την δεκαετία του 1970. Μία τοποθεσία με συγκέντρωση Cs-137, μικρότερη από την συγκέντρωση του Cs-137 στην θέση αναφοράς θεωρείται περιοχή διάβρωσης, ενώ αυτή με μεγαλύτερη συγκέντρωση θεωρείται περιοχή ιζηματογένεσης. Το απλοποιημένο μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την επιλεκτικότητα του Cs-137 στα λεπτόκοκκα κλάσματα χώματος. Παρ' όλα αυτά μπορεί να ενσωματωθεί ο συντελεστής P.

Για μία περιοχή διάβρωσης ($A(t) < A_{ref}$) ο ρυθμός διάβρωσης του χώματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Y = \frac{10d \cdot B}{P} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{X}{100} \right)^{1/(t-1963)} \right] \quad (10)$$

Για μία περιοχή ιζηματογένεσης ($A(t) > A_{ref}$) ο ρυθμός ιζηματογένεσης του χώματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Y' = \frac{10d \cdot B}{P'} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{X'}{100} \right)^{1/(t-1963)} \right] \quad (11)$$

Το απλοποιημένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη την προοδευτική μείωση της συγκέντρωσης του Cs-137 στο χώμα του στρώματος καλλιέργειας, εξαιτίας της απομάκρυνσης επιφανειακού χώματος λόγω της διάβρωσης και εξαιτίας της ενσωμάτωσης στο στρώμα καλλιέργειας, χώματος που βρίσκεται κάτω από το στρώμα καλλιέργειας και το οποίο ενδεχομένως δεν περιέχει Cs-137. Τα παραπάνω δύο χαρακτηριστικά του απλοποιημένου μοντέλου ισορροπίας μάζας, αποτελούν σημαντική βελτίωση σε σχέση με το αναλογικό μοντέλο. Παρ' όλα αυτά, δεν λαμβάνεται υπόψη η απομάκρυνση του Cs-137 που έχει αποθεθεί πρόσφατα (π.χ. λόγω βροχοπτώσεως) και το οποίο δεν έχει ακόμα ενσωματωθεί στο στρώμα καλλιέργειας. Επιπλέον, η υπόθεση ότι όλο το Cs-137 αποτέθηκε κατά το έτος 1963 αποτελεί μία υπεραπλούστευση.

II. Το βελτιωμένο μοντέλο ισορροπίας μάζας

Οι Walling and He (1999), παρουσίασαν ένα βελτιωμένο μοντέλο ισορροπίας μάζας, το οποίο λαμβάνει υπόψη την απομάκρυνση του Cs-137 που έχει πρόσφατα αποθεθεί και το οποίο δεν έχει ακόμα ενσωματωθεί στο στρώμα καλλιέργειας.

Για μία περιοχή όπου παρουσιάζεται διάβρωση ($A(t) < A_{ref}$) ο ρυθμός διάβρωσης του χώματος R ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) υπολογίζεται από την επίλυση ενός συστήματος δύο εξισώσεων :

$$A(t) = A(t_0) \cdot e^{-\left(\frac{PR}{d_m} + \lambda\right)(t-t_0)} + \int_{t_0}^t \left(1 - P \cdot \gamma \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{H}} \right) \right) I(t') \cdot e^{-\left(\frac{PR}{d_m} + \lambda\right)(t-t')} \cdot dt' \quad (12)$$

$$A(t_0) = \int_{1954}^{t_0} I(t') \cdot e^{-\lambda \cdot (t-t_0)} dt' \quad (13)$$

$A(t_0)$: η συγκέντρωση του Cs-137, την χρονική στιγμή t_0

λ : η σταθερά ραδιενεργού διάσπασης για το Cs-137 (yr^{-1}).

γ : η τιμή της παραμέτρου γ εξαρτάται από την χρονική στιγμή της καλλιέργειας και την τοπική ετήσια βροχοπτώσης. Για παράδειγμα, αν θεωρηθεί ένα σενάριο, κατά το οποίο υπάρχει μόνο μία περίοδος βροχών το χρόνο, με υψηλής έντασης βροχές που μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση και αυτό συμβαίνει λίγο πριν την περίοδο της καλλιέργειας, τότε, όλο το Cs-137 που έχει πρόσφατα αποτεθεί στο επιφανειακό χώμα, θα είναι εύκολα διαθέσιμο να απομακρυνθεί λόγω της διάβρωσης. Στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να υποτεθεί ότι $\gamma=1$. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν υψηλής έντασης βροχές αμέσως μετά την περίοδο της καλλιέργειας, το πρόσφατο Cs-137 εκτιμάται ότι θα έχει ενσωματωθεί στο στρώμα καλλιέργειας και η μόνη ποσότητα Cs-137 που θα είναι εύκολο να απομακρυνθεί με τη βροχή είναι αυτή που αποτίθεται με τη βροχοπτώση. Κάτω υπό αυτές τις συνθήκες, η παράμετρος γ ίσως μπορεί να εκτιμηθεί από τον λόγο του ύψους βροχής την περίοδο έντονων βροχοπτώσεων, προς το ετήσιο ύψος βροχής στην περιοχή. Εάν υπάρχουν περισσότερες από μία, περιόδοι καλλιέργειας, το γ θα εξαρτάται από την χρονική περίοδο των βροχοπτώσεων, σε σχέση με τις αγροτικές εργασίες. Είναι φανερό από τα παραπάνω ότι η εκτίμηση μίας τιμής για την παράμετρο γ παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες και είναι αρκετά επισφαλής.

H : βάθος χαλάρωσης (relaxation depth). Πρόκειται για το κατά μάζα βάθος (kg/m^2) στο οποίο η συγκέντρωση του Cs-137, έχει μειωθεί στο $1/e$ της συγκέντρωσής που έχει στο επιφανειακό χώμα (§ 5.4.4).

t_0 (yr) : έτος κατά το οποίο ξεκίνησε η καλλιέργεια του εδάφους, της περιοχής.

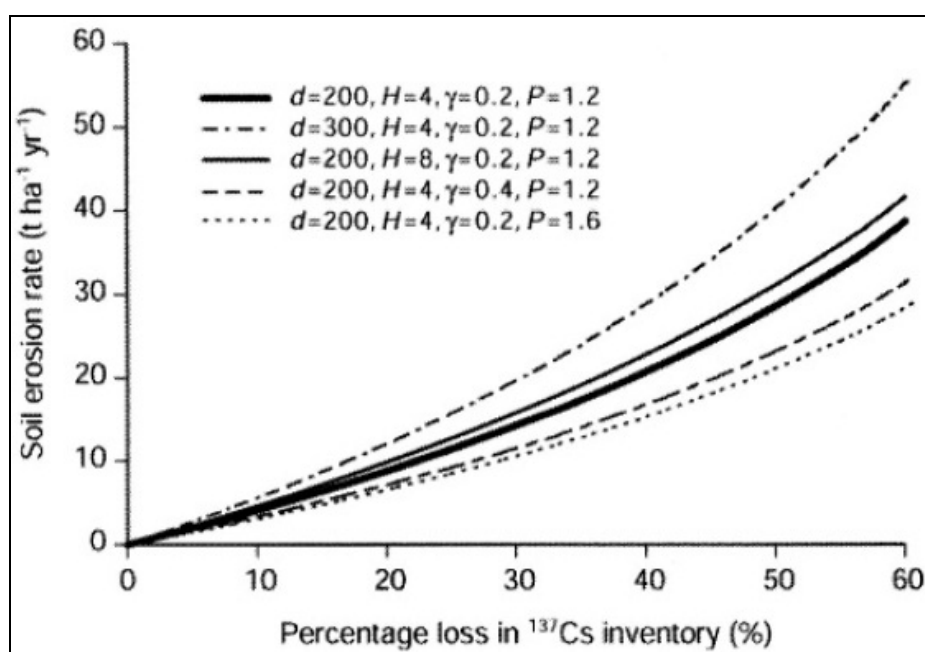
Με την παραδοχή ότι ο ρυθμός διάβρωσης (R) είναι σταθερός καθ' όλη την διάρκεια της περιόδου που εξετάζεται, μπορεί να υπολογιστεί με επίλυση του συστήματος των δύο εξισώσεων χρησιμοποιώντας μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης.

Για μία περιοχή όπου παρουσιάζεται προσθήκη χόματος ($A(t) > A_{ref}$) ο ρυθμός ιζηματογένεσης του χόματος R' ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) υπολογίζεται, αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση από το σύστημα των δύο εξισώσεων ως εξής :

$$A(t) = A(t_0) \cdot e^{-\left(\frac{P \cdot R'}{d_m} + \lambda\right)(t-t_0)} + \int_{t_0}^t \left(1 - P' \cdot \gamma \cdot \left(1 - e^{-\frac{R'}{H}}\right)\right) I(t') \cdot e^{-\left(\frac{P \cdot R'}{d_m} + \lambda\right)(t-t')} dt' \quad (14)$$

$$A(t_0) = \int_{1954}^{t_0} I(t') \cdot e^{-\lambda \cdot (t-t_0)} \cdot dt' \quad (15)$$

Επειδή συνήθως ως ροή απόθεσης Cs-137 (deposition flux) χρησιμοποιείται η ροή για μία αντιπροσωπευτική τοποθεσία του βόρειου ή νότιου ημισφαιρίου, η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης Cs-137 και του ρυθμού διάβρωσης που υπολογίζεται από το μοντέλο, εξαρτάται τελικά μόνο από τις παραμέτρους H , γ , P , d . Στο σχήμα 5.4 απεικονίζεται γραφικά η ευαισθησία του αποτελέσματος του μοντέλου, από τις τέσσερις αυτές παραμέτρους.



Σχήμα 5.4 Ανάλυση ευαισθησίας του βελτιωμένου μοντέλου ισορροπίας μάζας

Όπως φαίνεται από το παραπάνω γράφημα, ο ρυθμός διάβρωσης είναι ανάλογος του στρώματος καλλιέργειας (d) και του βάθους χαλάρωσης (H), ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογος της τιμής της παραμέτρου γ και του συντελεστή P . Το μοντέλο είναι περισσότερο ευαίσθητο στο d , παρά στο H . Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για μία τοποθεσία με ποσοστιαία μείωση του Cs-137, 20% σε σχέση με την θέση αναφοράς, μία αύξηση του d κατά ~50% (από 200 σε 300) θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού διάβρωσης κατά ~36%. Αντίστοιχα, μία αύξηση του H , κατά 100% (από 4 σε 8) θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού διάβρωσης μόνο κατά 12%. Το μοντέλο είναι επίσης πολύ ευαίσθητο στις τιμές του γ και κυρίως του P . Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, όταν η τιμή της παραμέτρου γ διπλασιάζεται (από 0.2 σε 0.4), ο ρυθμός διάβρωσης μειώνεται κατά ~19%, ενώ όταν η τιμή του P αυξάνεται κατά 33% (από 1.2 σε 1.6), ο ρυθμός διάβρωσης μειώνεται κατά ~25%. Όπως είναι φανερό από τα προηγούμενα, ο ερευνητής που χρησιμοποιεί το μοντέλο αυτό πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός κατά την επιλογή των παραμέτρων.

5.2.2 Μοντέλα προσδιορισμού αναδιανομής χόματος για αδιατάρακτα εδάφη

5.2.2.1 Μοντέλα για Cs-137

Για τα αδιατάρακτα εδάφη, η κατά βάθος κατανομή του Cs-137 διαφέρει πολύ από την κατανομή του για καλλιεργημένα εδάφη, όπου το χόμα αναμιγνύεται συχνά μέσα στο στρώμα καλλιέργειας (He and Walling, 1997). Στις περισσότερες περιπτώσεις, σε αδιατάρακτα εδάφη οι συγκεντρώσεις του Cs-137 είναι υψηλότερες κοντά στην επιφάνεια και μειώνονται κατά βάθος, συνήθως ακολουθώντας τον εκθετικό νόμο (Walling and Quine, 1992). Συχνά μάλιστα, ένα μεγάλο ποσοστό του συνολικού Cs-137 περιλαμβάνεται στα πρώτα 15 εκατοστά του εδάφους (Walling and Quine, 1992). Συνεπεία των παραπάνω, συγκεκριμένο επίπεδο μείωσης της συγκέντρωσης του Cs-137 σε σχέση με την θέση αναφοράς, συνεπάγεται πιθανότατα χαμηλότερο επίπεδο διάβρωσης σε μία αδιατάρακτη περιοχή, από ότι σε μία περιοχή όπου το χόμα καλλιεργείται. Όπως είναι φυσικό, και τα μοντέλα αναδιανομής του χόματος για αδιατάρακτα εδάφη θα είναι διαφορετικά από τα μοντέλα που εφαρμόζεται σε καλλιεργούμενα εδάφη.

5.2.2.1.1 Εμπειρικά μοντέλα

Όπως συμβαίνει και με τα καλλιεργημένα χόματα, μπορούν να αναπτυχθούν εμπειρικές σχέσεις και για τα αδιατάρακτα χόματα. Οι Elliott et al. (1990) και οι Loughran et al. (1995) ανέπτυξαν την παρακάτω εμπειρική σχέση για μία περιοχή με βοσκότοπους στο New South Wales της Αυστραλίας:

$$Y = 7.74 \cdot (1.09^X) \quad (16)$$

Η σχέση αυτή έχει αναπτυχθεί με χρήση 31 πειραματικών σημείων και έχει υψηλό συντελεστή συσχέτισης ($r=0.82$). Στα 31 αυτά σημεία της περιοχής South Wales, έχει υπολογιστεί ο ρυθμός διάβρωσης του χόματος (Y) μέσω της γενικής εξίσωσης απώλειας χόματος (USLE) (§ 2.1.1). Η εμπειρική σχέση (16) έχει δημιουργηθεί μέσω της συσχέτισης της τιμής Y με την αντίστοιχη τιμή X για τα 31 αυτά σημεία. Οι περιορισμοί και οι αβεβαιότητες που υπάρχουν κατά την εφαρμογή της σχέσης αυτής είναι οι ίδιοι με αυτούς που αναφέρθηκαν και για τις αντίστοιχες σχέσεις που ισχύουν για καλλιεργημένα εδάφη (§ 5.2.1.1).

Η ποσοστιαία μείωση της συγκέντρωσης στη θέση δειγματοληψίας, σε σχέση με τη θέση αναφοράς υπολογίζεται από τη σχέση:

$$X = \left[\frac{A_{ref} - A}{A_{ref}} \right] \cdot 100\% \quad (17)$$

A_{ref} : η μετρούμενη συγκέντρωση του Cs-137 στην θέση αναφοράς (Bq / m^2).

A : η μετρούμενη συγκέντρωση του Cs-137 στο σημείο δειγματοληψίας (Bq / m^2).

5.2.2.1.2 Θεωρητικά μοντέλα

Παράλληλα με τα εμπειρικά μοντέλα, έχουν αναπτυχθεί και θεωρητικά μοντέλα εκτίμησης του ρυθμού αναδιανομής του χώματος¹⁵. Δύο τέτοια θεωρητικά μοντέλα, που εφαρμόζονται ευρέως και διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το επίπεδο πολυπλοκότητας, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Στον πρώτο μοντέλο, η προσοχή επικεντρώνεται στη χαρακτηριστική, κατά βάθος εκθετική κατανομή του Cs-137 στα αδιατάρακτα εδάφη. Εάν η κατά βάθος κατανομή του Cs-137 μπορεί να προσεγγιστεί από μια απλή αριθμητική συνάρτηση, είναι δυνατό να υπολογιστεί ο ρυθμός διάβρωσης. Τέτοια μοντέλα μετατροπής αναφέρονται συνήθως ως μοντέλα κατανομής προφίλ (profile-distribution models). Σε περίπτωση που η κατά βάθος κατανομή δεν μπορεί να προσεγγιστεί με εκθετική συνάρτηση, χρησιμοποιούμε το δεύτερο μοντέλο.

Το δεύτερο μοντέλο είναι ανάλογο με τα μοντέλα «ισορροπίας μάζας» που χρησιμοποιούνται για τα καλλιεργημένα εδάφη. Σε αυτήν την περίπτωση, γίνεται προσπάθεια να μοντελοποιηθεί η συσσώρευση και η κατά βάθος κατανομή του Cs-137 στο χώμα με το πέρασμα του χρόνου, και επομένως η σχέση μεταξύ του ρυθμού διάβρωσης ή ιζηματογένεσης και του ποσοστού μείωσης της συγκέντρωσης Cs-137 ως προς τη θέση αναφοράς. Αυτά τα μοντέλα συχνά ονομάζονται μοντέλα «διάχυσης και μετανάστευσης» (diffusion and migration models), δεδομένου ότι είναι οι δύο κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την προς τα κάτω μεταφορά του Cs-137 στο χώμα.

¹⁵ Πρωταρχικός στόχος της ανάπτυξης των μοντέλων αυτών ήταν ο περιορισμός κατά το δυνατόν των αβεβαιοτήτων λόγω της πειραματικής διαδικασίας, προσαρμογής κλπ, χωρίς όμως να είναι βέβαιο ότι ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται αφού τα θεωρητικά μοντέλα στηρίζονται σε μία σειρά από παραδοχές.

5.2.2.1.2.1 Μοντέλα κατανομής προφίλ (profile-distribution models)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η κατά βάθος κατανομή του Cs-137 στο αδιατάραχτο έδαφος είναι εκθετικής μορφής, ή μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά με συνάρτηση εκθετικής μορφής. Η εκθετική κατανομή έχει τη μορφή:

$$A(x) = ae^{-\frac{x}{h_0}} \quad (18)$$

$A(x)$: η συγκέντρωση του Cs-137 στο βάθος x (Bq/kg)

a : σταθερά

x : το κατά μάζα βάθος (kg/m^2)

h_0 : Συντελεστής που δείχνει το βαθμό διείδυσης του Cs-137 στο χώμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του h_0 τόσο βαθύτερη είναι η διείδυση του Cs-137 στο χώμα. Η εκτίμησή του h_0 μπορεί να γίνει μέσω της εύρεσης της εκθετικής συνάρτησης από τα πειραματικά σημεία

Οι παραδοχές του μοντέλου είναι ότι η συνολική επιφανειακή απόθεση Cs-137 έγινε το 1963 και ότι η κατά βάθος κατανομή του Cs-137 στο χώμα είναι ανεξάρτητη με το χρόνο. Για μία θέση όπου υπάρχει διάβρωση, δηλαδή όταν η συγκέντρωση Cs-137 A (Bq/m^2) στην περιοχή είναι μικρότερη από την συγκέντρωση Cs-137 A_{ref} (Bq/m^2) στην θέση αναφοράς, ο ρυθμός διάβρωσης του χώματος Y ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$) υπολογίζεται από τη σχέση (Walling and Quine, Zhang, 1990):

$$Y = -\frac{10}{t-1963} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{X}{100} \right) \right] \cdot h_0 \quad (19)$$

$$X = \left[\frac{A_{ref} - A}{A_{ref}} \right] \cdot 100\% \quad (20)$$

t (yr) : είναι το έτος της δειγματοληψίας - προφανώς μεταγενέστερο του 1963

Για μία θέση όπου υπάρχει ιζηματογένεση, ο ρυθμός ιζηματογένεσης του χώματος Y ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Y = -\frac{10}{t-1963} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{X'}{100} \right) \right] \cdot h_0 \quad (21)$$

$$X' = \left[\frac{A - A_{ref}}{A_{ref}} \right] \cdot 100\% \quad (22)$$

Αν και το μοντέλο κατανομής προφίλ (profile-distribution model) είναι απλό και εύχρηστο βασίζεται σε σημαντικές απλοποιήσεις. Μία σημαντική απλοποίηση που έχει γίνει είναι ότι δεν λαμβάνονται υπόψη ο χρονικά μεταβαλλόμενος ρυθμός της ατμοσφαιρικής επιφανειακής απόθεσης Cs-137 και της ανακατανομής του Cs-137, μετά από την απόθεσή του στο έδαφος. Είναι σαφές ότι, το εναποτεθέν Cs-137 στο επιφανειακό χώμα, διεισδύει σταδιακά στο έδαφος και επομένως ο συντελεστής h_0 είναι σχεδόν βέβαιο ότι αυξάνεται με το χρόνο. Οπότε, το μοντέλο αυτό είναι πιθανόν ότι υπερεκτιμά το ρυθμό διάβρωσης του χώματος. Επιπλέον, δεν λαμβάνει υπόψη την απόθεση Cs-137 λόγω του ατυχήματος του Chernobyl, κάτι που προσθέτει πολλές αβεβαιότητες στο τελικό αποτέλεσμα, ειδικά αν πρόκειται για περιοχή με μεγάλη απόθεση.

5.2.2.1.2.2 Μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης (diffusion and migration model)

Αν και το απλό μοντέλο κατανομής προφίλ (profile distribution model) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμήσει τους ρυθμούς διάβρωσης του χώματος για τα αδιατάραχτα εδάφη, μια ρεαλιστικότερη προσέγγιση θα πρέπει να λάβει υπόψη τη μεταβλητότητα της κατά βάθος κατανομής του Cs-137, ως αποτέλεσμα της χρονικά εξαρτημένης ατμοσφαιρικής απόθεσης του Cs-137 και της μετέπειτα ανακατανομής του στο χώμα (Pegoyen and Fridman, 1978, Bachhuber et al., 1982, Reynolds et al., 1982, Walling and He, 1992, 1993, Knatko et al., 1996, Walling and He, 1997).

Η ανακατανομή του Cs-137 μέσα στο χώμα είναι το αποτέλεσμα ενός συνδυασμού μηχανισμών, συμπεριλαμβανομένων φυσικο-χημικών και βιολογικών διεργασιών. Προκειμένου να αποφευχθεί η ανάγκη να μοντελοποιηθεί κάθε μια από αυτές τις διαδικασίες, οι Walling και He (1997), απεικόνισαν την επίδρασή τους, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο που περιλαμβάνει ένα συντελεστή διάχυσης D ($\text{kg}^2 \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{yr}^{-1}$) και τον ρυθμό κατακόρυφης μετανάστευσης V ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$) του Cs-137 στο προφίλ χώματος (Pegoyen and Fridman, 1978 Walling και He, 1993). Οι δύο παράμετροι D και V λαμβάνουν υπόψη τους όλες τις διαδικασίες ανακατανομής,

συμπεριλαμβανομένων των φυσικο-χημικών διεργασιών, της προσρόφησης και εκρόφησης Cs-137 από τους κόκκους χώματος.

Η συγκέντρωση του Cs-137, $C_u(t)$ (Bq/kg) στο επιφανειακό χώμα το χρονική στιγμή t (yr) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')} dt' \quad (23)$$

t : Η χρονική διάρκεια από την πρώτη απόθεση Cs-137 στο χώμα

D : ο συντελεστής διάχυσης ($kg^2 \cdot m^{-4} \cdot yr^{-1}$) (§ 5.4.5)

V : ο ρυθμός κατακόρυφης μετανάστευσης του Cs-137 στο προφίλ χώμα ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) (§ 5.4.5)

Για μία θέση όπου υπάρχει διάβρωση, δηλαδή όταν η συγκέντρωση Cs-137 A (Bq/m^2) στην περιοχή είναι μικρότερη από την συγκέντρωση Cs-137 A_{ref} (Bq/m^2) στην θέση αναφοράς, ο ρυθμός διάβρωσης R ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) μπορεί να υπολογιστεί από την επίλυση του παρακάτω συστήματος εξισώσεων:

$$C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' \quad (24)$$

$$\int_0^t P \cdot R \cdot C_u(t') \cdot e^{-\lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' = A_{ref} - A \quad (25)$$

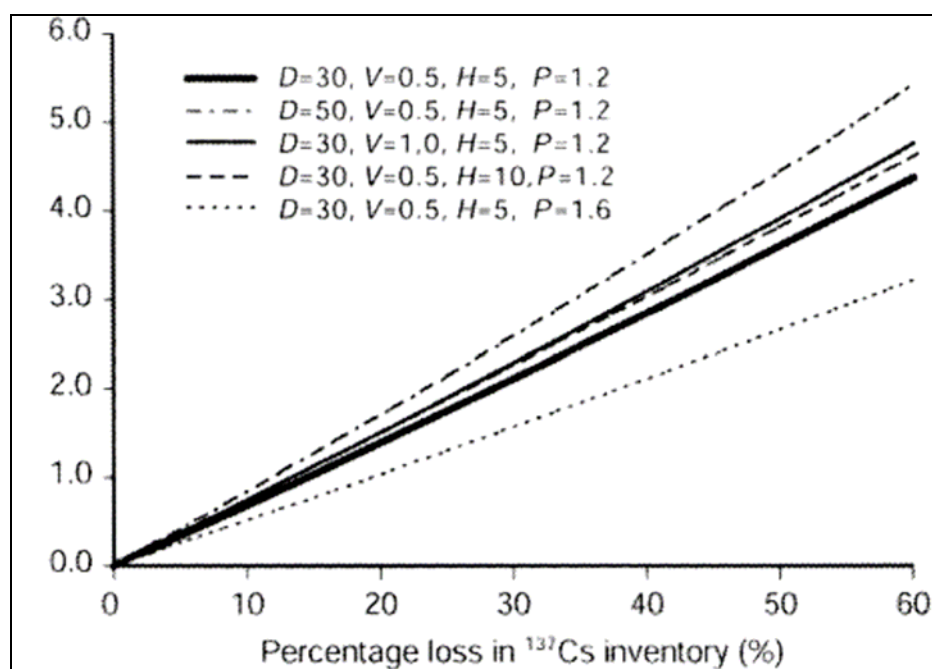
➤ Οι συντελεστές P , H , t , λ είναι ίδιοι με τα προηγούμενα.

Για μία θέση όπου υπάρχει ιζηματογένεση, ο ρυθμός ιζηματογένεσης R' ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) μπορεί να υπολογιστεί από υπολογιστεί από την επίλυση του παρακάτω συστήματος:

$$C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R'/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' \quad (26)$$

$$\int_0^t P' \cdot R' \cdot C_u(t') \cdot e^{-\lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' = A - A_{ref} \quad (27)$$

Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης (Zarata, 2002) σχετικά με την ευαισθησία της παραπάνω μεθοδολογίας εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης, από τις τιμές των παραμέτρων D , V , H και P . Όπως διαπιστώνεται, ο ρυθμός διάβρωσης είναι ανάλογος των D , V και H , ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογος του P . Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, για μία περιοχή στην οποία, η ποσοστιαία μείωση της συγκέντρωσης του Cs-137 σε σχέση με την θέση αναφοράς είναι 20%, μία αύξηση της τιμής του P , κατά 33% (από 1.2 σε 1.6), έχει ως αποτέλεσμα της μείωσης του ρυθμού διάβρωσης κατά 25%. Το μοντέλο είναι πιο ευαίσθητο στην μεταβολή του D , από ό,τι των παραμέτρων V και H . Εάν η τιμή του V ή του H διπλασιαστεί, ο ρυθμός διάβρωσης θα αυξηθεί κατά μόλις 7%, ενώ αν το D , αυξηθεί κατά 66%, ο ρυθμός διάβρωσης θα αυξηθεί κατά 23%.



Σχήμα 5.5 Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου

5.2.2.2 Μοντέλο για Pb-210

Ο Pb-210 έχει συγκρίσιμο χρόνο ημιζωής (22.3 έτη) με το Cs-137. Η φυσική του προέλευση και η συνεχής απόθεσή του, το καθιστά κατάλληλο για την εκτίμηση πιο ρυθμών διάβρωσης παρόμοιων με αυτούς που προσδιορίζονται από το Cs-137. Το μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης (*diffusion and migration model*) που χρησιμοποιείται για το Cs-137, με κατάλληλες τροποποιήσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον Pb-210. Στην περίπτωση του Pb-210, είναι πολύ σημαντικό να διευκρινισθεί ότι το μοντέλο δεν στηρίζεται στο συνολικό Pb-210 που ανιχνεύεται στο χώμα, αλλά στο επιπλέον Pb-210, το οποίο

έχει προστεθεί στο χώμα από την ατμόσφαιρα εξαιτίας της διάσπασης του ραδονίου και της εν συνεχεία απόθεσης στο έδαφος των θυγατρικών του. Αφού λοιπόν εκτιμηθεί σε ένα δείγμα χώματος το περιεχόμενο σε Pb-210, αφαιρείται η ποσότητα του Pb-210, η οποία οφείλεται στο Ra-226 που υπάρχει στο χώμα¹⁶ και με τον τρόπο αυτό εκτιμάται ο πλεονάζων Pb-210, που έχει προστεθεί και θα συμβολίζεται στη συνέχεια ως Pb_{ex}-210 (excessive Pb-210). Οι τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν στο μοντέλο του Cs-137 είναι οι εξής (Walling and He, 1999, Walling et al., 2003):

- Η περίοδος της μελέτης πρέπει να αφορά τουλάχιστον τα τελευταία 100 χρόνια πριν από την δειγματοληψία. Υποτίθεται ότι η ποσότητα του Pb_{ex}-210 που έχει αποτεθεί πριν από αυτή την χρονική περίοδο είναι ασήμαντη, λόγω της ραδιενεργού απομείωσής του. Θεωρητικά, μετά από 100 χρόνια μόνο το 4% της ραδιενέργειας θα απομείνει. Οπότε η χρονική διάρκεια από την πρώτη επιφανειακή απόθεση μέχρι την στιγμή της δειγματοληψίας, που είναι παράμετρος του μοντέλου διάχυσης και μετανάστευσης, θα είναι 100 χρόνια.
- Υποτίθεται ότι η απόθεση Pb_{ex}-210 και η ραδιενεργός του απομείωση θα αντιπροσωπεύουν μία σταθερή τιμή οπότε η συγκέντρωση του Pb_{ex}-210 (Bq·m⁻²) στην θέση αναφοράς (A_{ref}) παραμένει σταθερή με τον χρόνο. Η ροή απόθεσης (deposition flux) (I(t)) του Pb_{ex}-210 υπολογίζεται ως εξής:

$$I(t) \text{ (Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}\text{)} = \frac{A_{ref} \cdot \ln(2)}{22.3} \quad (28)$$

- Η χρήση διαφορετικής σταθερά ραδιενεργής διάσπασης $\lambda \text{ (yr}^{-1}\text{)}$, καθώς το ραδιοϊσότοπο που χρησιμοποιείται για την μελέτη είναι το Pb-210.

Η μέγιστη συγκέντρωση του Pb_{ex}-210 βρίσκεται στο επιφανειακό χώμα και η συγκέντρωσή του μειώνεται εκθετικά κατά βάθος (He and Walling, 1997). Λαμβάνοντας υπόψη την ραδιενεργό απομείωση του Pb_{ex}-210, καθώς και τις φυσικο-χημικές και βιολογικές διεργασίες στο χώμα, η κατά βάθος κατανομή του Pb_{ex}-210 στο χώμα, μοντελοποιείται ως εξής:

$$C_u(z) = C_u(0) \cdot e^{-\frac{z}{h_0}} \quad (29)$$

$C_u(z)$: η συγκέντρωση του Pb_{ex}-210 στο βάθος z (Bq/kg)

$C_u(0)$: η συγκέντρωση του Pb_{ex}-210 στο επιφανειακό χώμα (0-2cm) (Bq/kg)

¹⁶ Ο υπολογισμός του Pb-210 που υπάρχει στο χώμα στηρίζεται στην παραδοχή της ραδιενεργού ισορροπίας μεταξύ Ra-226 και Pb-210.

z : το κατά μάζα βάθος (kg / m^2)

h_0 : συντελεστής που δείχνει το βαθμό διείσδυσης του Pb_{ex} -210 στο χώμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του h_0 τόσο βαθύτερη είναι η διείσδυση του Pb_{ex} -210 στο χώμα. Η εκτίμησή του μπορεί να γίνει μέσω κατάλληλης προσαρμογής πειραματικών σημείων στην παραπάνω εκθετική συνάρτηση.

Η εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης R ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) γίνεται όπως στην περίπτωση του Cs-137 από το σύστημα των παρακάτω 2 εξισώσεων:

$$C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' \quad (30)$$

$$\int_0^t P \cdot R \cdot C_u(t') \cdot e^{-\lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' = A_{ref} - A \quad (31)$$

A_{ref} : η μετρούμενη συγκέντρωση του Pb_{ex} -210 στην θέση αναφοράς (Bq / m^2)

A : η μετρούμενη συγκέντρωση του Pb_{ex} -210 στο σημείο δειγματοληψίας (Bq / m^2)

P : υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως για το Cs-137 (§ 5.4.1)

H : είναι το βάθος μάζας (mass depth) (kg / m^2) στο οποίο η συγκέντρωση του Pb_{ex} -210 μειώνεται στο $1/e$ της συγκέντρωσης του Pb_{ex} -210 στο επιφανειακό χώμα (§ 5.4.4).

t : είναι η χρονική περίοδος για την οποία γίνεται η μελέτη και όπως προαναφέρθηκε θεωρείται $t=100$ yr

λ : η σταθερά ραδιενεργού διάσπασης του Pb_{ex} -210 (yr^{-1})

$I(t)$: η ροή απόθεσης ($I(t)$) του Pb_{ex} -210 ($Bq \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$), όπως προαναφέρθηκε

υπολογίζεται ως εξής:
$$I(t) = \frac{A_{ref} \cdot \ln(2)}{22.3}$$

V : ο συντελεστής μετανάστευσης ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) του Pb_{ex} -210 θεωρείται μηδενικός ($V=0$). Η παραδοχή γίνεται διότι η μέγιστη συγκέντρωση του Pb_{ex} -210 είναι στο επιφανειακό χώμα και μπορούμε να δεχτούμε ότι η μεταβολή της κατά βάθους κατανομής του Pb_{ex} -210 είναι αποτέλεσμα μόνο

της διάχυσης. Έτσι η κατακόρυφη μετανάστευση θεωρείται αμελητέα. (He and Walling, 1997).

D : ο συντελεστής διάχυσης ($kg^2 \cdot m^{-4} \cdot yr^{-1}$) μπορεί να υπολογιστεί από την εξής σχέση (He and Walling, 1997):

$$\frac{1}{h_0} = 0.5 \cdot \left(\sqrt{\frac{V^2}{D^2} + \frac{4\lambda}{D}} - \frac{V}{D} \right) \quad (32)$$

όπου το $V=0$ και τα λ , h_0 είναι γνωστά.

Αντίστοιχα, η εκτίμηση του ρυθμού ιζηματογένεσης R' ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) γίνεται όπως στην περίπτωση του Cs-137 από το σύστημα των παρακάτω 2 εξισώσεων:

$$C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R'/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' \quad (33)$$

$$\int_0^t P' \cdot R' \cdot C_u(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt' = A - A_{ref} \quad (34)$$

5.2.2.3 Μοντέλο για Be-7

Το Be-7 έχει πολύ μικρότερο χρόνο ημιζωής από τα Cs-137 και τον Pb-210 και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της βραχυχρόνιας αναδιανομής του χώματος. Το βάθος διείσδυσής του στο χώμα είναι πολύ μικρό (μικρότερο από 2cm στις περισσότερες περιπτώσεις), αφού ο μικρός χρόνος ημιζωής του έχει ως αποτέλεσμα πολύ περιορισμένο χρόνο για κατακόρυφη μετανάστευση και διάχυση στο χώμα (Blake et al., 1999). Οι πιθανή καλλιέργεια του εδάφους, στην χρονική περίοδο ανάμεσα στην απόθεση του Be-7 και την στιγμή της δειγματοληψίας, κάνει ακατάλληλη τη χρήση του, επειδή η ανάμιξη του Be-7 στο στρώμα καλλιέργειας θα κάνει την συγκέντρωση του Be-7 στο χώμα πολύ μικρή, για να είναι ανιχνεύσιμη.

Επίσης είναι σημαντικό, το γεγονός διάβρωσης που μελετάται να απέχει χρονικά από προηγούμενα γεγονότα που προκάλεσαν σημαντική διάβρωση (π.χ

πολύ έντονες βροχοπτώσεις), τουλάχιστον 5 μήνες (περίπου 3 χρόνους ημιζωής του Be-7). Αυτό πρέπει να γίνει καθώς η πιθανή χωρική μεταβλητότητα του Be-7 λόγω φαινομένων διάβρωσης του χώματος, θα εξαλειφθεί λόγω της ραδιενεργού απομείωσης του, μετά από 3 χρόνους ημιζωής του. Ακόμα, πρέπει να οι βροχοπτώσεις την ενδιάμεση περίοδο μεταξύ των 2 γεγονότων να είναι περιορισμένες, ώστε η αναδιανομή χώματος να είναι αμελητέα (Blake et al., 1999)

Για να μετατραπεί η συγκέντρωση του Be-7 σε εκτίμηση της διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του χώματος, στο μοντέλο κατανομής προφίλ (profile distribution model) του Cs-137 θα πρέπει να γίνουν οι εξής τροποποιήσεις (Walling et al., 1999, Blake et al., 1999, Schuller et al., 2006):

- Η χρονική περίοδος μελέτης θα πρέπει να μετατραπεί από μερικές δεκαετίες, σε ένα απλό συμβάν.
- Το μοντέλο δεν θα υπολογίζει τον ρυθμό αναδιανομής του χώματος, αλλά την αναδιανομή του χώματος που έχει συμβεί στην χρονική περίοδο μελέτης.
- Ο συντελεστής h_0 που δείχνει τον βαθμό διείσδυσης του Cs-137 στο χώμα, στην περίπτωση του Be-7 θα είναι πολύ μικρότερος ($< 20 \text{ kg} / \text{m}^2$), καθώς το βάθος διείσδυσης του Be-7, είναι πολύ μικρότερο.

Για να εφαρμοστεί το μοντέλο κατανομής προφίλ πρέπει να είναι γνωστή η κατά βάθος κατανομή του Be-7 στο χώμα. Η μείωση της συγκέντρωσης του Be-7 κατά βάθος είναι εκθετική και μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εκθετική συνάρτηση (Walling and Woodward, 1992, Wallbrink and Murray, 1993):

$$C(x) = c \cdot e^{-x/h_0} \quad (35)$$

$C(x)$: είναι η συγκέντρωση (Bq/kg) του Be-7 σε κατά μάζα βάθος (mass depth) x (kg / m^2)

c : είναι μία σταθερά

h_0 : είναι ο συντελεστής που απεικονίζει τον βαθμό διείσδυσης του Be-7 στα χώμα της θέσης αναφοράς (kg / m^2)

Η εκτίμησή του h_0 μπορεί να γίνει μέσω της εύρεσης της εκθετικής συνάρτησης από τα πειραματικά σημεία.

Στην περίπτωση που η συγκέντρωση του Be-7 σε ένα σημείο είναι μικρότερη από τη συγκέντρωση στην θέση αναφοράς, έχει συμβεί διάβρωση του χώματος και

το μοντέλο εκτιμά το κατά μάζα βάθος (kg / m^2) του χώματος που διαβρώνεται. Η μετρούμενη συγκέντρωση του Be-7 στο σημείο δειγματοληψίας, απεικονίζει το βάθος του χώματος που έχει διαβρωθεί, ως εξής (Walling and He, 1999):

$$A = A_{ref} \cdot e^{h/h_0} \quad (36)$$

- A_{ref} : η μετρούμενη συγκέντρωση του Be-7 στην θέση αναφοράς (Bq / m^2)
 A : η μετρούμενη συγκέντρωση του Be-7 στο σημείο δειγματοληψίας (Bq / m^2)
 h : το βάθος του χώματος που έχει διαβρωθεί (kg / m^2)

Οπότε το βάθος διάβρωσης του χώματος υπολογίζεται ως εξής:

$$h = h_0 \cdot \ln(A / A_{ref}) \quad (37)$$

Στην περίπτωση που η συγκέντρωση του Be-7 στο σημείο δειγματοληψίας είναι μεγαλύτερη από την συγκέντρωση στην θέση αναφοράς, τότε το σημείο έχει υποστεί ιζηματογένεση. Το πάχος του χώματος που έχει αποθεθεί (kg / m^2) υπολογίζεται ως εξής:

$$h' = h_0 \cdot \ln(A_{ref} / A) \quad (38)$$

5.3 Η διαδικασία επιλογής ενός μοντέλου προσδιορισμού αναδιανομής χώματος

Τα διάφορα μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί, παρέχουν στον ερευνητή έναν αξιοσημείωτο, και ίσως υπερβολικό, αριθμό επιλογών μοντέλων εκτίμησης του ρυθμού αναδιανομής χώματος για χρήση σε μια λεπτομερή έρευνα. Καταρχήν, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μπορεί ο ερευνητής να διακρίνει τα καλλιεργημένα και αδιατάρακτα εδάφη. Πέρα όμως από αυτό, η επιλογή του μοντέλου γίνεται και με βάση την απλότητα ή την πολυπλοκότητά του, τους περιορισμούς κατά την εφαρμογή του μοντέλου και την ευκολία εφαρμογής τους. Για παράδειγμα, ενώ το «αναλογικό» μοντέλο είναι σχετικά εύκολο να εφαρμοστεί, το βελτιωμένο μοντέλο «ισορροπίας μάζας» είναι αρκετά πιο σύνθετο και απαιτητικό από την άποψη της εφαρμογής του. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα απλούστερα μοντέλα περιλαμβάνουν σημαντικούς περιορισμούς και απλοποιήσεις που δεν υπάρχουν στα πιο σύνθετα μοντέλα. Για παράδειγμα, το «αναλογικό μοντέλο», ενώ είναι απλό να εφαρμοστεί, είναι πιθανό να υποτιμήσει τους ρυθμούς διάβρωσης ενώ οι παραδοχές που γίνονται κατά την εφαρμογή του μοντέλου είναι συχνά αμφισβητήσιμες. Το

μοντέλο «κατανομής προφίλ» που είναι πάλι επίσης απλό να εφαρμοστεί, δεν λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξάρτηση της επιφανειακής απόθεσης Cs-137 και της ανακατανομή του αποτιθέμενου Cs-137 στο προφίλ χώματος και θα μπορούσε, επομένως, να υπερεκτιμήσει τον ρυθμό διάβρωσης του χώματος.

Τα πιο σύνθετα πρότυπα, όπως τα μοντέλα «ισορροπίας μάζα» και το μοντέλο «διάχυσης και μετανάστευσης», προσπαθούν να λάβουν υπόψη περισσότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη σχέση μεταξύ του ρυθμού διάβρωσης ή ιζηματογένεσης και της μείωσης ή αύξησης της συγκέντρωσης του Cs-137 και επομένως τα αποτελέσματά τους είναι πιο αξιόπιστα. Εντούτοις, αυτή η αξιοπιστία δεν είναι εγγυημένη. Σε πολλές μελέτες μπορεί να είναι ενδεδειγμένο να χρησιμοποιηθούν περισσότερα από ένα μοντέλο, για την σύγκριση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι σε αρκετές περιπτώσεις μοντέλων η πολυπλοκότητα των απαιτούμενων υπολογισμών ενδεχομένως απαιτεί την ανάπτυξη κατάλληλου υπολογιστικού προγράμματος.

5.4 Μερικές σημαντικές παράμετροι των μοντέλων προσδιορισμού αναδιανομής χώματος

5.4.1 Οι συντελεστές διόρθωσης του μεγέθους κόκκων χώματος (P και P')

Είναι ευρέως γνωστό ότι το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει ιδιαίτερα την ποσότητα του Cs-137 στο χώμα, αφού το Cs-137 έχει την ιδιότητα να προσκολλάται επιλεκτικά σε πολύ λεπτά (fine) ανόργανα και οργανικά υλικά, επομένως και σε λεπτόκοκκα χώματα (Livens and Baxter 1988, He and Walling, 1996). Οι συντελεστές διόρθωσης μεγέθους κόκκων λαμβάνουν υπόψη αυτό το γεγονός και την επίδραση που έχει αυτή η επιλεκτικότητα¹⁷ στον εμπλουτισμό του ιζήματος σε Cs-137. Ο παράγοντας διόρθωσης P, ο οποίος χρησιμοποιείται κατά τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης, ορίζεται ως ο λόγος της συγκέντρωσης του Cs-137 στο μεταφερόμενο ίζημα προς τη συγκέντρωση του Cs-137 στο χώμα, ενώ το P', το οποίο χρησιμοποιείται κατά τον υπολογισμό του ρυθμού ιζηματογένεσης, ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας του Cs-137 του εναποθεθέντος ιζήματος προς την ποσότητα Cs-137 στο μεταφερόμενο ίζημα.

Οι He and Walling (1996), προτείνουν μία προσέγγιση για την εκτίμηση των P και P' μέσω του μεγέθους των κόκκων χώματος. Για την εκτίμηση του μεγέθους των

¹⁷ Κατά τη διαδικασία της διάβρωσης ή της ιζηματογένεσης, την μεγαλύτερη κινητικότητα παρουσιάζουν τα πλέον λεπτόκοκκα κλάσματα του χώματος.

κόκκων του χώματος χρησιμοποιείται το μέγεθος του εμβαδού της ειδικής επιφάνειας (specific surface area) (m^2 / g). Μια εκτίμηση του εμβαδού της ειδικής επιφάνειας μπορεί να γίνει εύκολα, υποθέτοντας ότι οι κόκκοι είναι σφαιρικοί. Εάν το εμβαδό της ειδικής επιφάνειας του κόκκου του μεταφερόμενου ιζήματος είναι S_m και αυτό του αρχικού χώματος είναι S_o τότε το P υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P = \left(\frac{S_m}{S_o} \right)^{0,65} = \left(\frac{\frac{4\pi r_m^2}{\rho_m \left(\frac{4\pi r_m^3}{3} \right)}}{\frac{4\pi r_o^2}{\rho_o \left(\frac{4\pi r_o^3}{3} \right)}} \right)^{0,65} = \left(\frac{r_o}{r_m} \right)^{0,65} \quad (39)$$

r : η ακτίνα του κόκκου χώματος

ρ : η πυκνότητα του χώματος. Για λόγους απλότητας θεωρείται ότι η πυκνότητα του χώματος στην θέση αναφοράς και στην διαβρωμένη περιοχή είναι η ίδια

Σύμφωνα με τους Owens and Walling (1997), επειδή δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός του εμβαδού της ειδικής επιφάνειας του κόκκου του μεταφερόμενου ιζήματος, για να βρεθεί το P, διαιρείται το εμβαδόν της ειδικής επιφάνειας του κόκκου στην περιοχή που έχει υποστεί διάβρωση, με το εμβαδόν της ειδικής επιφάνειας του κόκκου στην θέση αναφοράς¹⁸.

Το P' υπολογίζεται αντίστοιχα από τη σχέση:

$$P' = \left(\frac{S_o}{S_m} \right)^{0,65} = \left(\frac{\frac{4\pi r_o^2}{\rho_o \left(\frac{4\pi r_o^3}{3} \right)}}{\frac{4\pi r_m^2}{\rho_m \left(\frac{4\pi r_m^3}{3} \right)}} \right)^{0,65} = \left(\frac{r_m}{r_o} \right)^{0,65} \quad (40)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, επειδή δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί το εμβαδόν της ειδικής επιφάνειας του κόκκου του μεταφερόμενου ιζήματος, για να βρεθεί το

¹⁸ Δηλαδή γίνεται η παραδοχή ότι το μέγεθος του κόκκου του χώματος που έχει φύγει λόγω διάβρωσης και του κόκκου που έχει παραμείνει στην περιοχή που διαβρώνεται είναι το ίδιο.

P' , διαιρείται το εμβαδόν της ειδικής επιφάνειας του κόκκου στην θέση αναφοράς, με το εμβαδόν της ειδικής επιφάνειας του κόκκου στην περιοχή που έχει υποστεί ιζηματογένεση.

5.4.2 Εκτίμηση της ροής απόθεσης (deposition flux) του Cs-137

Τα περισσότερα μοντέλα αναδιανομής του Cs-137 απαιτούν πληροφορίες για την ετήσια ατμοσφαιρική απόθεση του Cs-137. Εν τη απουσία απευθείας μετρήσεων, η καταγραφή της ετήσιας απόθεσης Cs-137 στην υπό μελέτη τοποθεσία μπορεί να προσεγγιστεί από καταγραφές που έχουν γίνει σε γειτονικούς σταθμούς παρακολούθησης. Τα αποτελέσματα τέτοιων μετρήσεων – κυρίως για το Βόρειο Ημισφαίριο – παρατίθενται στον πίνακα 5.1 (Cambrey, 1989). Η καταγραφή της ετήσιας απόθεσης Cs-137 για το Βόρειο Ημισφαίριο ξεκινά το 1954 και σταματά το 1999.

Υποθέτοντας ότι η περιοχή μελέτης, έχει παρόμοια σχετική ετήσια μεταβλητότητα της απόθεσης Cs-137, με αυτή της αντιπροσωπευτικής περιοχής και διαφορετική σε απόλυτα μεγέθη, η ροή απόθεσης $I(t)$ (deposition flux) του Cs-137 για μία περιοχή υπολογίζεται ως εξής (Walling et. al., (24)):

$$I(t) = \alpha I_n(t) \quad (41)$$

A_{ref} : η συγκέντρωση του Cs-137 (Bq / m^2) στην θέση αναφοράς

$I_n(t)$: η αντιπροσωπευτική τιμή της ετήσιας απόθεσης Cs-137 στο βόρειο ημισφαίριο ($Bq \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$), η οποία παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1

$$\alpha : \alpha = \frac{A_{ref}}{A_n} \quad (42)$$

$$A_n : A_n = \int_{1954}^t I_n(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} dt' \quad (43)$$

Όπου A_n είναι η συγκέντρωση του Cs-137 (Bq / m^2), στο αντιπροσωπευτικό σημείο το έτος της δειγματοληψίας (t)

Δηλαδή η αντιπροσωπευτική τιμή της ετήσιας απόθεσης ($I_n(t)$), πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή «α», για να γίνει αναγωγή του $I_n(t)$ στην

εκάστοτε θέση αναφοράς, που έχει επιλεγεί για την πραγματοποίηση της μελέτης διάβρωσης χώματος.

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 5.1, δεν υπάρχει απόθεση Cs-137 για το έτος 1986, εξαιτίας του πυρηνικού ατυχήματος του Chernobyl. Είναι σαφές λοιπόν ότι η τιμές της απόθεσης που αναφέρονται στον πίνακα 5.1 έχουν προκύψει από μετρήσεις σε περιοχές με πολύ χαμηλή - ώστε να είναι μη ανιχνεύσιμη - απόθεση Cs-137 εξαιτίας του ατυχήματος. Εξυπακούεται ότι, σε περιοχές όπου η επίπτωση (fallout) εξαιτίας του ατυχήματος δεν μπορεί να αμεληθεί, τα δεδομένα του πίνακα 5.1 θα πρέπει να συμπληρωθούν με δεδομένα της απόθεσης στην συγκεκριμένη περιοχή, τα οποία φυσικά θα πρέπει να είναι διαθέσιμα.

<i>Fallout input (Bq m⁻²)</i>					
<i>Year</i>	<i>N. hem.^a</i>	<i>S. hem.^b</i>	<i>Year</i>	<i>N. hem.^a</i>	<i>S. hem.^b</i>
1954	56.5	26.8	1977	28.2	17.9
1955	219	80.5	1978	28.2	17.9
1956	219	80.5	1979	14.1	13.4
1957	212	89.5	1980	7.06	8.95
1958	282	98.4	1981	21.2	0.00
1959	565	80.5	1982	7.06	0.00
1960	127	62.6	1983	7.06	8.95
1961	148	116	1984	0.00	0.00
1962	649	170	1985	0.00	0.00
1963	1,059	179	1986	0.00	0.00
1964	706	197	1987	0.00	0.00
1965	240	206	1988	0.00	0.00
1966	134	89.5	1989	0.00	0.00
1967	63.5	62.6	1990	0.00	0.00
1968	84.7	44.7	1991	0.00	0.00
1969	49.4	89.5	1992	0.00	0.00
1970	49.4	53.7	1993	0.00	0.00
1971	63.5	62.6	1994	0.00	0.00
1972	28.2	44.7	1995	0.00	0.00
1973	21.2	35.8	1996	0.00	0.00
1974	35.3	53.7	1997	0.00	0.00
1975	28.2	35.8	1998	0.00	0.00
1976	14.1	26.8	1999	0.00	0.00

^aTotal inventory in 1996 for the northern hemisphere site = 2,400 Bq m⁻².
^bTotal inventory in 1996 for the southern hemisphere site = 1,000 Bq m⁻².

Πίνακας 5.1 Επιφανειακή απόθεση Cs-137 στο βόρειο και στο νότιο ημισφαίριο κατά την περίοδο 1954-1999

5.4.3 Εκτίμηση του συντελεστή γ

Στο βελτιωμένο μοντέλο «ισορροπίας μάζας» και για καλλιεργημένο έδαφος χρησιμοποιείται ο συντελεστής γ , ο οποίος εισάγεται να ληφθεί υπόψη το ποσοστό της ετήσιας απόθεσης Cs-137 που είναι ευαίσθητο σε διάβρωση, πριν ενσωματωθεί στο στρώμα καλλιέργειας και επομένως εξαρτάται από την χρονική στιγμή και την ένταση των βροχοπτώσεων σε σχέση με την χρονική στιγμή που πραγματοποιείται η καλλιέργεια του εδάφους. Σε περιπτώσεις που το χώμα καλλιεργείται μία φορά το χρόνο, και λίγο πριν την περίοδο της καλλιέργειας ενσκήψουν βροχές μεγάλης έντασης οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση, το Cs-137 που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς και το Cs-137 που αποτίθεται εξαιτίας της βροχής, θα είναι πολύ πιθανόν να απομακρυνθούν με το νερό της βροχής. Στην περίπτωση αυτή η τιμή του γ μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της $\gamma_{\max}=1$.

Στην περίπτωση που η κύρια περίοδος ισχυρών βροχοπτώσεων είναι αμέσως μετά την περίοδο καλλιέργειας, το Cs-137 που ήταν συσσωρευμένο στο επιφανειακό χώμα θα έχει ενσωματωθεί στο στρώμα καλλιέργειας και μόνο το Cs-137 που αποτίθεται μέσω τη βροχής θα είναι ευαίσθητο για να απομακρυνθεί με το νερό της βροχής. Στην περίπτωση αυτή, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία (He and Walling, 1997), η τιμή του γ μπορεί να εκτιμηθεί ως το ύψος της ισχυρής βροχόπτωσης που είναι ικανή να προκαλέσει διάβρωση, προς το συνολικό ετήσιο ύψος βροχόπτωσης. Εάν υπάρχουν περισσότερες από μία περιόδους καλλιέργειας το χρόνο, η εκτίμηση του γ βασίζεται στην χρονική περίοδο των βροχοπτώσεων σε σχέση με τις αγροτικές εργασίες.

5.4.4 Εκτίμηση του βάθους χαλάρωσης (relaxation depth) H

Ο συντελεστής H, για την κατά βάθος κατανομή του αποτιθέμενου Cs-137 στο χώμα, χρησιμοποιείται στα μοντέλα μάζας-ισορροπίας και για καλλιεργημένο χώμα και στο μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης (diffusion and migration model). Υποτίθεται εκθετική κατά βάθος κατανομή του Cs-137 και αυτή η παράμετρος απεικονίζει το βάθος του χώματος που διεισδύει το νεοεισερχόμενο Cs-137. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή H, τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση του Cs-137 στο χώμα. Η τιμή του «H» είναι το βάθος μάζας (mass depth) (kg / m^2) στο οποίο η συγκέντρωση του Cs-137 μειώνεται στο $1/e$ της συγκέντρωσης του

Cs-137 στο επιφανειακό χώμα. Τα μέγεθος αυτό υπολογίζεται πειραματικά από την κατά βάθος κατανομή του Cs-137 στο χώμα (Walling and He, 1997) .

5.4.5 Εκτίμηση των συντελεστών D και V του μοντέλου διάχυσης και μετανάστευσης (diffusion and migration model)

Ο συντελεστής διάχυσης D ($kg^2 \cdot m^{-4} \cdot yr^{-1}$) και ο ρυθμός μετανάστευσης V ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) περιγράφουν την εξέλιξη της κατανομής του Cs-137, στο προφίλ χώματος, σε συνάρτηση με το χρόνο. Υψηλές τιμές αυτών των δύο συντελεστών σημαίνουν βαθύτερη διείσδυση του Cs-137 στο προφίλ χώματος. Οι δύο αυτοί συντελεστές εξαρτώνται από την κατά βάθος κατανομή του Cs-137 στο χώμα και υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις (He and Walling, 1997):

$$V = Wp / (t - 1963) \quad (44)$$

$$D = (Np - Wp)^2 / 2(t - 1963) \quad (45)$$

t : το έτος που πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία (yr)

Wp : το κατά μάζα βάθος (mass depth) της μέγιστης συγκέντρωσης Cs-137

Np : το κατά μάζα βάθος, όπου η συγκέντρωση Cs-137 μειώνεται στο 1/e της μέγιστης συγκέντρωσης Cs-137.

Τα δύο αυτά μεγέθη υπολογίζονται πειραματικά από την κατά βάθος κατανομή του Cs-137 στο χώμα, η οποία πρέπει να έχει προηγουμένως προσδιορισθεί.

6. Εκτίμηση του ρυθμού αναδιανομής του εδάφους με εφαρμογή των μοντέλων αναδιανομής του Cs-137

6.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό έγινε μία προσπάθεια εφαρμογής ορισμένων από τα μοντέλα αναδιανομής του Cs-137 στο χώμα που περιγράφηκαν στο 5^ο Κεφάλαιο για την εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του εδάφους. Η εφαρμογή αυτή έγινε με σκοπό να ελεγχθεί κατά πόσον είναι δυνατή η πραγματοποίηση μίας τέτοιας μελέτης, τι δεδομένα και μέσα χρειάζονται για να ολοκληρωθεί, και τέλος, εάν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των μοντέλων έχουν φυσική σημασία και είναι λογικά. Μετά την πραγματοποίηση των δειγματοληψιών, την ανάλυση των δειγμάτων και την εφαρμογή των μοντέλων, έγινε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, η εξαγωγή συμπερασμάτων και ο εντοπισμός των δυσκολιών και των αδυναμιών που παρουσιάζονται σε όλα τα στάδια της μελέτης.

Στα πρώτα στάδια της μελέτης που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ, εντοπίστηκαν τα δεδομένα και τα εργαλεία που είναι απαραίτητα για την εφαρμογή του πειραματικού μέρους και την εν συνεχεία εφαρμογή των μοντέλων. Έγινε επισκόπηση των υπάρχουσών μεθόδων δειγματοληψίας και των μοντέλων προσδιορισμού της αναδιανομής του χώματος. Στην συνέχεια, αξιολογήθηκαν ένα - ένα ξεχωριστά τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για να πραγματοποιηθεί η μελέτη και το κατά πόσον τα δεδομένα αυτά είναι εφικτό να ευρεθούν, ενώ έγινε και επισκόπηση των μέσων και των πόρων που απαιτούνται για την πραγματοποίηση της μελέτης και κατά πόσο είναι εφικτό αυτή να γίνει.

Αφού έγιναν τα πρώτα προκαταρκτικά στάδια διερεύνησης, επελέγη η πλέον κατάλληλη και ταυτόχρονα εφικτή μέθοδος δειγματοληψίας χώματος, καθώς και τα μοντέλα μετατροπής θα εφαρμοστούν. Με δεδομένες τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των δειγματοληψιών (π.χ. δειγματοληψίες σε περιοχές με μεγάλες κλίσεις του εδάφους) κρίθηκε ότι οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν δεν είναι οι καταλληλότερες για την πραγματοποίηση αυτής της μελέτης και έτσι έγινε ο σχεδιασμός μίας νέας μεθόδου δειγματοληψίας. Μετά από αρκετή πειραματική διερεύνηση, κατέστη δυνατόν να κατασκευαστεί δειγματολήπτης χώματος, που να

ικανοποιεί τις απαιτήσεις της απαιτούμενης δειγματοληψίας, δηλαδή να μπορεί να συλλέξει χώμα από βάθος έως και 40cm, να επιτρέπει τη λήψη δειγμάτων χώματος από διάφορα βάθη με στόχο τον προσδιορισμό της κατά βάθος κατανομής των διαφόρων ισοτόπων, να είναι εύχρηστος και ελαφρύς. Τελικά κατασκευάστηκε ο δειγματολήπτης που περιγράφεται στην § 3.5, ο οποίος φυσικά μπορεί να εξελιχθεί περαιτέρω και να βελτιωθεί.

Τα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί και έχουν εφαρμοστεί σε διάφορες μελέτες προσδιορισμού ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης ανά τον κόσμο είναι αρκετά. Χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα το ραδιοϊσότοπο μέσω του οποίου θα βρεθούν τα τελικά αποτελέσματα, την ακρίβειά τους καθώς και τους περιορισμούς τους για τα εδάφη που θα εφαρμοστούν. Στα πλαίσια της ΔΕ επελέγησαν ορισμένα από αυτά, τα αποτελέσματα των οποίων αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Η χρήση των υπόλοιπων μοντέλων κρίθηκε ότι δεν ήταν εφικτή για πρακτικούς λόγους στα πλαίσια μίας ΔΕ.

Στα πλαίσια της ΔΕ, και προκειμένου να εφαρμοσθούν τα μοντέλα χρειάστηκε να γίνουν μία σειρά από δειγματοληψίες. Η πραγματοποίηση της τελικής δειγματοληψίας, από την οποία εξάχθηκαν τα συμπεράσματα της εργασίας, έγινε αφού είχαν προηγηθεί μία σειρά από προκαταρκτικές και αναγνωριστικές εργασίες (σε μερικές από αυτές παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για λόγους πληρότητας). Οι προκαταρκτικές και αναγνωριστικές αυτές εργασίες αφορούσαν κυρίως τη μελέτη της εργονομίας του δειγματολήπτη, τη βελτίωσή του κλπ. Αφού λύθηκαν όλα τα προβλήματα που προέκυψαν και διαπιστώθηκε ότι τόσο η δειγματοληψία όσο και η συνολική μελέτη εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης είναι εφαρμόσιμη, πραγματοποιήθηκε η τελική δειγματοληψία η οποία αποτελεί και το κύριο πειραματικό μέρος της ΔΕ.

6.2 Προκαταρκτικές διερευνήσεις τεχνικών δειγματοληψίας και μοντέλων εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης

Οι μέθοδοι δειγματοληψίας που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν από τον ΕΠΤ-ΕΜΠ δεν ήταν κατάλληλες για την εν λόγω μελέτη. Σε προηγούμενες μελέτες συνήθως χρειαζόταν να συλλεχθεί επιφανειακό χώμα, βάθος 1cm, κάτι το οποίο ήταν σχετικά απλό να γίνει με μία σπάτουλα ή ένα παρόμοιο εργαλείο. Επίσης, συχνά για δειγματοληψία χώματος μεγαλύτερου πάχους (π.χ. 0-10cm), η τεχνική που χρησιμοποιείτο ήταν προσεκτικό σκάψιμο ενός λάκκου μέχρι του επιθυμητού βάθους, μία διαδικασία η οποία δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής, αφού δεν εξασφαλίζεται ότι

λαμβάνεται χρώμα από όλα τα βάθη με την ίδια αναλογία. Η χρήση μηχανοκίνητου τρυπανιού χρώματος που επίσης έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν απορρίφθηκε στα πλαίσια της μελέτης αυτής, ως δύσχρηστη λύση, η οποία επιπλέον απαιτεί παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από γεννήτρια. Επιπλέον παρουσιάζει δυσκολίες σε έδαφος με σημαντική κλίση, όπου είναι και το ενδιαφέρον της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Αφού εξετάσθηκαν διάφορες ιδέες και μέθοδοι δειγματοληψίας τελικά αποφασίστηκε η κατασκευή ενός δειγματολήπτη, για τον σχεδιασμό του οποίου συνδυάστηκαν στοιχεία από κατασκευές που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία και από βιντεοσκοπήσεις διάφορων δειγματοληψιών από επιστημονικές ιστοσελίδες στο διαδίκτυο. Η κατασκευή και λειτουργία της συσκευής δειγματοληψίας αναλύεται στην § 3.5.

Όπως περιγράφεται και στο 5^ο Κεφάλαιο, τα μοντέλα εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του εδάφους είναι πολλά. Στα πλαίσια της ΔΕ εφαρμόστηκαν όσα ήταν εφικτά, από πρακτικής άποψης. Τα ραδιοϊσότοπα που χρησιμοποιούνται για αυτές τις μελέτες είναι τρία, το Cs-137, το Be-7 και ο Pb-210. Τα μοντέλα που υπάρχουν για το Be-7 είναι ελάχιστα και η εφαρμογή τους είναι πολύ δύσκολη, καθώς το Be-7 έχει πολύ μικρό χρόνο ημιζωής (53.12 μέρες) και η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για βραχυχρόνιες μελέτες (§ 5.2.2.3). Έτσι, αυτά τα μοντέλα δεν εφαρμόστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Τα μοντέλα που υπάρχουν για το Pb-210 είναι παρόμοια με τα μοντέλα του Cs-137 και χρησιμοποιούνται για μακροχρόνιες μελέτες (§ 5.2.2.2). Στα πλαίσια της ΔΕ χρησιμοποιήθηκαν μόνο μοντέλα του Cs-137.

Όσον αφορά στο πεδίο εφαρμογής τους, τα μοντέλα του Cs-137 διαιρούνται σε δύο κατηγορίες, σε αυτά που είναι κατάλληλα για ακαλλιέργητα εδάφη και σε αυτά που είναι κατάλληλα για καλλιεργημένα. Η εφαρμογή των μοντέλων για καλλιεργημένα χρώματα στα πλαίσια της ΔΕ δεν ήταν δυνατή για διάφορους λόγους. Τα μοντέλα αυτά, ιδίως τα πιο ακριβή, απαιτούν μία πληθώρα δεδομένων για τις αγροτικές εργασίες στην περιοχή της μελέτης, τα οποία ορισμένες φορές είναι αδύνατο να βρεθούν. Ειδικότερα απαιτείται να είναι γνωστό το ιστορικό των γεωργικών εργασιών στην περιοχή, καθώς επίσης και μετεωρολογικές πληροφορίες που δεν είναι πάντα διαθέσιμες. Τέλος, δεν πρέπει να παραβλέπεται ότι στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπάρχει και σχετική άδεια από τον ιδιοκτήτη της περιοχής, κάτι που δεν είναι πάντα εύκολο.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, στα πλαίσια της ΔΕ αποφασίστηκε να εφαρμοστούν τα μοντέλα του Cs-137 σε ακαλλιέργητες περιοχές, καθώς είναι απλούστερα και απαιτούν λιγότερες παραμέτρους, οι οποίες μπορούν να βρεθούν ή

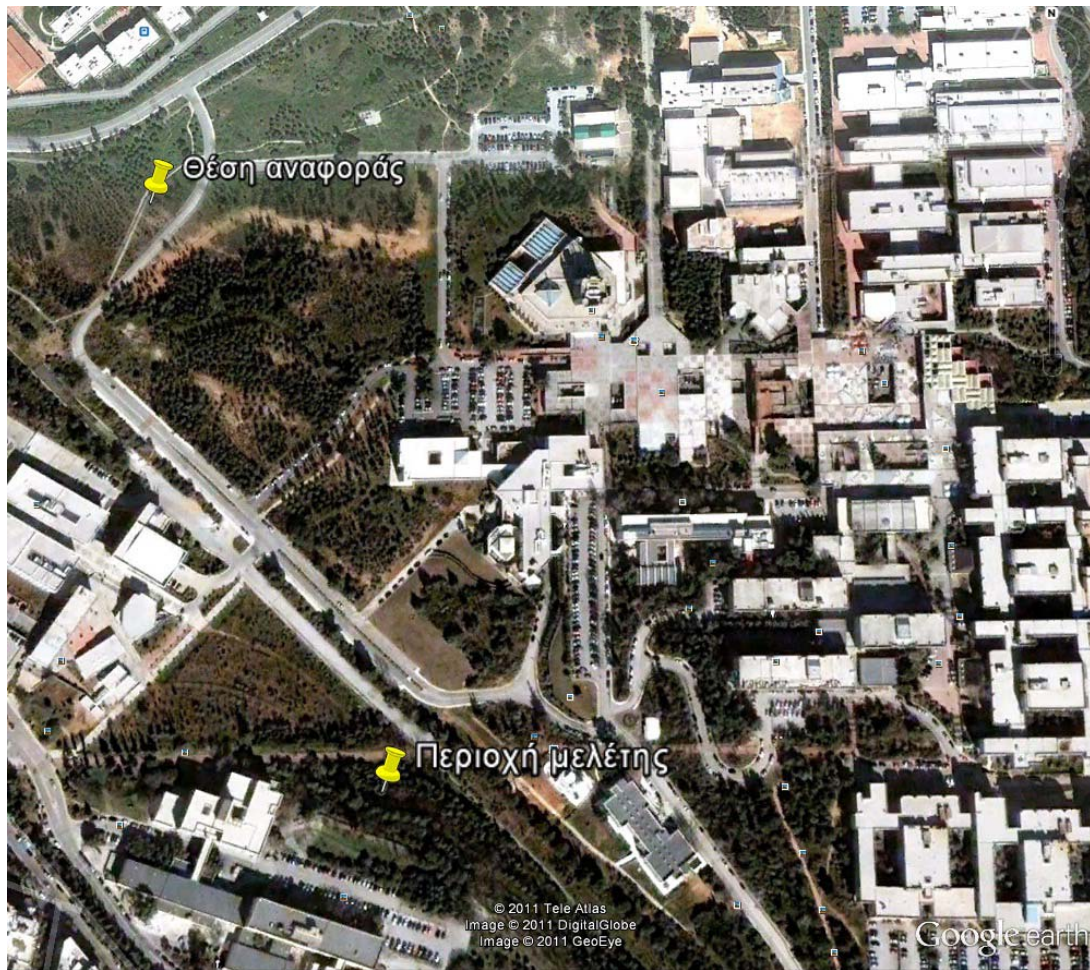
να εκτιμηθούν με σχετική ευκολία. Στην βιβλιογραφία βρέθηκαν τρία τέτοια μοντέλα, τα οποία διαφέρουν ως προς την ακρίβειά τους και τα δεδομένα που απαιτούνται για την εφαρμογή τους (§ 5.2.2). Στην παρούσα ΔΕ εφαρμόστηκαν και τα τρία μοντέλα από τα οποία προέκυψαν αποτελέσματα και συμπεράσματα που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

6.3 Δοκιμαστική εφαρμογή των μοντέλων υπολογισμού στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αρχικά έγινε δοκιμή του εργαλείου που είχε κατασκευαστεί (§ 3.5) για να αξιολογηθεί η εργονομία του και τα πιθανά εμπόδια που θα αντιμετώπιζονταν. Οι αρχικές δειγματοληψίες έγιναν έξω από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, στις χωμάτινες εκτάσεις που υπάρχουν. Η κατασκευή ήταν πολύ λειτουργική, καθώς εισχωρούσε αρκετά εύκολα μέσα στο χώμα, ειδικά στα αρχικά εκατοστά που το χώμα δεν ήταν πετρώδες. Επίσης η εξαγωγή της ήταν αρκετά εύκολη και γρήγορη με την βοήθεια ενός σφυριού και ενός καλεμιού, όπως και η κοπή του δείγματος σε επιμέρους κομμάτια για ανάλυση της κατά βάθος κατανομής του Cs-137. Γενικά το στάδιο της δοκιμής της κατασκευής στέφθηκε με επιτυχία και έτσι ακολούθησε το επόμενο στάδιο, που ήταν η πλήρης εφαρμογή των μοντέλων για δείγματα στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, για να διαπιστωθεί αν λείπουν δεδομένα, αν εφαρμόζονται χωρίς εμπόδια τα μοντέλα και αν προκύπτουν λογικά αποτελέσματα.

6.3.1 Δειγματοληψία θέσης αναφοράς

Πρώτον, επιλέχτηκε μία επίπεδη τοποθεσία για θέση αναφοράς (Σχ. 6.1), όπου συλλέχθηκαν δείγματα προκειμένου να υπολογιστεί η κατά βάθος κατανομή του Cs-137 αλλά και η συνολική του συγκέντρωση A_{ref} (Bq/m²). Συλλέχτηκε ένα δείγμα, το οποίο χωρίστηκε σε 6 τμήματα. Ο διαχωρισμός έγινε με κοπή του δείγματος ανά συγκεκριμένα επιθυμητά βάθη, οπότε το κάθε κομμάτι είχε συγκεκριμένο εύρος βάθους (π.χ 2-4cm).



Σχήμα 6.1 Οι περιοχές της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, όπου έγιναν οι δειγματοληψίες

Στην συνέχεια έγινε προετοιμασία των δειγμάτων και ανάλυσή τους, με τον τρόπο που αναφέρεται στις § 4.3.2, 4.4.3. Για το κάθε δείγμα έγιναν τα εξής:

- Έγινε ξήρανση και κοσκίνισμα του δείγματος και αφαιρέθηκε το τμήμα με διάμετρο κόκκου $> 2\text{mm}$
- Ζυγίστηκε το τμήμα του δείγματος που κοσκινίστηκε ($M_{<2,AD}$)
- Μετρήθηκε η υγρασία του (h)
- Κατεγράφη το εύρος του βάθους του (t)
- Κατεγράφη η μέση τιμή του εύρους βάθους του (z)
- Υπολογίστηκε ο όγκος του κάθε δείγματος $V(\text{cm}^3)$, από τις διαστάσεις της συσκευής δειγματοληψίας
- Υπολογίστηκε η ξηρή του μάζα ($M_{<2,AD}$)
- Υπολογίστηκε η πυκνότητα του χώματος ($D_{b<2}$)

- Υπολογίστηκε το κατά μάζα βάθος (x), το οποίο είναι ανηγμένο μέγεθος του βάθους

Οι υπολογισμοί για κάθε δείγμα έγιναν ως εξής:

- Υπολογισμός ξηρής μάζας: $M_{<2,AD}(g) = M_{<2,AD}'(g) \cdot (1-h)$ (1)

- Υπολογισμός πυκνότητας του χώματος: $D_{b<2}(g/cm^3) = M_{<2,AD}(g) / V(cm^3)$ (2)

- Υπολογισμός κατά μάζας βάθους: $x(g/cm^2) = \int_0^z (D_{b<2}) \cdot dz$ (3)

Από κάθε δείγμα που συλλέχθηκε στο πεδίο, συσκευάστηκε ένα δείγμα τυποποιημένης γεωμετρίας για γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Στα δείγματα τυποποιημένης γεωμετρίας αποδόθηκαν κωδικοί MS σύμφωνα με το σχήμα κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και τα στοιχεία τους καταγράφηκαν στην αρχειοθήκη δειγμάτων. Συγκεκριμένα, για κάθε δείγμα έγιναν οι ακόλουθες ενέργειες (§ 4.3.2) :

- Ζυγίστηκε (m')
- Μετρήθηκε η υγρασία του (h)
- Υπολογίστηκε η ξηρή του μάζα (m)

Οι υπολογισμοί έγιναν ως εξής:

- Υπολογισμός ξηρής μάζας: $m(g) = m'(g) \cdot (1-h)$ (4)

Μετά την γ-φασματοσκοπική ανάλυση, για κάθε δείγμα έγιναν τα εξής:

- Καταγραφή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας S (specific activity) του Cs-137 (Bq/kg) και του τυχαίου σφάλματος σ_s (Bq/kg)
- Μετατροπή της ειδικής ραδιενέργειας S (specific activity) του Cs-137 (Bq/kg), σε επιφανειακή πυκνότητα ραδιενέργειας E (areal activity) (Bq/m^2)
- Υπολογισμός της συγκέντρωσης Cs-137 στην θέση αναφοράς (A_{ref}) (Bq/m^2)

Ο υπολογισμός της E (Bq/m^2) έγινε ως εξής:

- $E(Bq/m^2) = [S(Bq/kg) \cdot D_{b<2}(kg/m^3) \cdot t(m)]$ (5)

Ο υπολογισμός της A_{ref} (Bq / m^2) έγινε προσθέτοντας όλες τις συγκεντρώσεις Cs-137 (Bq / m^2) για κάθε βάθος:

$$\text{➤ } A_{ref} (Bq / m^2) = E_1 + E_2 + \dots + E_n (Bq / m^2) \quad (6)$$

Πρέπει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο, ότι κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε όλα τα δείγματα, λήφθηκε ως αβεβαιότητα μόνο αυτή που προέκυψε από την ανάλυση του φάσματος, η οποία είναι η κυριότερη συνιστώσα, και όχι οι αβεβαιότητες λόγω του ζυγίσματος, της μέτρησης υγρασίας, του κοσκινίσματος κτλ. Αυτό έγινε λόγω του χαρακτήρα του πειραματικού μέρους της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, που ήταν να γίνει εφαρμογή των μοντέλων για να διαπιστωθεί κατά πόσο προκύπτουν λογικά αποτελέσματα. Και επιπλέον να γίνει μία εκτίμηση των ρυθμών διάβρωσης/ιζηματογένεσης και σύγκριση των τιμών τους, ανάλογα τα μοντέλα που εφαρμόζονται. Οπότε, το ζητούμενο δεν ήταν η μεγάλη ακρίβεια των μετρήσεων, καθώς ο σκοπός ήταν να παρατηρηθεί η γενική συμπεριφορά και να εξαχθούν συμπεράσματα για τα μοντέλα υπολογισμού και όχι να υπολογιστούν οι ρυθμοί αναδιανομής του χώματος με τη μέγιστη ακρίβεια.

Τα αποτελέσματα για όλα τα δείγματα, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (6.1-6.4):

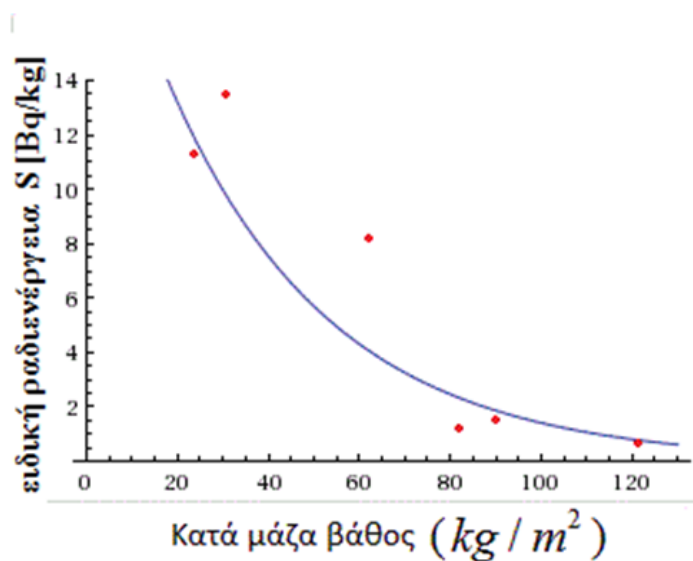
- Στον πίνακα 6.1, παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα δείγματα χώματος που συλλέχτηκαν
- Στον πίνακα 6.2, παρουσιάζονται τα δεδομένα για τα δείγματα που ετοιμάστηκαν στο εργαστήριο (κωδικοποίηση MSnnn)
- Στον πίνακα 6.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των δειγμάτων (συγκέντρωση ραδιενέργειας Cs-137 (S) (Bq/kg)) και τα αποτελέσματα της μετατροπής της συγκέντρωσης ραδιενέργειας (S) σε επιφανειακή πυκνότητα ραδιενέργειας (E) (Bq / m^2)
- Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζεται η κατά βάθος κατανομή του Cs-137 στο χώμα και στην συνέχεια παρουσιάζεται και η γραφική του απεικόνιση η οποία έγινε μέσω του online προγράμματος Wolfram Alpha (Σχ. 6.2). Η συνάρτηση κατανομής είναι $y = 23.086 \cdot e^{-0.028x}$ και το $RMS=0.784$.

Πίνακας 6.1 – Δείγματα χόματος που συλλέχθηκαν κατά βάθος, στην θέση αναφοράς στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου							
A/A	Βάθος (cm)	t (cm)	V (cm ³)	$M_{<2,AD}$ (g)	h (%)	$M_{<2,AD}$ (g)	$D_{b<2}$ (g/cm ³)
1	0-1	1	45.5	107.5	2.5%	104.9	2.3
2	1-3	2	91.0	146.5	2.0%	143.7	1.6
3	3-5	2	91.0	192.3	2.0%	188.6	2.1
4	5-7	2	91.0	140.9	2.5%	137.5	1.5
5	7-11	4	181.9	126.8	1.8%	124.5	0.7
6	11-15	4	181.9	173.1	2.0%	169.6	0.9

Πίνακας 6.2 - Δείγματα χόματος που προετοιμάστηκαν για ανάλυση (Κωδικοποίηση MSnnn) στην θέση αναφοράς					
A/A	Δείγμα	Βάθος (cm)	m' (g)	h (%)	m (g)
1	MS592	0-1	98.1	2.5%	95.6
2	MS593	1-3	94.6	2.0%	92.7
3	MS594	3-5	96.4	2.0%	94.5
4	MS595	5-7	108.9	2.5%	106.2
5	MS596	7-11	113.9	1.8%	111.8
6	MS597	11-15	110.1	2.0%	107.9

Πίνακας 6.3 - Συγκέντρωση Cs-137 στα δείγματα στην θέση αναφοράς						
A/A	Δείγμα	Βάθος (cm)	S (Bq/kg)	σ_S (Bq/kg)	E (Bq/m ²)	σ_E (Bq/m ²)
1	MS592	0-1	11.3	0.7	261	15
2	MS593	1-3	13.5	0.7	427	22
3	MS594	3-5	8.3	0.7	346	27
4	MS595	5-7	1.5	0.4	45	11
5	MS596	7-11	1.2	0.2	34	6
6	MS597	11-15	0.6	0.2	23	7
A_{ref} (Bq/m ²)					1135	41

Πίνακας 6.4 - Συγκέντρωση Cs-137 συναρτήσει του βάθους						
A/A	Δείγμα	Βάθος (cm)	z(cm)	x (kg / m^2)	S(Bq / kg)	$\sigma_s(Bq / kg)$
1	MS592	0-1	0.5	24.1	11.3	0.7
2	MS593	1-3	2	31.6	13.5	0.7
3	MS594	3-5	4	61.6	8.3	0.7
4	MS595	5-7	6	82.9	1.5	0.4
5	MS596	7-11	9	90.7	1.2	0.2
6	MS597	11-15	13	121.2	0.6	0.2



Σχήμα 6.2 Γραφική παράσταση της κατά βάθος κατανομής του Cs-137 στην θέση αναφοράς στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

6.3.2 Δειγματοληψία περιοχής προς μελέτη

Στη συνέχεια, έπρεπε να επιλεγεί μία περιοχή στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, για να γίνει μελέτη της διάβρωσης. Ο κύριος στόχος ήταν να διαπιστωθεί, κατά πόσο είναι δυνατή η εφαρμογή των μοντέλων υπολογισμού (κεφ. 5) και αν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την εφαρμογή τους θα είναι λογικά. Σε αυτό το στάδιο, δεν μας ενδιέφερε η εξαγωγή συμπερασμάτων για την διάβρωση του εδάφους. Τελικά, επιλέχτηκε μία δασώδης περιοχή υπό κλίση, στην οποία υπήρχαν εμφανή σημεία διάβρωσης (Σχ. 6.1). Από εκεί πραγματοποιήθηκε η συλλογή 3 τυχαίων δειγμάτων. Στην συνέχεια έγινε προετοιμασία των δειγμάτων και ανάλυσή τους, με τον τρόπο που αναφέρεται στις παραγράφους 4.3.2, 4.4.3. Η διαφοροποίηση σε σχέση με την διαδικασία της § 7.3.1 είναι ότι για τα δείγματα της περιοχής προς μελέτη δεν υπολογίστηκε η κατά βάθος κατανομή του Cs-137, καθώς δεν χρειάζεται για την εφαρμογή των μοντέλων.

Τα αποτελέσματα για όλα τα δείγματα, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (6.5-6.7):

- Στον πίνακα 6.5, παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα δείγματα χώματος που συλλέχθηκαν
- Στον πίνακα 6.6, παρουσιάζονται τα δεδομένα για τα δείγματα που ετοιμάστηκαν στο εργαστήριο (κωδικοποίηση MSnnn)
- Στον πίνακα 6.7, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των δειγμάτων (συγκέντρωση ραδιενέργειας Cs-137 (S) (Bq/kg)) και τα αποτελέσματα της μετατροπής της συγκέντρωσης ραδιενέργειας (S) σε επιφανειακή πυκνότητα ραδιενέργειας (A) (Bq / m^2).

Πίνακας 6.5 – Δείγματα χώματος που συλλέχθηκαν κατά βάθος, στην περιοχή προς μελέτη στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου							
A/A	Βάθος (cm)	t (cm)	V (cm^3)	$M_{<2,AD}$ (g)	h (%)	$M_{<2,AD}$ (g)	$D_{<2}$ (g / cm^3)
#1	0-20	20	909.7	427.6	2.3%	417.8	0.5
#2	0-20	20	909.7	501.5	2.4%	489.5	0.5
#3	0-20	20	909.7	641.3	2.8%	623.4	0.7

Πίνακας 6.6 - Δείγματα χώματος που προετοιμάστηκαν για ανάλυση (Κωδικοποίηση MSnnn) στην περιοχή προς μελέτη					
A/A	Δείγμα	Βάθος (cm)	m' (g)	h (%)	m (g)
#1	MS604	0-20	427.6	2.3%	417.8
#2	MS605	0-20	418.7	2.4%	408.7
#3	MS606	0-20	427.5	2.8%	415.5

Πίνακας 6.7 - Συγκέντρωση Cs-137 στα δείγματα στην περιοχή προς μελέτη						
A/A	Δείγμα	Βάθος (cm)	S (Bq / kg)	σ_S (Bq / kg)	A (Bq / m^2)	σ_A (Bq / m^2)
#1	MS604	0-20	2.3	0.1	209	13
#2	MS605	0-20	7.7	0.2	826	22
#3	MS606	0-20	4.7	0.3	647	37

6.3.3 Εφαρμογή των μοντέλων υπολογισμού αναδιανομής χρώματος

6.3.3.1 1^ο Μοντέλο υπολογισμού – Εμπειρικό μοντέλο

Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του μοντέλου σε κάθε δείγμα είναι η εξής (§ 5.2.2.1):

$$Y = 7.74(1.09^X) \quad (t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}) \quad (11)$$

- Y: Ο ρυθμός διάβρωσης του εδάφους ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$)
- A_{ref} : είναι η συγκέντρωση του Cs-137 στην θέση αναφοράς (Bq / m^2)
- A: είναι η μετρούμενη συγκέντρωση του Cs-137 στο σημείο δειγματοληψίας (Bq / m^2)

$$➤ X = \left[\frac{A_{ref} - A}{A_{ref}} \right] \cdot 100\% \quad (12)$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των σχέσεων στα δείγματα είναι τα εξής (Πιν. 6.8):

Πίνακας 6.8 – Αποτελέσματα ρυθμών αναδιανομής 1 ^{ου} μοντέλου							
A/A	A (Bq / m^2)	σ_A (Bq / m^2)	$A_{ref} - A$ (Bq / m^2)	$\sigma_{A_{ref} - A}$ (Bq / m^2)	X	σ_X	Y ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$)
#1	209	13	926	42	0.82	0.05	8.3
#2	826	22	310	45	0.27	0.04	7.9
#3	647	37	489	54	0.43	0.05	8.0

6.3.3.2 2^ο Μοντέλο υπολογισμού – Μοντέλο κατανομής-προφίλ

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου σε κάθε δείγμα είναι οι εξής (§ 5.2.2.2.1):

$$Y = -\frac{10}{t-1963} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{X}{100} \right) \right] \cdot h_0 \quad (13)$$

- Y: Ο ρυθμός διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του εδάφους ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$)

$$\text{➤ Εάν } A_{ref} > A \text{ (διάβρωση), τότε } X = \left[\frac{A_{ref} - A}{A_{ref}} \right] \cdot 100\% \quad (14)$$

$$\text{➤ Εάν } A_{ref} < A \text{ (ιζηματογένεση), τότε } X = \left[\frac{A - A_{ref}}{A_{ref}} \right] \cdot 100\% \quad (15)$$

➤ t: το έτος της δειγματοληψίας (yr)

➤ h_0 (kg / m^2): Υπολογίστηκε από την εκθετική συνάρτηση της κατά βάθος κατανομής του Cs-137, που είναι:

$$A(x) = ae^{-\frac{x}{h_0}} \quad (16)$$

➤ Η συνάρτηση κατανομής του Cs- 137, είχε ήδη βρεθεί και είναι:

$$y = 23.086 \cdot e^{-0.028x}$$

➤ Οπότε $h_0 = 35.7 \pm 1.8 \text{ kg} / m^2$ (17)

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των εξισώσεων στα δείγματα μας είναι τα εξής (Πιν. 6.9):

Πίνακας 6.9 – Αποτελέσματα ρυθμών αναδιανομής 2 ^{ου} μοντέλου							
A/A	A (Bq / m^2)	σ_A (Bq / m^2)	$A_{ref} - A$ (Bq / m^2)	$\sigma_{A_{ref} - A}$ (Bq / m^2)	X	σ_X	Y ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$)
#1	209	13	926	42	0.82	0.05	12.6
#2	826	22	310	45	0.27	0.04	2.4
#3	647	37	489	54	0.43	0.05	4.2

6.3.3.3 3^ο Μοντέλο υπολογισμού – Μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου σε κάθε δείγμα ήταν οι εξής (§ 5.2.2.2.2):

Για $A_{ref} > A$ (διάβρωση) τότε ο ρυθμός διάβρωσης R ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) υπολογίστηκε από το σύστημα των 2 εξισώσεων:

$$\bullet C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' \quad (18)$$

$$\bullet \int_0^t P \cdot R \cdot C_u(t') \cdot e^{-\lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' = A_{ref} - A \quad (19)$$

Για $A_{ref} < A$ (ιζηματογένεση), τότε ο ρυθμός διάβρωσης R' ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) υπολογίστηκε από το σύστημα των 2 εξισώσεων:

$$\bullet C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R'/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')} dt' \quad (20)$$

$$\bullet \int_0^t P' \cdot R' \cdot C_u(t') \cdot e^{-\lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' = A - A_{ref} \quad (21)$$

- P, P' : Ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους κόκκων χόματος (§ 5.4.1)
- λ : Σταθερά ραδιενεργής διάσπασης για το Cs-137 (yr^{-1})
- $I(t)$: Ροή απόθεσης Cs-137 (deposition flux) την χρονική στιγμή t ($Bq \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) (§ 5.4.2)
- t : Ο χρόνος που πέρασε από την στιγμή της πρώτης επιφανειακής απόθεσης, μέχρι την στιγμή της δειγματοληψίας (yr)
- D ($kg^2 \cdot m^{-4} \cdot yr^{-1}$): ο συντελεστής διάχυσης (§ 5.4.5)
- Np (kg / m^2): Το κατά μάζα βάθος (x) της μέγιστης συγκέντρωσης Cs-137 (Bq/kg) (§ 5.4.5)
- V ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$): ο ρυθμός καθοδικής μετανάστευσης του Cs-137 (Bq/kg) στο προφίλ χόματος (§ 5.4.5)
- Np (kg / m^2): Το κατά μάζα βάθος (x), όπου η συγκέντρωση Cs-137 (Bq/kg) μειώνεται στο $1/e$ της μέγιστης συγκέντρωσης Cs-137 (Bq/kg) (§ 5.4.5)

- H (kg / m^2): Το βάθος χαλάρωσης (relaxation depth) και είναι το κατά μάζα βάθος στο οποίο η συγκέντρωση του Cs-137 (Bq/kg), μειώνεται στο 1/e της συγκέντρωσής του στο επιφανειακό χώμα (§ 5.4.4)

Οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης ήταν οι εξής:

- $t=2011-1954=57$ yr
- $\lambda=0.02297 \text{ yr}^{-1}$, που είναι σταθερό και γνωστό μέγεθος
- P, P' : Θεωρήθηκαν ίσοι με την μονάδα, καθώς δεν υπήρχαν δεδομένα για τους κόκκους χώματος

$$\text{➤ } I(t) = \frac{A_{ref}}{A_n} \cdot I_n(t) \quad (22)$$

$$\text{Οπου } A_n = \int_{1954}^{2011} I_n(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} dt' \quad (23)$$

- A_{ref} : Η συγκέντρωση Cs-137 στην θέση αναφοράς (Bq / m^2)
 - $I_n(t)$: Στην βηματική αυτή συνάρτηση χρησιμοποιούνται οι τιμές του Πίνακα 5.1 – Κεφ. 5. Σε αυτήν την τιμή δεν συνυπολογίζεται το Cs-137 που έχει αποθεθεί λόγω του Chernobyl. Στην δοκιμαστική δειγματοληψία δεν προστέθηκε το ποσό λόγω Chernobyl, καθώς μας ενδιέφερε μόνο η απλή εφαρμογή του μοντέλου.
 - A_n : Η αντιπροσωπευτική τιμή της συγκέντρωσης Cs-137 το 2011 στο βόρειο ημισφαίριο (§ 5.4.2). Υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης (23), και είναι $1699 \text{ Bq} / m^2$. Σε αυτές τις τιμές δεν προστέθηκε το Cs-137 λόγω Chernobyl, για τους προαναφερθέντες λόγους.
- W_p : Υπολογίστηκε από την συνάρτηση κατανομής Cs-137 ($y = 23.086 \cdot e^{-0.028x}$), λύνοντας ως προς x , όπου y είναι η μέγιστη συγκέντρωση Cs-137 (Bq/kg)

➤ Np: Υπολογίστηκε από την συνάρτηση κατανομής Cs-137 ($y = 23.086 \cdot e^{-0.028x}$), λύνοντας ως προς x, όπου y είναι το 1/e της μέγιστης συγκέντρωσης Cs-137 (Bq/kg)

➤ H: Υπολογίστηκε από την συνάρτηση κατανομής Cs-137 ($y = 23.086 \cdot e^{-0.028x}$), λύνοντας ως προς x, όπου y είναι το 1/e της συγκέντρωσης Cs-137 (Bq/kg) στο επιφανειακό χόμα (0-2 cm)

$$➤ D = \frac{(Np - Wp)^2}{2(t - 1963)} \quad (24)$$

$$➤ V = \frac{Wp}{(t - 1963)} \quad (25)$$

Οι τιμές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πιν. 7.10):

Πίνακας 7.10 – Παράμετροι του 3 ^{ου} μοντέλου υπολογισμού							
t(yr)	λ	P	Np (kg / m ²)	Wp (kg / m ²)	H (kg / m ²)	D (kg ² · m ⁻⁴ · yr ⁻¹)	V (kg · m ⁻² · yr ⁻¹)
57	0.023	1	61.9	28.8	71.4	11.4	0.6

Ο υπολογισμός του R έγινε μέσω επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων (18), (19) ως εξής:

$$C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + e^{-R/H} \cdot \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} \cdot dt' \quad (26)$$

$$\text{Θέτουμε } A(t) = \frac{I(t)}{H} \quad (27)$$

$$\text{και } B(t) = \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} \cdot dt' \quad (28)$$

$$\text{Θέτουμε } a = \frac{V^2}{4D} + \lambda \quad (29)$$

$$\text{και } \beta = \pi \cdot D \quad (30)$$

Οπότε η (26) μετετράπη στην μορφή $B(t) = \sum_{x=0}^{x=t-2} \int_x^{x+1} \frac{I(t') \cdot e^{(-a(t-t'))}}{\sqrt{\beta \cdot (t-t')}} \cdot dt$ (31)

Επειδή το I(t) είναι βηματική συνάρτηση (§ 5.4.2) η (29) για $t > 1$ έγινε ως εξής:

$$B(t) = \sum_{x=0}^{x=t-2} I(x+1) \cdot \int_x^{x+1} \frac{e^{(-a(t-t'))}}{\sqrt{\beta \cdot (t-t')}} \cdot dt \quad (32)$$

Θέτουμε $C(t, x) = \int_x^{x+1} \frac{e^{(-a(t-t'))}}{\sqrt{\beta \cdot (t-t')}} \cdot dt$ (33)

Μέσω του online πακέτου Wolfram Alpha υπολογίστηκε το ολοκλήρωμα (31):

$$C(t, x) = \left[-\frac{\sqrt{\pi \cdot (t-u)} \cdot \text{erf}(\sqrt{a \cdot (t-u)})}{\sqrt{a \cdot \beta \cdot (t-u)}} \right]_{u=x}^{u=x+1} \quad (34)$$

Αφού υπολογίστηκε η εξίσωση (32) σε συνδυασμό με τις (33), (34), μέσω του Excel προέκυψε το B(t).

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (19), (26), (27), (33) προέκυψε

$$P \cdot R \int_0^t \left(A(t') + e^{-\frac{R}{H}} \cdot B(t') \right) \cdot e^{(-\lambda(t-t'))} \cdot dt' = A_{ref} - A \quad (35)$$

Μετά την επίλυση του ολοκληρώματος προέκυψε η εξίσωση της μορφής:

$$P \cdot R \cdot \left(C + D \cdot e^{-\frac{R}{H}} \right) = A - A_{ref} \quad (36)$$

όπου C, D σταθεροί αριθμοί

Η εξίσωση επιλύθηκε αριθμητικά μέσω του online πακέτου Wolfram Alpha, για να υπολογιστεί το R ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) το οποίο μετετράπη σε Y ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$) και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.11:

Πίνακας 6.11 – Αποτελέσματα ρυθμών αναδιανομής 3 ^{ου} μοντέλου							
A/ A	A (Bq/m ²)	σ_A (Bq/m ²)	$A_{ref} - A$ (Bq/m ²)	$\sigma_{A_{ref}-A}$ (Bq/m ²)	X	σ_X	Y (t·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)
#1	209	13	926	42	0.82	0.05	7.8
#2	826	22	310	45	0.27	0.04	2.6
#3	647	37	489	54	0.43	0.05	4.1

6.3.3.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 3 μοντέλων

Συνοπτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των 3 μοντέλων είναι τα εξής (Πιν. 6.12):

Πίνακας 6.12 – Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 3 μοντέλων						
A/A	A (Bq/m ²)	Κατάσταση	X	1 ^ο μοντέλο Y (t·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)	2 ^ο μοντέλο Y (t·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)	3 ^ο μοντέλο Y (t·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)
#1	209	Διάβρωση	0.85	8.3	14.3	8.1
#2	826	Διάβρωση	0.42	8.0	4.0	4.0
#3	647	Διάβρωση	0.55	8.1	5.9	5.1

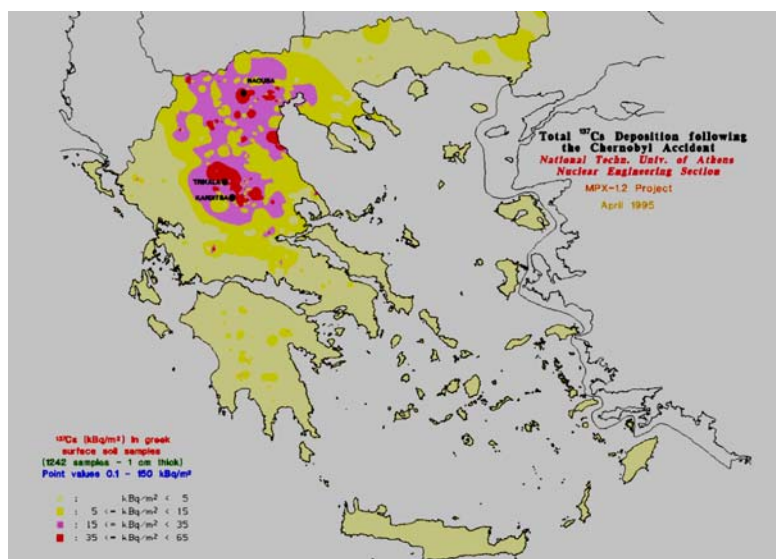
6.3.3.5 Συμπεράσματα

Τα μοντέλα εφαρμόστηκαν με επιτυχία στην δοκιμαστική εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε για δείγματα της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου και τα αποτελέσματα βρίσκονταν σε λογικά πλαίσια, σε σχέση με άλλες μελέτες. Η επίδραση της απόθεσης Cs-137 λόγω του Chernobyl δεν εξετάστηκε σε αυτήν την εφαρμογή, καθώς ο στόχος ήταν η απλή εφαρμογή του μοντέλου και να διαπιστωθεί αν υπάρχει έλλειψη δεδομένων. Το επόμενο στάδιο, ήταν η πραγματοποίηση της μελέτης σε περιοχή όπου υπάρχουν εμφανή δείγματα επιφανειακής διάβρωσης.

6.4 Συνέχιση της μελέτης σε περιοχή με εμφανή δείγματα σοβαρής διάβρωσης του εδάφους

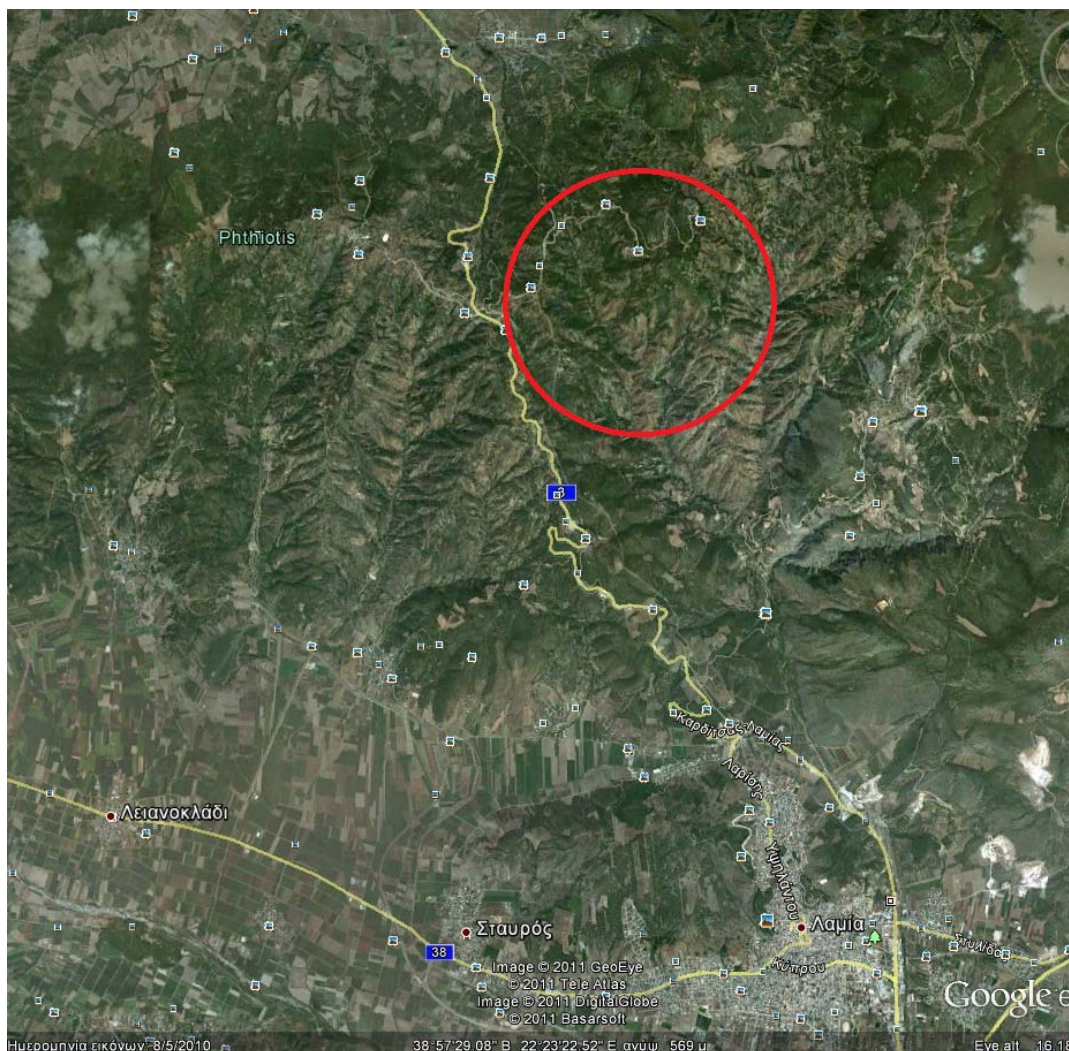
6.4.1 Εισαγωγή

Μετά την πραγματοποίηση της δοκιμαστικής δειγματοληψίας, έγινε και η τελική δειγματοληψία. Αρχικά έγινε η επιλογή της περιοχής δειγματοληψίας. Αυτή η περιοχή έπρεπε να πληροί ορισμένες βασικές προϋποθέσεις, για να είναι κατάλληλη για της δειγματοληψία της μελέτης. Έπρεπε να είναι μία περιοχή σχετικά κοντά στην Αθήνα, για να μπορεί να πραγματοποιηθεί μία αυθημερόν επίσκεψη για δειγματοληψία. Επιπλέον, ήταν αναγκαίο να είναι μία περιοχή με χαμηλή βλάστηση, για να τηρούνται οι προϋποθέσεις για την θέση αναφοράς (§ 2.3.1). Ακόμα, η περιοχή έπρεπε να ορεινή, ώστε να υπάρχουν εκτάσεις υπό κλίση, όπου θα γίνει η μελέτη για διάβρωση. Ενώ προτείνεται η περιοχή που θα μελετηθεί και στην οποία θα εφαρμοστούν τα μοντέλα υπολογισμού της αναδιανομής του χώματος, να έχει απόθεση Cs-137 λόγω Chernobyl μεγαλύτερη από $5 \text{ kBq}/\text{m}^2$ (De Roo, 1991, Kachanoski, 1987). Γι' αυτό τον λόγο εξετάστηκαν μέσω του σχήματος 6.2 οι περιοχές της Ελλάδας που έχουν απόθεση Cs-137, λόγω Chernobyl, μεγαλύτερη από $5 \text{ kBq}/\text{m}^2$. Μία πρώτη επιλογή ήταν ορισμένες περιοχές τις Πελοποννήσου, όμως τα σημεία του χάρτη με συγκέντρωση μεγαλύτερη από $5 \text{ kBq}/\text{m}^2$ ήταν διάσπαρτα και δεν ήταν όλα ορεινά. Έτσι, καταλληλότερη επιλογή θεωρήθηκε μία περιοχή του νομού Φθιώτιδας, βόρεια της Λαμίας, όπου σχεδόν όλες οι περιοχές, ήταν ημιορεινές ή ορεινές και η συγκέντρωση Cs-137, λόγω του Chernobyl ήταν μεγαλύτερη από $5 \text{ kBq}/\text{m}^2$.



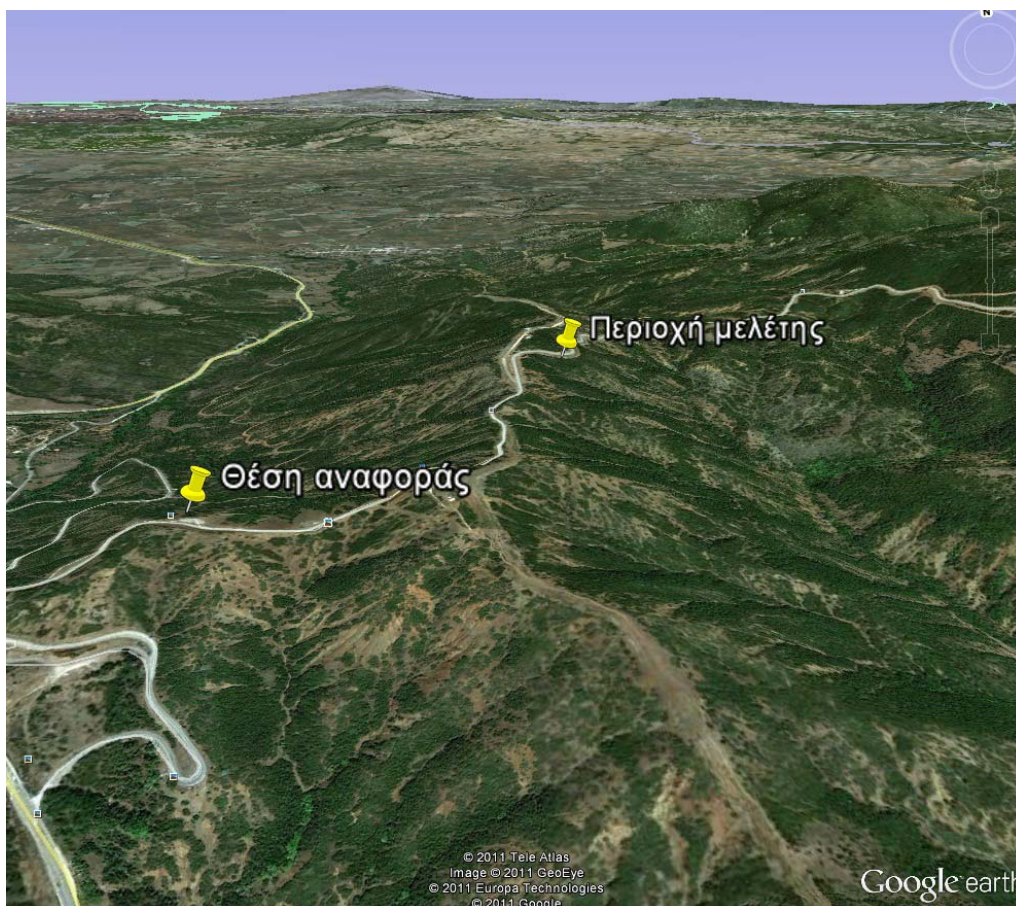
Σχήμα 6.3 Η επιφανειακή απόθεση Cs-137, λόγω Τσερνομπίλ, στην Ελλάδα

Στη συνέχεια μέσω του Google Earth έγινε μία διερεύνηση της περιοχής, ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη θέση για δειγματοληψία. Η ευρύτερη περιοχή που μελετήθηκε μέσω του Google Earth ήταν η θέση Δραχμάναγας του νομού Φθιώτιδας (Σχ. 6.4).



Σχήμα 6.4 Η ευρύτερη περιοχή, του Δραχμάναγα Λαμίας

Μετά από αρκετή επισκόπηση, βρέθηκε ένα τμήμα του Σχήματος 6.4, το οποίο έχει επισημανθεί, στο οποίο υπήρχε εμφανής διάβρωση. Αυτό το τμήμα φαίνεται σε μεγέθυνση στο Σχήμα 6.5. Το επακριβές σημείο δειγματοληψίας επελέγη κατά την επίσκεψη στην περιοχή.



Σχήμα 6.5 Η περιοχή που έχει επισημανθεί στο Σχ. 6.3

6.4.2 Σχεδιασμός δειγματοληψίας

Αρχικά, δημιουργήθηκε ένας κατάλογος με τα εργαλεία και τα υλικά που ήταν απαραίτητα για την δειγματοληψία (Παράρτημα 1). Η μέθοδος δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή που περιγράφηκε στην § 3.5. Ο σκοπός της επίσκεψης ήταν η συλλογή δειγμάτων από μία θέση αναφοράς και η συλλογή δειγμάτων από μία περιοχή υπό κλίση, για την σύγκριση της συγκέντρωσης Cs-137 (Bq/m^2) του κάθε σημείου της περιοχής υπό κλίση, με την θέση αναφοράς με σκοπό τον υπολογισμό του ρυθμού αναδιανομής κάθε σημείου (Κεφ. 5). Καθώς, δεν ήταν δυνατό να γίνουν δύο επισκέψεις στην περιοχή, ώστε την πρώτη φορά να βρεθεί το βάθος μέχρι το οποίο φτάνει το Cs-137, αποφασίστηκε τα δείγματα να φτάνουν μέχρι βάθος 20cm. Αυτή η επιλογή έγινε διότι στην δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε στην θέση αναφοράς στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (§ 6.3.1), διαπιστώθηκε ότι η συγκέντρωση του Cs-137 (Bq/kg) σε βάθος 11-15cm, έχει μειωθεί πάρα πολύ σε σχέση με την συγκέντρωση σε μικρότερο βάθος. Οπότε αποφασίστηκε να γίνει η δειγματοληψία μέχρι βάθος 20cm, αφού διαπιστώθηκε ότι το ποσοστό του Cs-137 σε μεγαλύτερα βάθη είναι ελάχιστο. Επιπλέον, κατά την δοκιμαστική δειγματοληψία

εμφανίστηκαν πολλά προβλήματα κατά την διεύθυνση της συσκευής σε βάθη μεγαλύτερα από 20cm, λόγω του μεγάλου ποσοστού λίθων στα ελληνικά χώματα.

Στην περιοχή υπό κλίση αποφασίστηκε να γίνει δειγματοληψία απλής διατομής (transect) (Σχ. 2.11 – Κεφ. 2), για να ελεγχθεί η διάβρωση της περιοχής κατά μήκος. Αν και στην § 2.6.2.1, προτείνεται η δειγματοληψία πλέγματος για κεκλιμένα επίπεδα με καμπυλότητα κατά μήκος και κατά πλάτος, θεωρήθηκε μηδενική καμπυλότητα κατά πλάτος, λόγω της έλλειψης χρόνου και μέσων, για την πραγματοποίηση δειγματοληψίας πλέγματος. Επιπλέον, σε πολλές μελέτες η δειγματοληψία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης του χώματος, είναι η δειγματοληψία απλής διατομής (Martinez et al., 2009, Quine et al., 1994). Όπως μπορεί να πραγματοποιηθεί δειγματοληψία και σε παραπάνω από μία διατομές. Υπάρχει όμως ο περιορισμός ότι η απόσταση μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας της διατομής πρέπει να είναι από 10-25m (Martinez et al., 2009, Quine et al., 1994). Στο τέλος, εκτός από τον ρυθμό διάβρωσης ή ιζηματογένεσης που υπολογίζεται για κάθε σημείο της διατομής (transect), υπολογίζεται και ο ρυθμός διάβρωσης ή ιζηματογένεσης για ολόκληρη την διατομή. Αυτό γίνεται ως εξής (Martinez et al., 2009):

- Υπολογίζεται ο ρυθμός διάβρωσης ή ιζηματογένεσης $Y(t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1})$ για κάθε σημείο της διατομής, ο οποίος προκύπτει πάντα θετικός αριθμός.
- Στα σημεία που έχουν υποστεί διάβρωση, όπως προκύπτει από το πρόσημο της διαφοράς $A - A_{ref}$, μπαίνει αρνητικό πρόσημο στην τιμή του ρυθμού (λόγω των απωλειών χώματος).
- Στα σημεία που έχουν υποστεί ιζηματογένεση, μπαίνει θετικό πρόσημο στην τιμή του ρυθμού (λόγω της προσθήκης χώματος).
- Υπολογίζεται το αλγεβρικό άθροισμα των ρυθμών διάβρωσης και ιζηματογένεσης και όταν ο αριθμός που προκύπτει είναι αρνητικός, τότε είναι ο ρυθμός διάβρωσης του χώματος της περιοχής που καλύπτει η διατομή. Εάν ο αριθμός προκύψει θετικός, τότε είναι ο ρυθμός ιζηματογένεσης του χώματος της περιοχής που καλύπτει η διατομή.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία στην θέση αναφοράς. Σύμφωνα με την § 2.5.2.5, ο αριθμός των δειγμάτων πρέπει να είναι τουλάχιστον 11, με απόσταση μεταξύ των δειγμάτων τουλάχιστον 10 μέτρα (§ 2.5.2.4) ενώ πρέπει να γίνει δειγματοληψία πλέγματος (Σχ. 2.9 – § 2.6.2.1). Όμως εξαιτίας των δυσκολιών να συλλεχθούν τόσα πολλά δείγματα αποφασίστηκε, να πραγματοποιηθεί δειγματοληψία 1 δείγματος, για να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της κατά βάθος κατανομής του Cs-137 στο χόμα και για την εύρεση της συνολικής

συγκέντρωσης Cs-137 στην θέση αναφοράς A_{ref} (Bq/m^2). Το κάθε δείγμα χωρίστηκε σε 10 υπο-δείγματα, με εύρος βάθους 2cm το καθένα (δηλ. σε τμήματα από 0-2cm, από 2-4cm κτλ.), των οποίων η φασματοσκοπική ανάλυση έγινε ξεχωριστά. Για κάθε υπο-δείγμα υπολογίστηκε η ειδική ραδιενέργεια του Cs-137 (Bq/kg) για την εύρεση της κατά βάθος κατανομής του Cs-137, ενώ από την άθροισή των ειδικών ραδιενεργειών των υπο-δειγμάτων προέκυψε η A_{ref} .

6.4.3 Δειγματοληψία

6.4.3.1 Δειγματοληψία στην περιοχή προς μελέτη

Αφού προσεγγίστηκε η περιοχή που εντοπίστηκε μέσω του Google Earth, έγινε ανίχνευση της περιοχής για να βρεθεί κατάλληλο σημείο, στο οποίο θα γινόταν μελέτη της διάβρωσης. Τελικά εντοπίστηκε μία τοποθεσία, με έντονη κλίση, χαμηλή βλάστηση και αρκετά μαλακό χώμα (Σχ. 6.5), με γεωγραφικό πλάτος 22.38027 και γεωγραφικό μήκος 38.99132.

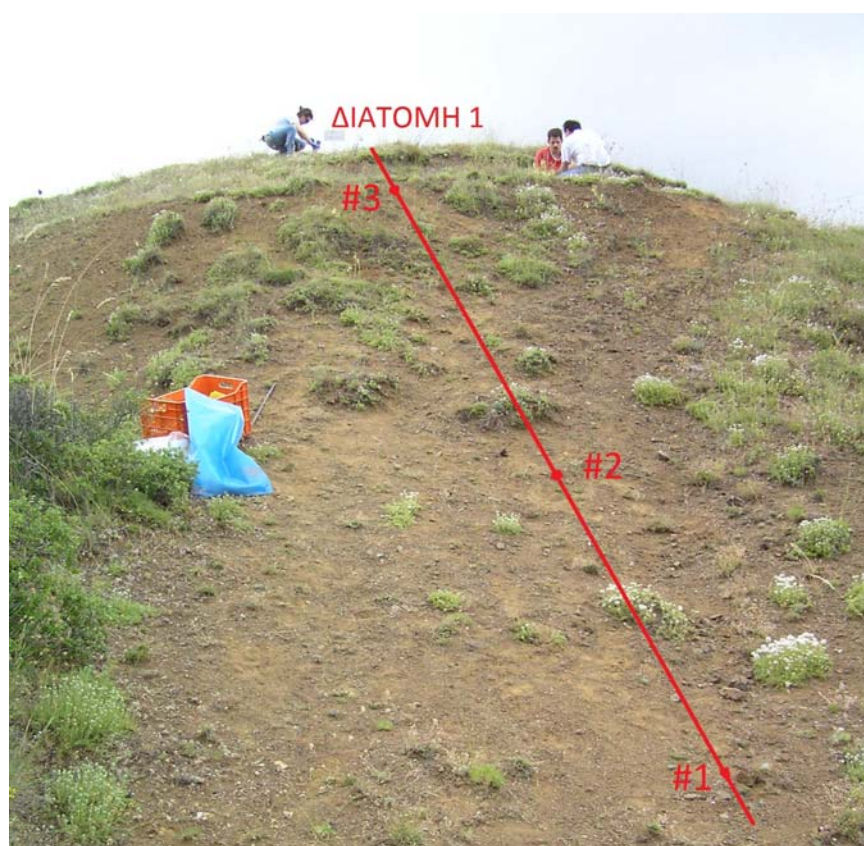


Σχήμα 6.6 Άποψη της περιοχής που πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία για μελέτη της διάβρωσης του χώματος (Προσεγγιστικά σχεδιάστηκαν οι διατομές 2 και 3 και τα σημεία τους)

Αποφασίστηκε να γίνουν δειγματοληψίες απλής διατομής σε 3 διατομές. Η συνολική έκταση χωρίστηκε σε 3 κεκλιμένα τμήματα και στο κάθε τμήμα θα γινόταν δειγματοληψία απλής διατομής. Ο συνολικός αριθμός σημείων της κάθε διατομής, καθορίστηκε από το μήκος του τμήματος και από τον περιορισμό, ότι η απόσταση μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας, σε μία διατομή πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 μέτρα.

6.4.3.1.1 Δειγματοληψία πρώτης διατομής

Αρχικά έγινε δειγματοληψία της πρώτης διατομής, η οποία είχε μικρό μήκος και εκτεινόταν από την κορυφή του λόφου (Σχ. 6.6) μέχρι κάτω (από την πίσω μεριά του λόφου, που είναι αθέατη στο Σχ. 6.6), και είχε αρκετά μεγάλη κλίση σε κάποια τμήματά της ($25-30^{\circ}$). Στο Σχ. 6.7 φαίνεται το πίσω τμήμα του λόφου, όπου έγινε η δειγματοληψία της πρώτης διατομής. Τα σημεία της διατομής ήταν 3, με απόσταση 10 μέτρων μεταξύ τους. Στο Παράρτημα 2 παρουσιάζονται τα στοιχεία για την δειγματοληψία της πρώτης διατομής, το σκαρίφημα της πλαγιάς καθώς και τα 3 σημεία που έγιναν οι δειγματοληψίες.



Σχήμα 6.7 Το πρώτα τμήμα που πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία απλής διατομής (Προσεγγιστικά σχεδιάστηκε η διατομή και τα σημεία της)

Αρχικά, συλλέχθηκε το δείγμα #1, το οποίο ήταν το χαμηλότερο σημείο της διατομής. Αυτό που παρατηρήθηκε έντονα ήταν η μεγάλη δυσκολία στην διείδυση του σωλήνα δειγματοληψίας στο χώμα. Μετά την εξαγωγή του σωλήνα και την συλλογή του δείγματος, παρατηρήθηκε ότι ο λόγος ήταν το μεγάλο ποσοστό λίθων στο δείγμα (Σχ. 6.8).



Σχήμα 6.8 Δείγμα #1

Στην συνέχεια συλλέχθηκε το δείγμα #2, το οποίο ήταν το ενδιάμεσο τμήμα της διατομής. Η διείδυση του σωλήνα ήταν αρκετά πιο εύκολη σε σχέση με το σημείο του δείγματος #1. Μετά την εξαγωγή παρατηρήθηκε, ότι το δείγμα ήταν πολύ πιο πλούσιο σε χώμα, από ό,τι το δείγμα #1 και το ποσοστό λίθων, σχεδόν μηδαμινό. (Σχ. 6.9).



Σχήμα 6.9 Δείγμα #2

Ύστερα, συλλέχθηκε το δείγμα #3, που ήταν και το υψηλότερο σημείο της διατομής. Στο οποίο το ποσοστό των λίθων ήταν μικρό και βρισκόταν στα τελευταία 5cm, αλλά ήταν λίγο περισσότερο σε σχέση με το δείγμα #2 (Σχ. 6.10).



Σχήμα 6.10 Δείγμα #3

6.4.3.1.2 Δειγματοληψία δεύτερης διατομής

Η δεύτερη διατομή (Σχ. 6.6, Σχ. 6.11) είχε μεγαλύτερο μήκος από την πρώτη και συλλέχτηκαν 5 δείγματα κατά μήκος της, σε απόσταση περίπου 10 μέτρων μεταξύ τους. Ενώ η κλίση της ήταν μικρή ($10-15^{\circ}$). Στο Παράρτημα 2 παρουσιάζονται τα στοιχεία για την δειγματοληψία της δεύτερης διατομής, το σκαρίφημα της πλαγιάς καθώς και τα 5 σημεία που έγιναν οι δειγματοληψίες.



Σχήμα 6.11 Το δεύτερο τμήμα που πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία απλής διατομής (Σχεδιάστηκε προσεγγιστικά η διατομή)

Αρχικά συλλέχθηκε το δείγμα #4, το οποίο ήταν το υψηλότερο σημείο της πλαγιάς. Η διείσδυση του σωλήνα, ήταν εύκολη, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του δείγματος ήταν χώμα, εκτός από τα τελευταία 2-3 cm που περιείχαν υψηλό ποσοστό λίθων (Σχ. 6.12).



Σχήμα 6.12 Δείγμα #4

Στην συνέχεια συλλέχθηκε το δείγμα #5, το οποίο ήταν σε ενδιάμεσο σημείο της διατομής. Το δείγμα περιείχε αρκετά μεγάλο ποσοστό χώματος, αλλά και αρκετό ποσοστό λίθων, που βρίσκονταν στα τελευταία 7-8cm (Σχ. 6.13)



Σχήμα 6.13 Δείγμα #5

Ύστερα συλλέχθηκε το δείγμα #6, το οποίο ήταν σε ενδιάμεσο σημείο της διατομής. Το δείγμα ήταν πολύ πλούσιο σε χώμα και το ποσοστό των λίθων σε αυτό, ήταν ελάχιστο (Σχ. 6.14).



Σχήμα 6.14 Δείγμα #6

Μετά συλλέχθηκε το δείγμα #7, το οποίο ήταν σε ενδιάμεσο σημείο της διατομής. Σε αυτό υπήρχε αρκετό χώμα αλλά και αρκετό ποσοστό των λίθων, οι οποίοι βρισκόνταν στα τελευταία 8-9cm (Σχ. 6.15)



Σχήμα 6.15 Δείγμα #7

Τέλος, συλλέχθηκε το δείγμα #8, το οποίο ήταν στο χαμηλότερο σημείο της πλαγιάς. Στο δείγμα αυτό, οι λίθοι βρισκόνταν στα τελευταία 6-7 cm και το υπόλοιπο ήταν κυρίως χώμα (Σχ. 6.16).



Σχήμα 6.16 Δείγμα #8

6.4.3.1.3 Δειγματοληψία τρίτης διατομής

Το μήκος της τρίτης διατομής (Σχ. 6.6, Σχ. 6.17), ήταν μεγάλο, όμως συλλέχθηκαν 4 δείγματα σε αποστάσεις 4-8m μεταξύ τους. Αυτό συνέβη γιατί η κλίση της πλαγιάς ήταν πολύ μεγάλη ($30-35^{\circ}$) και ήταν τεχνικά δύσκολο να πραγματοποιηθεί δειγματοληψία στα χαμηλότερα τμήματα της πλαγιάς. Γι' αυτόν τον λόγο δεν ικανοποιήθηκε και ο περιορισμός των 10m μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας. Έτσι όμως ήταν δυνατό να συλλεχθούν παραπάνω δείγματα. Στο Παράρτημα 2 παρουσιάζονται τα στοιχεία για την δειγματοληψία της τρίτης διατομής, το σκαρίφημα της πλαγιάς καθώς και τα 4 σημεία που έγιναν οι δειγματοληψίες.



Σχήμα 6.17 Η πλαγιά που έγινε η δειγματοληψία της διατομής 3

Αρχικά συλλέχθηκε το δείγμα #9, το οποίο ήταν το χαμηλότερο σημείο της πλαγιάς. Το ποσοστό λίθων στο δείγμα ήταν αρκετό και παρουσιάστηκε στα τελευταία 9-10cm (Σχ. 6.18).



Σχήμα 6.18 Δείγμα #9

Στη συνέχεια συλλέχθηκε το δείγμα #10, το οποίο ήταν ενδιάμεσο σημείο της πλαγιάς. Το ποσοστό των λίθων στο δείγμα αυτό ήταν πολύ μικρό και εμφανίστηκαν στα τελευταία 3-4 εκατοστά. Έτσι το δείγμα ήταν αρκετά πλούσιο σε χώμα (Σχ. 6.19)



Σχήμα 6.19 Δείγμα #10

Ύστερα συλλέχθηκε το δείγμα #11, το οποίο ήταν ενδιάμεσο σημείο της πλαγιάς. Το δείγμα περιείχε κατά βάση χώμα, με μικρό ποσοστό λίθων οι οποίοι βρίσκονταν στα τελευταία 2-3 εκατοστά (Σχ. 6.20)



Σχήμα 6.20 Δείγμα #11

Τέλος, συλλέχθηκε το δείγμα #12, το οποίο ήταν το υψηλότερο σημείο της πλαγιάς. Η διείδυση του σωλήνα στο χώμα έγινε με μεγάλη δυσκολία και ενδεικτικό είναι ότι έγιναν πολλές απόπειρες σε κοντινά σημεία μέχρι να βρεθεί σημείο, όπου να μπορεί να γίνει δειγματοληψία μέχρι βάθος 20cm. Ήταν κάτι αναμενόμενο όμως, γιατί εκείνο το σημείο ήταν πολύ βραχώδες και ήταν εμφανή τα σημάδια διάβρωσης του χώματος σε εκείνο το τμήμα της πλαγιάς, που ήταν στην κορυφή του λόφου. Αυτό αποτυπώθηκε και στο δείγμα που συλλέχτηκε, καθώς δείγμα είχε υψηλό ποσοστό λίθων σχεδόν σε όλο το βάθος του (Σχ. 6.21).



Σχήμα 6.21 Δείγμα #12

6.4.3.2 Δειγματοληψία στην θέση αναφοράς

Στην συνέχεια έπρεπε να γίνει δειγματοληψία σε μία θέση αναφοράς. Επομένως έπρεπε να βρεθεί μία περιοχή που να τηρεί τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν στην § 2.3.1. Ήταν αναγκαίο η περιοχή να βρισκόταν όσο τον δυνατόν πιο κοντά στην περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες. Οι εναλλακτικές επιλογές ήταν μηδαμινές καθώς βρέθηκε μόνο μια περιοχή που να πληροί τις περισσότερες εκ των προϋποθέσεων. Αυτή η περιοχή είχε γεωγραφικό πλάτος 22.37782 και γεωγραφικό μήκος 38.98894. Ήταν επίπεδη και η βλάστηση ήταν χαμηλή. Η μόνη προϋπόθεση που δεν τηρούνταν ήταν ότι μπορούσε να ρεύσει νερό από ψηλότερα καθώς κοντά στην επίπεδη τοποθεσία υπήρχε ένα μικρό ύψωμα. Παρ' όλα αυτά ήταν η βέλτιστη δυνατή λύση που καταφέραμε να επιτύχουμε, καθώς αν απομακρυνόμασταν περισσότερο από την περιοχή μελέτης για να βρούμε καταλληλότερο σημείο, οι αβεβαιότητες θα αυξάνονταν πολύ, εξαιτίας της απόστασης από την περιοχή προς μελέτη.

Το δείγμα που συλλέχθηκε από την θέση ήταν πλούσιο σε χώμα και το ποσοστό των λίθων ήταν μικρό και βρισκόταν στα τελευταία 1-2 cm (Σχ. 7.21). Το

δείγμα όμως δεν συσκευάστηκε ολόκληρο, αλλά χωρίστηκε σε τμήματα ανά 2cm βάθους. Το κάθε κομμάτι ήταν ένα υπο-δείγμα, το οποίο συσκευάστηκε ξεχωριστά. Η διαδικασία μέσω της οποίας έγινε ο τμηματικός διαχωρισμός του δείγματος περιγράφηκε στην § 3.5. Ο τμηματικός διαχωρισμός, όπως έχει προαναφερθεί, έγινε για να αναλυθεί η κατά βάθος κατανομή του Cs-137 στην θέση αναφοράς. Αυτό ήταν και το τέλος της διαδικασίας της δειγματοληψίας.



Σχήμα 6.21 Δείγμα την θέσης αναφοράς

6.4.4 Προετοιμασία και ανάλυση των δειγμάτων

Η προετοιμασία και η ανάλυση των δειγμάτων, έγινε ακριβώς όπως περιγράφηκε στις § 4.3.2 και § 4.4.3 αντίστοιχα.

6.4.5 Υπολογισμός μεγεθών των δειγμάτων και εφαρμογή των μοντέλων υπολογισμού

6.4.5.1 Καταγραφή και υπολογισμός μεγεθών από την επεξεργασία και την ανάλυση δειγμάτων

Μετά την ολοκλήρωση της δειγματοληψίας, της προετοιμασίας των δειγμάτων και της γ-φασματοσκοπικής τους ανάλυσης, ακολούθησε η εφαρμογή των μοντέλων υπολογισμού, από τα οποία υπολογίστηκαν οι ρυθμοί διάβρωσης/ίζηματογένεσης. Μέσω αυτών των αποτελεσμάτων, προέκυψαν τα συμπεράσματα για την μελέτη διάβρωσης χώματος που πραγματοποιήθηκε. Επίσης προέκυψαν αβεβαιότητες, ερωτήματα καθώς και έδαφος για την πραγματοποίηση νέας έρευνας.

6.4.5.1.1 Δείγματα θέσης αναφοράς

Οι διαδικασίες και οι υπολογισμοί έγιναν όπως στην § 6.3.1, ενώ η αβεβαιότητα που λήφθηκε υπόψη ήταν μόνο της ανάλυσης φάσματος, όπως και προηγουμένως.

Τα αποτελέσματα για όλα τα δείγματα, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (6.13-6.16):

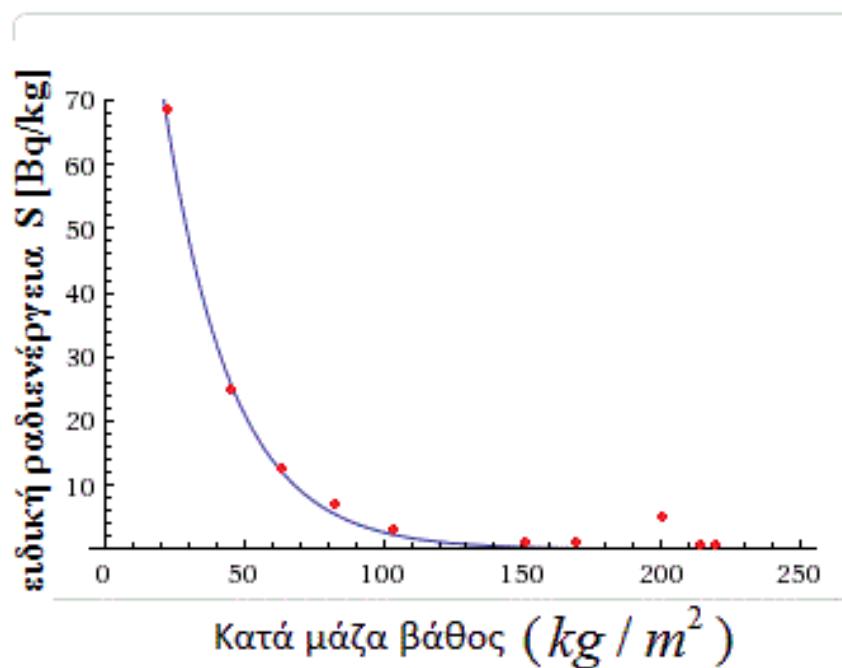
- Στον πίνακα 6.13, παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα δείγματα χώματος που συλλέχτηκαν
- Στον πίνακα 6.14, παρουσιάζονται τα δεδομένα για τα δείγματα που ετοιμάστηκαν στο εργαστήριο (κωδικοποίηση MSnnn)
- Στον πίνακα 6.15, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των δειγμάτων (συγκέντρωση ραδιενέργειας Cs-137 (S) (Bq/kg)) και τα αποτελέσματα της μετατροπής της συγκέντρωσης ραδιενέργειας (S) σε επιφανειακή πυκνότητα ραδιενέργειας (E) (Bq / m^2)
- Στον πίνακα 6.16 παρουσιάζεται η κατά βάθος κατανομή του Cs-137 στη θέση αναφοράς και στην συνέχεια παρουσιάζεται και η γραφική του απεικόνιση η οποία έγινε μέσω του online προγράμματος Wolfram Alpha (Σχ. 6.23). Η συνάρτηση κατανομής είναι η $y = 167.99 \cdot e^{-0.041 \cdot x}$ και το Rms=0.983.

Πίνακας 6.13 - Δείγματα χώματος που συλλέχθηκαν κατά βάθος, στην θέση αναφοράς στον Δραχμάνογα Λαμίας							
A/A	Βάθος (cm)	t (cm)	V (cm^3)	$M_{<2,AD}$ (g)	h (%)	$M_{<2,AD}$ (g)	$D_{b<2}$ (g / cm^3)
1	0-2	2	91.0	207.6	4.2%	198.9	2.2
2	2-4	2	91.0	140.9	4.7%	134.3	1.5
3	4-6	2	91.0	119.0	5.0%	113.1	1.2
4	6-8	2	91.0	112.7	5.1%	107.0	1.2
5	8-10	2	91.0	108.1	3.0%	104.8	1.2
6	10-12	2	91.0	134.5	5.5%	127.1	1.4
7	12-14	2	91.0	123.7	4.1%	118.6	1.3
8	14-16	2	91.0	123.9	3.0%	120.2	1.3
9	16-18	2	91.0	123.2	4.6%	117.5	1.3
10	18-20	2	91.0	106.6	3.6%	102.8	1.1

Πίνακας 6.14 - Δείγματα χώματος που προετοιμάσθηκαν για ανάλυση (Κωδικοποίηση MSnnn) στην θέση αναφοράς στον Δραχμάνογα Λαμίας					
A/A	Δείγμα	Βάθος (cm)	m' (g)	h (%)	m (g)
1	MS624	0-2	60.5	4.2%	58.0
2	MS623	2-4	62.7	4.7%	59.8
3	MS622	4-6	60.0	5.0%	57.0
4	MS621	6-8	55.7	5.1%	52.9
5	MS620	8-10	57.8	3.0%	56.1
6	MS619	10-12	51.9	5.5%	49.0
7	MS618	12-14	53.9	4.1%	51.7
8	MS617	14-16	56.4	3.0%	54.7
9	MS616	16-18	58.6	4.6%	55.9
10	MS615	18-20	61.6	3.6%	59.4

Πίνακας 6.15 - Συγκέντρωση Cs-137 στα δείγματα στην θέση αναφοράς						
A/A	Δείγμα	Βάθος (cm)	S (Bq / kg)	σ_S (Bq / kg)	E (Bq / m ²)	σ_E Bq / m ²)
1	MS624	0-2	68.3	0.6	2985	25
2	MS623	2-4	25.5	0.5	754	15
3	MS622	4-6	12.5	0.4	312	10
4	MS621	6-8	7.1	0.4	166	9
5	MS620	8-10	3.5	0.4	80	8
6	MS619	10-12	2.1	0.4	60	11
7	MS618	12-14	1.9	0.4	49	9
8	MS617	14-16	6.4	0.4	170	10
9	MS616	16-18	1.1	0.3	28	6
10	MS615	18-20	1.8	0.3	40	7
A_{ref} (Bq / m ²)					4643	39

Πίνακας 6.16 - Συγκέντρωση Cs-137 συναρτήσει του βάθους						
A/A	Δείγμα	Βάθος (cm)	z(cm)	x (kg / m ²)	S(Bq / kg)	σ _s (Bq / kg)
1	MS624	0-2	1	21.9	68.3	0.6
2	MS623	2-4	3	44.3	25.5	0.5
3	MS622	4-6	5	62.2	12.5	0.4
4	MS621	6-8	7	82.3	7.1	0.4
5	MS620	8-10	9	103.7	3.5	0.4
6	MS619	10-12	11	153.7	2.1	0.4
7	MS618	12-14	13	169.5	1.9	0.4
8	MS617	14-16	15	198.2	6.4	0.4
9	MS616	16-18	17	219.6	1.1	0.3
10	MS615	18-20	19	214.7	1.8	0.3



Σχήμα 6.23 Η γραφική παράσταση της κατά βάθος κατανομής του Cs-137 στην θέση αναφοράς στον Δραχμάναγα Φθιώτιδας

6.4.5.1.2 Δείγματα περιοχής προς μελέτη

Η διαδικασία και οι υπολογισμοί έγιναν όπως στην § 6.3.2.

Τα αποτελέσματα για όλα τα δείγματα, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πιν. 6.17-6.19):

- Στον πίνακα 6.17, παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα δείγματα χόματος που συλλέχθηκαν
- Στον πίνακα 6.18, παρουσιάζονται τα δεδομένα για τα δείγματα που ετοιμάστηκαν στο εργαστήριο (MSnnn)
- Στον πίνακα 6.19, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των δειγμάτων (συγκέντρωση ραδιενέργειας Cs-137 (S) (Bq/kg)) και τα αποτελέσματα της μετατροπής της συγκέντρωσης ραδιενέργειας (S) σε επιφανειακή πυκνότητα ραδιενέργειας (A) (Bq / m^2)
- Το δείγμα #5, δεν λαμβάνεται υπόψη στην μελέτη, καθώς η συγκέντρωση του Cs-137 (Bq/kg) ήταν κάτω από τα όρια ανίχνευσης.

Πίνακας 6.17 – Δείγματα χόματος που συλλέχθηκαν κατά βάθος, στην περιοχή προς μελέτη στον Δραχμάναγα Λαμίας							
A/A	Βάθος (cm)	t (cm)	V (cm^3)	$M_{<2,AD}$ (g)	h (%)	$M_{<2,AD}$ (g)	$D_{b<2}$ (g / cm^3)
#1	0-20	20	909.7	669.6	4.4%	640.1	0.7
#2	0-20	20	909.7	573.2	4.2%	549.1	0.6
#3	0-20	20	909.7	761.0	3.9%	731.4	0.8
#4	0-20	20	909.7	632.2	4.2%	605.6	0.7
#5	0-20	20	909.7	598.0	4.7%	569.9	0.6
#6	0-20	20	909.7	616.7	4.4%	589.5	0.6
#7	0-20	20	909.7	420.5	3.8%	404.5	0.5
#8	0-20	20	909.7	462.5	6.0%	434.8	0.5
#9	0-20	20	909.7	400.2	3.3%	387.0	0.4
#10	0-20	20	909.7	511.5	4.5%	488.5	0.5
#11	0-20	20	909.7	531.7	2.3%	519.4	0.6
#12	0-20	20	909.7	368.9	2.8%	358.6	0.4

Πίνακας 6.18 - Δείγματα χόματος που προετοιμάστηκαν για ανάλυση (Κωδικοποίηση MSnnn) στην περιοχή προς μελέτη, στον Δραχμάναγα Λαμίας					
A/A	Δείγμα	Βάθος (cm)	m' (g)	h (%)	m (g)
#1	MS626	0-20	129.5	4.4%	123.8
#2	MS627	0-20	129.4	4.2%	124.0
#3	MS628	0-20	139.6	3.9%	134.2
#4	MS629	0-20	135.9	4.2%	130.2
#5	MS630	0-20	132.8	4.7%	126.6
#6	MS631	0-20	148.9	4.4%	142.4
#7	MS632	0-20	135.0	3.8%	129.9
#8	MS633	0-20	130.5	6.0%	122.7
#9	MS634	0-20	144.6	3.3%	139.8
#10	MS635	0-20	135.8	4.5%	129.7
#11	MS636	0-20	131.5	2.3%	128.5
#12	MS637	0-20	141.8	2.8%	137.8

Πίνακας 6.19 - Συγκέντρωση Cs-137 στα δείγματα στην περιοχή προς μελέτη						
A/A	Δείγμα	Βάθος (cm)	S (Bq / kg)	σ_s (Bq / kg)	A (Bq / m ²)	σ_A (Bq / m ²)
#1	MS626	0-20	0.4	0.1	54	19
#2	MS627	0-20	17.0	0.5	2053	65
#3	MS628	0-20	25.8	0.6	4141	90
#4	MS629	0-20	0.3	0.1	36	11
#5	MS630	0-20	-	-	-	-
#6	MS631	0-20	2.8	0.3	367	39
#7	MS632	0-20	6.4	0.4	566	34
#8	MS633	0-20	15.9	0.5	1517	47
#9	MS634	0-20	49.7	0.6	4224	54
#10	MS635	0-20	48.4	0.7	5199	69
#11	MS636	0-20	49.4	0.7	5641	74
#12	MS637	0-20	6.9	0.4	541	33

6.4.5.2 Εφαρμογή των μοντέλων υπολογισμού

Όπως έχει προαναφερθεί, στα μοντέλα γίνεται η σύγκριση της συγκέντρωσης Cs-137 (Bq / m²) στα σημεία της περιοχής μελέτης, με την συγκέντρωση Cs-137 στην θέση αναφοράς. Από την δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε στην θέση

αναφοράς προέκυψε η κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137, δηλαδή υπολογίστηκε η συγκέντρωση του Cs-137 στο κάθε ένα από τα 10 τμήματα που διαχωρίστηκαν ανά 2cm βάθους. Με άθροιση των συγκεντρώσεών τους προέκυψε η συγκέντρωση του Cs-137 στην θέση αναφοράς A_{ref} (Bq / m^2).

6.4.5.2.1 1^ο Μοντέλο υπολογισμού – Εμπειρικό μοντέλο

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του μοντέλου σε κάθε δείγμα είναι η εξής (§ 5.2.2.1):

$$Y = 7.74(1.09^X) \quad (t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1})$$

- Y: Ο ρυθμός διάβρωσης του εδάφους ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$)
- A_{ref} είναι η συγκέντρωση του Cs-137 στην θέση αναφοράς (Bq / m^2)
- A είναι η μετρούμενη συγκέντρωση του Cs-137 στο σημείο δειγματοληψίας (Bq / m^2)

$$➤ X = \left[\frac{A_{ref} - A}{A_{ref}} \right] \cdot 100\%$$

Όπως αναφέρθηκε στην § 5.2.1.1 το εμπειρικό μοντέλο δεν εφαρμόζεται για περιπτώσεις ιζηματογένεσης, δηλαδή όταν η συγκέντρωση Cs-137 σε ένα σημείο είναι μεγαλύτερη από την συγκέντρωση στην θέση αναφοράς. Αυτό συμβαίνει γιατί έχει σχεδιαστεί μόνο για περιπτώσεις διάβρωσης, δηλαδή όταν η συγκέντρωση Cs-137 σε ένα σημείο είναι μεγαλύτερη από την συγκέντρωση στην θέση αναφοράς. Στην μελέτη μας υπάρχουν σημεία με συγκέντρωση Cs-137 μεγαλύτερη από την συγκέντρωση στην θέση αναφοράς. Παρ' όλα αυτά θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο και για περιπτώσεις ιζηματογένεσης, όπως έχει γίνει και σε άλλες μελέτες (Martinez et. Al., 2009) για να γίνει η σύγκριση των τιμών και με τα άλλα μοντέλα μετατροπής.

Όπως συμβαίνει και στα άλλα μοντέλα, όταν $A > A_{ref}$ τότε:

$$➤ X = \left[\frac{A - A_{ref}}{A_{ref}} \right] \cdot 100\%$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των εξισώσεων στα δείγματα μας ήταν τα εξής:

Πίνακας 6.20 – Αποτελέσματα ρυθμών αναδιανομής 1 ^{ου} μοντέλου							
A/A	A (Bq / m ²)	σ _A (Bq / m ²)	A _{ref} -A (Bq / m ²)	σ _{A_{ref}-A} (Bq / m ²)	X	σ _X	Y (t · ha ⁻¹ · yr ⁻¹)
#1	54	19	4589	43	0.9	0.01	8.4
#2	2053	65	2590	75	0.56	0.02	8.1
#3	4141	90	502	98	0.11	0.02	7.8
#4	36	11	4607	40	0.99	0.01	8.4
#5	-	-	-	-	-	-	-
#6	367	39	4276	55	0.92	0.01	8.4
#7	566	34	4077	51	0.88	0.01	8.4
#8	1517	47	3126	61	0.67	0.01	8.2
#9	4224	54	419	66	0.09	0.01	7.8
#10	5199	69	-556	80	0.12	0.02	7.7
#11	5641	74	-998	84	0.22	0.02	7.6
#12	541	33	4102	51	0.88	0.01	8.4

6.4.5.2.2 2^ο Μοντέλο υπολογισμού – Μοντέλο κατανομής-προφίλ

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή του μοντέλου σε κάθε δείγμα είναι η εξής (§ 5.2.2.2.1):

$$Y = -\frac{10}{t-1963} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{X}{100} \right) \right] \cdot h_0$$

- Y: Ο ρυθμός διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του εδάφους (t · ha⁻¹ · yr⁻¹)
- Εάν A_{ref} > A (διάβρωση), τότε $X = \left[\frac{A_{ref} - A}{A_{ref}} \right] \cdot 100\%$
- Εάν A_{ref} < A (διάβρωση), τότε $X = \left[\frac{A - A_{ref}}{A_{ref}} \right] \cdot 100\%$
- t: το έτος της δειγματοληψίας (yr)
- h₀: Υπολογίστηκε από την εκθετική συνάρτηση της κατά βάθος κατανομής του Cs-137, που είναι:
- $A(x) = ae^{-\frac{x}{h_0}}$

- Η συνάρτηση κατανομής του Cs- 137, έχει ήδη βρεθεί και είναι:
 $y = 167.99 \cdot e^{-0.041 \cdot x}$
- Οπότε $h_0 = 24.1 \pm 1.9 \text{ kg} / \text{m}^2$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των εξισώσεων στα δείγματα μας ήταν τα εξής (Πιν. 6.21):

Πίνακας 6.21 – Αποτελέσματα ρυθμών αναδιανομής 2 ^ο μοντέλου							
A/A	A (Bq / m ²)	σ_A (Bq / m ²)	$A_{ref} - A$ (Bq / m ²)	$\sigma_{A_{ref} - A}$ (Bq / m ²)	X	σ_X	Y (t · ha ⁻¹ · yr ⁻¹)
#1	54	19	4589	43	0.9	0.01	22.3
#2	2053	65	2590	75	0.56	0.02	4.1
#3	4141	90	502	98	0.11	0.02	0.6
#4	36	11	4607	40	0.99	0.01	24.4
#5	-	-	-	-	-	-	-
#6	367	39	4276	55	0.92	0.01	12.7
#7	566	34	4077	51	0.88	0.01	10.6
#8	1517	47	3126	61	0.67	0.01	5.6
#9	4224	54	419	66	0.09	0.01	0.5
#10	5199	69	-556	80	0.12	0.02	0.6
#11	5641	74	-998	84	0.22	0.02	1.2
#12	541	33	4102	51	0.88	0.01	10.8

6.4.5.2.3 3^ο Μοντέλο υπολογισμού – Μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου σε κάθε δείγμα ήταν οι εξής (§ 5.2.2.2.2):

Για $A_{ref} > A$ (διάβρωση) τότε ο ρυθμός διάβρωσης R ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$) υπολογίστηκε από το σύστημα των 2 εξισώσεων:

- $$C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')} dt'$$
- $$\int_0^t P \cdot R \cdot C_u(t') \cdot e^{-\lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' = A_{ref} - A$$

Για $A_{ref} < A$ (ιζηματογένεση), τότε ο ρυθμός διάβρωσης R' ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) υπολογίστηκε από το σύστημα των 2 εξισώσεων:

$$\bullet \quad C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R'/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} e^{-V^2 \cdot (t-t')/(4D) - \lambda \cdot (t-t')} dt'$$

$$\bullet \quad \int_0^t P' \cdot R' \cdot C_u(t') \cdot e^{-\lambda \cdot (t-t')} \cdot dt' = A - A_{ref}$$

- P, P' : Ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους κόκκων χώματος (§ 5.4.1)
- λ : Σταθερά ραδιενεργής διάσπασης για το Cs-137 (yr^{-1})
- $I(t)$: Ροή απόθεσης Cs-137 (deposition flux) την χρονική στιγμή t ($Bq \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$) (§ 5.4.2)
- t : Ο χρόνος που πέρασε από την στιγμή της πρώτης επιφανειακής απόθεσης, μέχρι την στιγμή της δειγματοληψίας. (yr)
- D ($kg^2 \cdot m^{-4} \cdot yr^{-1}$): ο συντελεστής διάχυσης
- W_p (kg / m^2): Το κατά μάζα βάθος (x) της μέγιστης συγκέντρωσης Cs-137 (Bq/kg)
- V ($kg \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}$): ο ρυθμός καθοδικής μετανάστευσης του Cs-137 (Bq/kg) στο προφίλ χώματος,
- N_p (kg / m^2): Το κατά μάζα βάθος (x), όπου η συγκέντρωση Cs-137 (Bq/kg) μειώνεται στο $1/e$ της μέγιστης συγκέντρωσης Cs-137 (Bq/kg)
- H (kg / m^2): Το βάθος χαλάρωσης (relaxation depth) και είναι το κατά μάζα βάθος στο οποίο η συγκέντρωση του Cs-137 (Bq/kg), μειώνεται στο $1/e$ της συγκέντρωσής του στο επιφανειακό χώμα.

Οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης είναι οι εξής:

- $t=2011-1954=57$ yr
- $\lambda=0.02297$, που είναι σταθερό και γνωστό μέγεθος
- P, P' : Θεωρήθηκαν ίσοι με την μονάδα, καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα για τους κόκκους χώματος

- $$I(t)=\frac{A_{ref}}{A_n} \cdot I_n(t)$$

οπου
$$A_n = \int_{1954}^{2011} I_n(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} dt'$$

- A_{ref} : Η συγκέντρωση Cs-137 στην θέση αναφοράς (Bq / m^2)
 - $I_n(t)$: Στην βηματική αυτή συνάρτηση χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του Πιν. 5.1 –Κεφ. 5 για τα έτη 1954-1983. Σε αυτές προστέθηκε η τιμή της απόθεσης Cs-137 το 1986 λόγω Chernobyl, στην πιο κοντινή περιοχή, που βρέθηκε από το MPX-2 (1995) ίση με $4025 Bq / m^2$.
 - A_n : Η αντιπροσωπευτική τιμή της συγκέντρωσης Cs-137 το 2011 στο βόρειο ημισφαίριο (§ 5.4.2). Υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης (23) και είναι $3966 Bq / m^2$. Στον υπολογισμό συμπεριλήφθηκε και το ποσό του Cs-137, που κατέπεσε λόγω του ατυχήματος του Chernobyl, από το MPX-2 (1995), όπως προαναφέρθηκε.
- Wp : Υπολογίστηκε από την συνάρτηση κατανομής Cs-137 ($y=167.99 \cdot e^{-0.041 \cdot x}$), λύνοντας ως προς x , όπου y είναι η μέγιστη συγκέντρωση Cs-137 (Bq/kg)
 - Np : Υπολογίστηκε από την συνάρτηση κατανομής Cs-137 ($y=167.99 \cdot e^{-0.041 \cdot x}$), λύνοντας ως προς x , όπου y είναι το $1/e$ της μέγιστης συγκέντρωσης Cs-137 (Bq/kg)

- Η: Υπολογίστηκε από την συνάρτηση κατανομής Cs-137 ($y = 167.99 \cdot e^{-0.041 \cdot x}$), λύνοντας ως προς x, όπου y είναι το 1/e της συγκέντρωσης Cs-137 (Bq/kg) στο επιφανειακό χώμα (0-2 cm)
- $D = (Np - Wp)^2 / 2(t - 1963)$
- $V = Wp / (t - 1963)$

Οι τιμές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.22 - Παράμετροι του 3 ^{ου} μοντέλου υπολογισμού							
t(yr)	λ	P	Np (kg / m ²)	Wp (kg / m ²)	H (kg / m ²)	D (kg ² · m ⁻⁴ · yr ⁻¹)	V (kg · m ⁻² · yr ⁻¹)
57	0.023	1	45.9	21.9	45.9	6.0	0.5

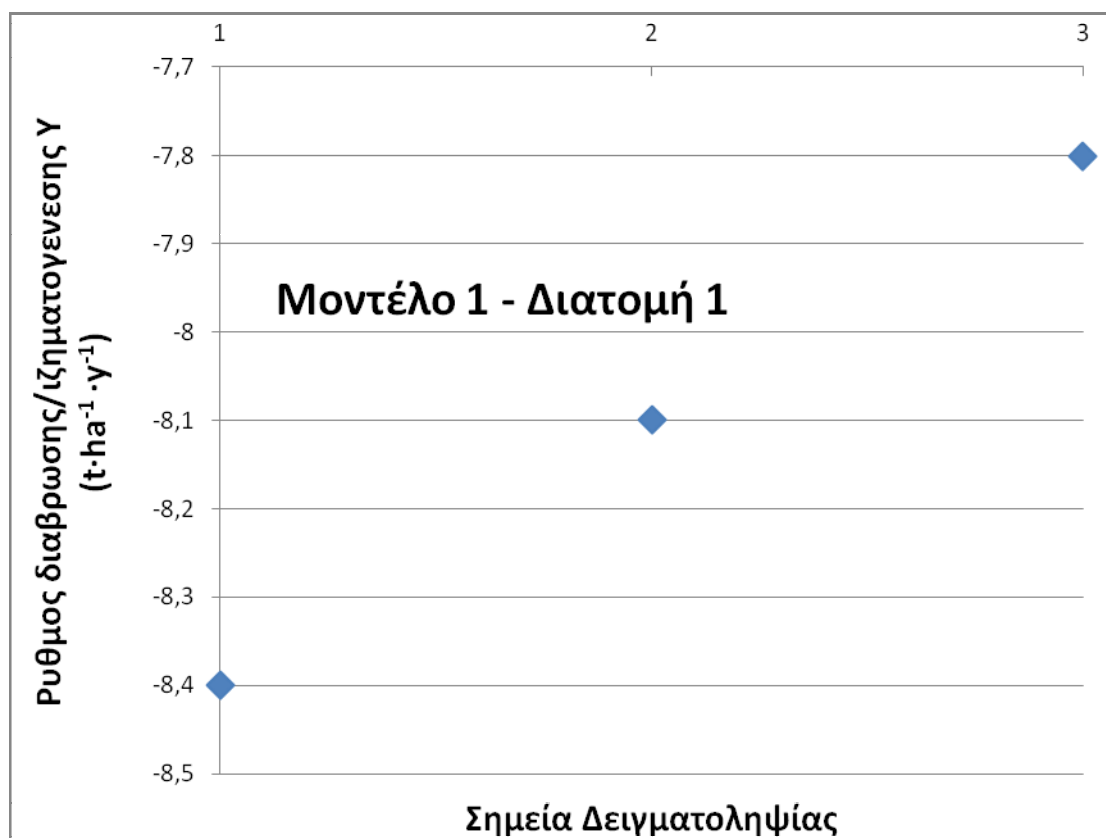
Για την εύρεση του ρυθμού διάβρωσης Y ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$), επιλύθηκε το σύστημα των 2 εξισώσεων (18),(19), όπως στην § 6.3.3.3. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.23:

Πίνακας 6.23 – Αποτελέσματα ρυθμών αναδιανομής 3 ^{ου} μοντέλου							
A/A	A (Bq / m ²)	σ_A (Bq / m ²)	$A_{ref} - A$ (Bq / m ²)	$\sigma_{A_{ref} - A}$ (Bq / m ²)	X	σ_X	Y (t · ha ⁻¹ · yr ⁻¹)
#1	54	19	4589	43	0.90	0.01	9.6
#2	2053	65	2590	75	0.56	0.02	5.4
#3	4141	90	502	98	0.11	0.02	1.0
#4	36	11	4607	40	0.99	0.01	9.7
#5	-	-	-	-	-	-	-
#6	367	39	4276	55	0.92	0.01	9.0
#7	566	34	4077	51	0.88	0.01	8.6
#8	1517	47	3126	61	0.67	0.01	6.5
#9	4224	54	419	66	0.09	0.01	0.9
#10	5199	69	-556	80	0.12	0.02	1.2
#11	5641	74	-998	84	0.22	0.02	2.1
#12	541	33	4102	51	0.88	0.01	8.6

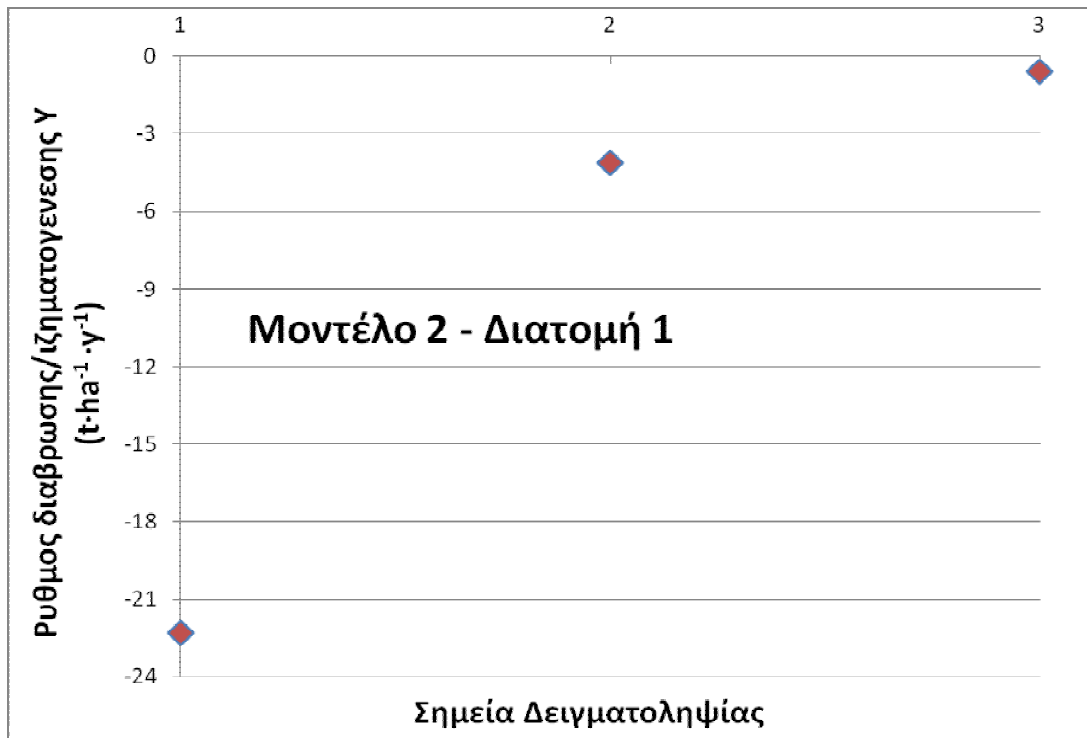
6.4.5.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μοντέλων

Συνοπτικά τα αποτελέσματα (Πιν. 6.24-6.26) των 3 μοντέλων για τις 3 διατομές δειγματοληψίας και οι γραφικές τους παραστάσεις (Σχ. 6.23-6.31) είναι τα εξής και έτσι προέκυψαν οι ρυθμοί διάβρωσης των διατομών (§ 6.4.2):

Πίνακας 6.24 – Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 1 ^{ης} διατομής						
A/A	A (Bq / m^2)	Κατάσταση	X (%)	1 ^ο μοντέλο $Y(t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1})$	2 ^ο μοντέλο $Y(t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1})$	3 ^ο μοντέλο $Y(t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1})$
#1	54	Διάβρωση	99	-8.4	-22.3	-9.6
#2	2053	Διάβρωση	56	-8.1	-4.1	-4.4
#3	4141	Διάβρωση	11	-7.8	-0.6	-1.0
Ρυθμός διάβρωσης ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$)				-24.4	-27.0	-15.0



Σχήμα 6.24 Γραφική απεικόνιση του 1^{ου} μοντέλου της 1^{ης} διατομής

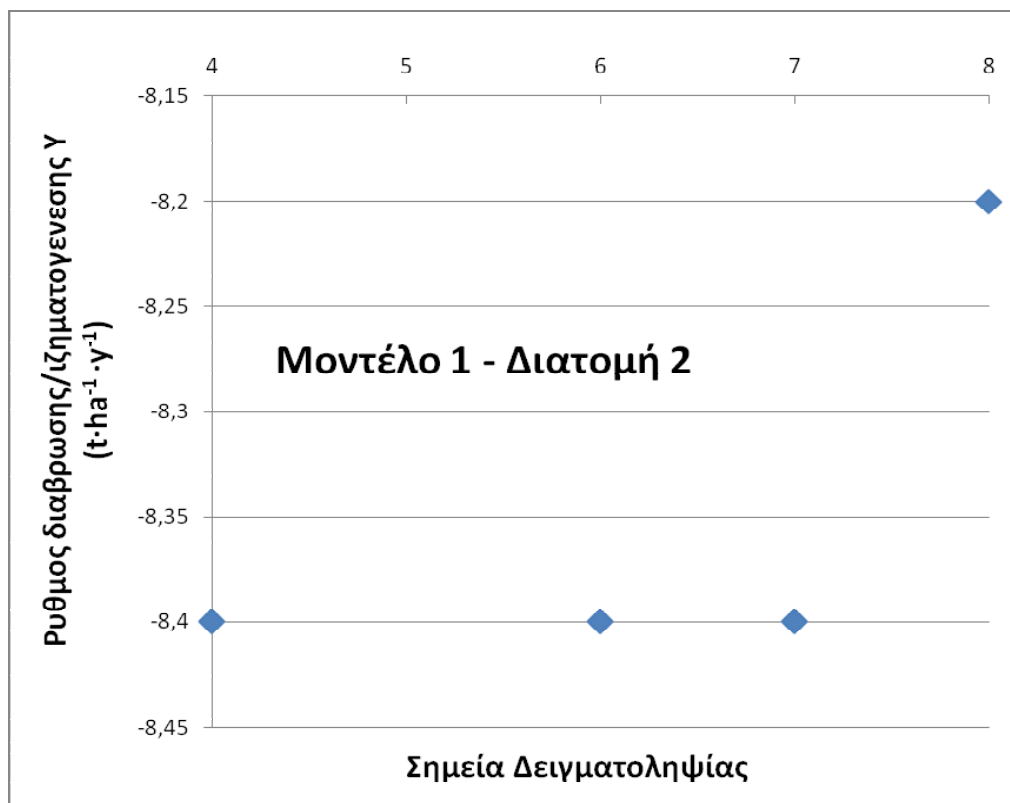


Σχήμα 6.25 Γραφική απεικόνιση του 2^{ου} μοντέλου της 1^{ης} διατομής

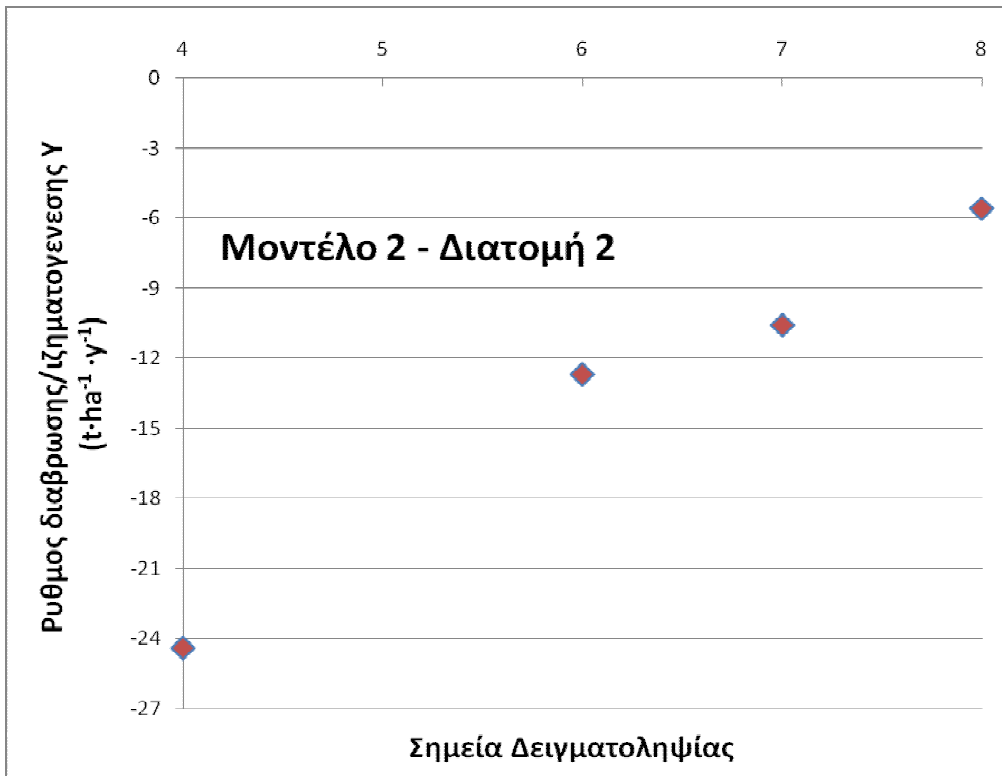


Σχήμα 6.26 Γραφική απεικόνιση του 3^{ου} μοντέλου της 1^{ης} διατομής

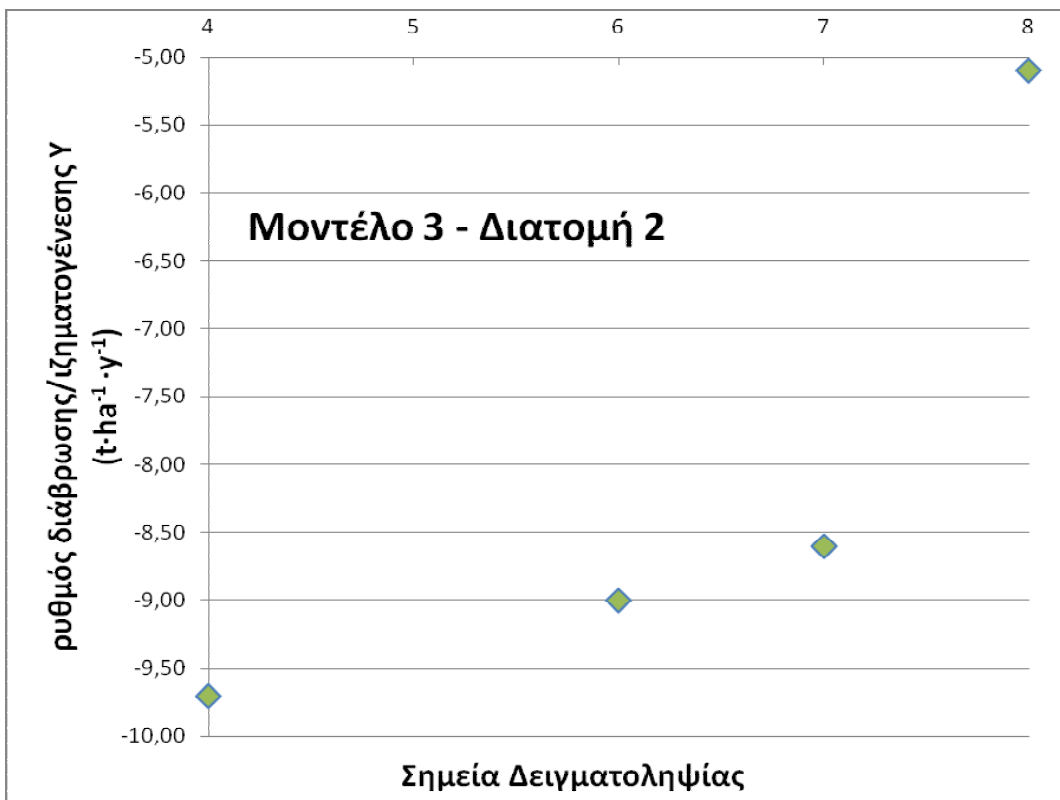
Πίνακας 6.24 – Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 2 ^{ης} διατομής						
A/A	A (Bq / m ²)	Κατάσταση	X (%)	1 ^ο μοντέλο Y (t · ha ⁻¹ · yr ⁻¹)	2 ^ο μοντέλο Y(t · ha ⁻¹ · yr ⁻¹)	3 ^ο μοντέλο Y(t · ha ⁻¹ · yr ⁻¹)
#4	36	Διάβρωση	99	-8.4	-24.4	-9.7
#5	-		-	-	-	-
#6	367	Διάβρωση	92	-8.4	-12.7	-9.0
#7	566	Διάβρωση	88	-8.3	-10.6	-8.6
#8	1517	Διάβρωση	67	-8.2	-5.6	-5.1
Ρυθμός διάβρωσης (t · ha ⁻¹ · yr ⁻¹)				-33.4	-53.3	-32.4



Σχήμα 6.27 Γραφική απεικόνιση του 1^{ου} μοντέλου της 2^{ης} διατομής



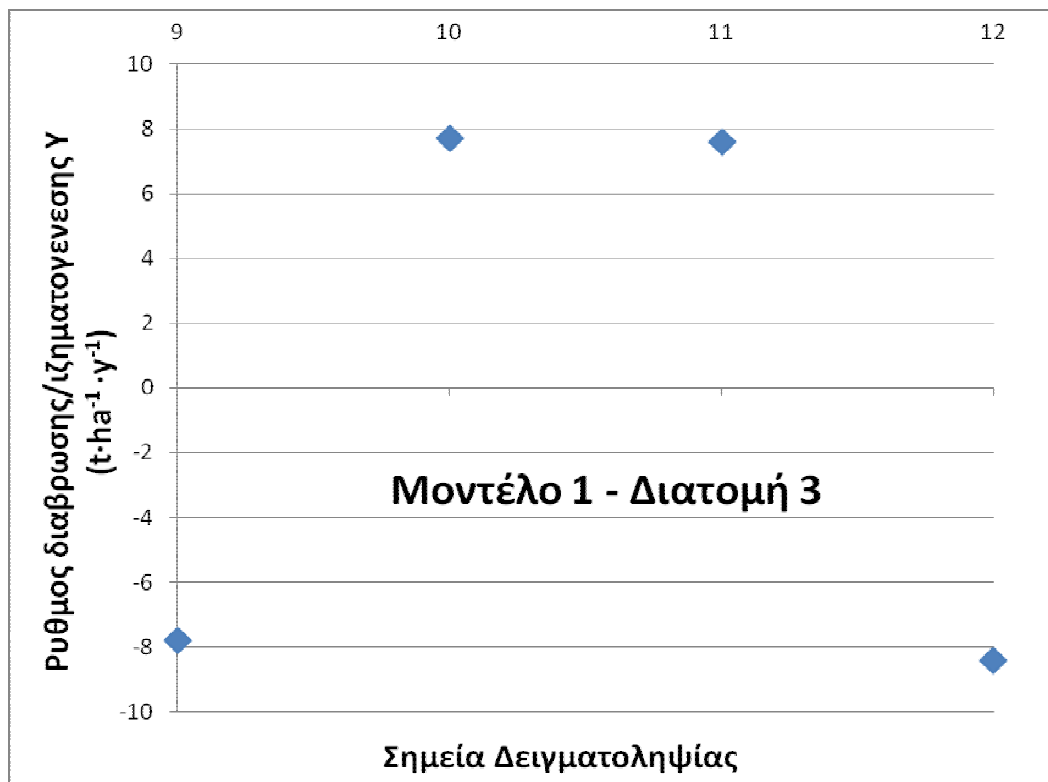
Σχήμα 6.28 Γραφική απεικόνιση του 2^{ου} μοντέλου της 2^{ης} διατομής



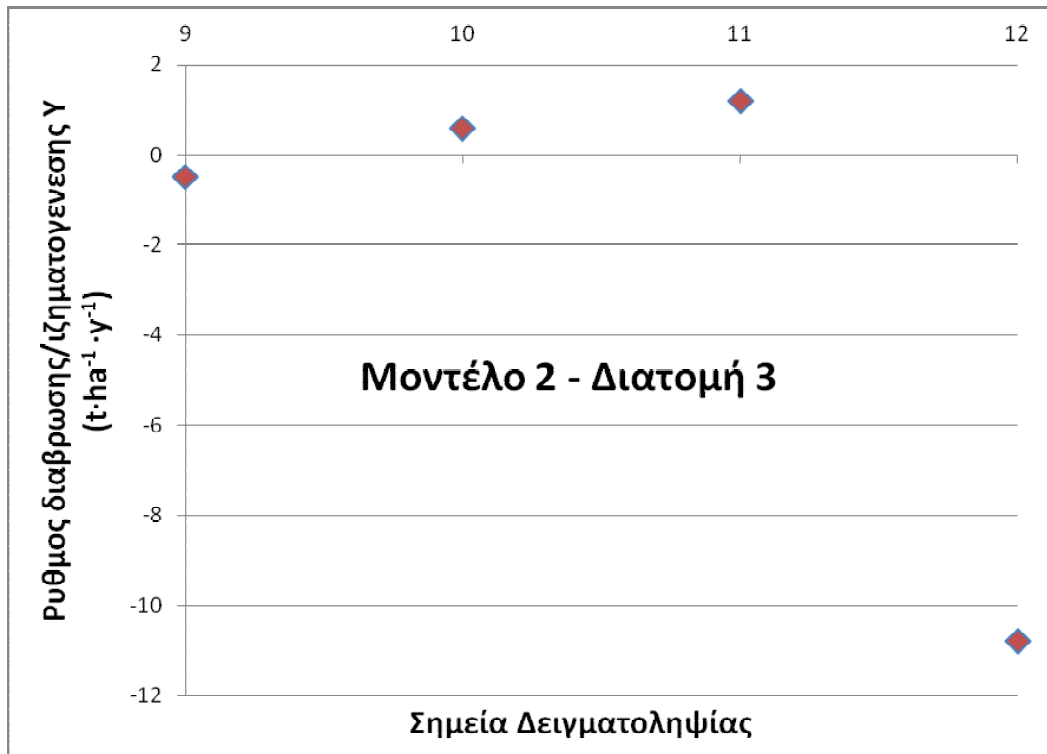
Σχήμα 6.29 Γραφική απεικόνιση του 3^{ου} μοντέλου της 2^{ης} διατομής

Πίνακας 6.25 – Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3^{ης} διατομής

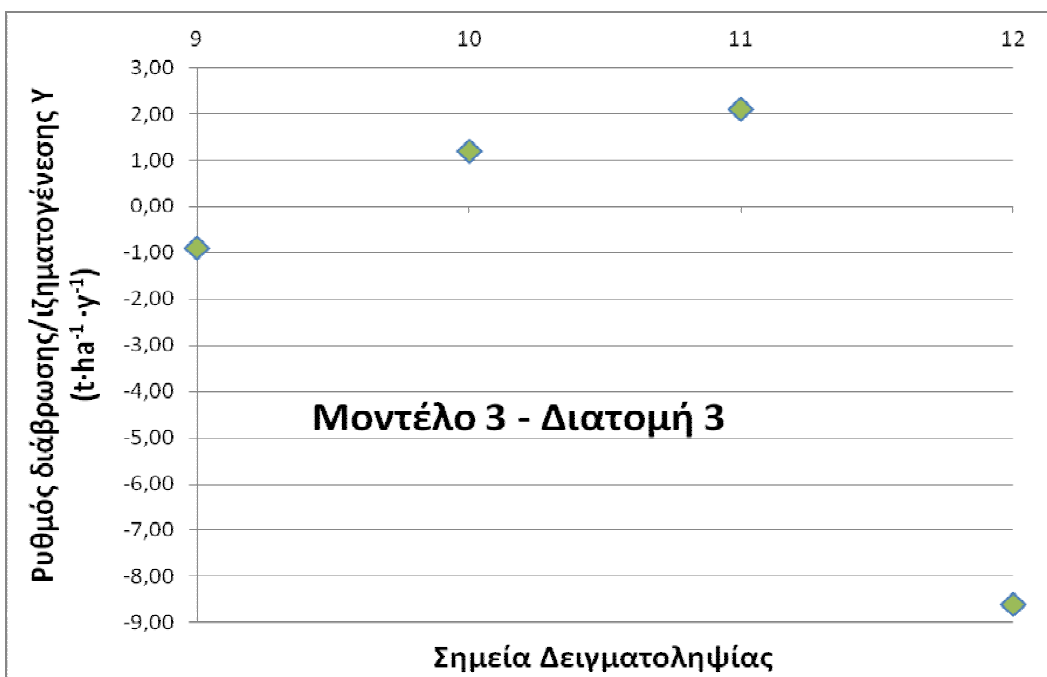
A/A	A (Bq / m ²)	Κατάσταση	X (%)	1 ^ο μοντέλο Y(t·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)	2 ^ο μοντέλο Y(t·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)	3 ^ο μοντέλο Y(t·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)
#9	4224	Διάβρωση	9	-7.8	-0.5	-0.9
#10	5199	Ίζηματογένεση	12	7.7	0.6	1.2
#11	5641	Ίζηματογένεση	22	7.6	1.2	2.1
#12	541	Διάβρωση	88	-8.4	-10.8	-8.6
Ρυθμός διάβρωσης (t·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)				-0.9	-9.5	-0.9



Σχήμα 6.30 Γραφική απεικόνιση του 1^{ου} μοντέλου της 3^{ης} διατομής



Σχήμα 6.31 Γραφική απεικόνιση του 2^{ου} μοντέλου της 3^{ης} διατομής



Σχήμα 6.32 Γραφική απεικόνιση του 3^{ου} μοντέλου της 3^{ης} διατομής

6.5 Συμπεράσματα

6.5.1 Συμπεράσματα επί των υπολογισθέντων τιμών

Στα πλαίσια της ΔΕ έγινε μία επισκόπηση ορισμένων μελετών διάβρωσης του χώματος, που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, για να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και να διαπιστωθεί κατά πόσο ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Στην μελέτη των C. Martinez et. al. (2009), στην Νοτιο-ανατολική Αυστραλία, υπολογίστηκε ο ρυθμός διάβρωσης/ίζηματογένεσης 2 διατομών, με 15 σημεία δειγματοληψίας η κάθε μία. Χρησιμοποίησαν 2 μοντέλα υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Το μοντέλο κατανομής προφίλ και το μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης. Στο μοντέλο κατανομής προφίλ ο υπολογισμός για την 1^η διατομή ήταν $3.99 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ και για την 2^η διατομή ήταν $3.37 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$. Στο μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης ο υπολογισμός για την 1^η διατομή ήταν $1.52 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ και $1.31 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ για την 2^η. Είναι εμφανής η υπερεκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης που υπάρχει στο μοντέλο κατανομής προφίλ. Αυτό ίσως συμβαίνει διότι το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη της ανακατανομή του Cs-137 μέσα στο χώμα, μετά την απόθεσή του, το οποίο είναι λάθος και οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή h_0 . Και η αύξηση του συντελεστή οδηγεί σε υπερεκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης από το μοντέλο (Walling and He, 1999). Επίσης, ίσως υπάρχουν επιπλέον σφάλματα στο μοντέλο κατανομής προφίλ, διότι δεν λαμβάνει υπόψη την απόθεση Cs-137 λόγω του Chernobyl. Οι ρυθμοί διάβρωσης που έχουν υπολογιστεί από αυτή την μελέτη των C. Martinez et. al. (2009), είχαν αρκετή διαφορά με τους ρυθμούς διάβρωσης της ^{37}Cs διατομής της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, ενώ είχαν μεγάλη απόκλιση με τους ρυθμούς των άλλων 2 διατομών.

Στην μελέτη των F. Garcia-Oliva et. al. (1995), στο Μεξικό, υπολογίστηκε ο ρυθμός διάβρωσης/ίζηματογένεσης 3 διατομών σε 4 διαφορετικές χρονολογίες. Η περιοχή που μελετήθηκε ήταν καλλιεργημένη και το μοντέλο που εφαρμόστηκε ήταν το αναλογικό μοντέλο (§ 5.2.1.2.1). Το εύρος των ρυθμών διάβρωσης των διατομών για τις 4 χρονολογίες ήταν από $2.3-23.2 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$. Ενώ το εύρος των ρυθμών ίζηματογένεσης των διατομών ήταν $0.5-4.9 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$. Παρατηρήθηκε ότι αρκετοί ρυθμοί διάβρωσης των διατομών στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, βρίσκονταν μέσα σε αυτό το εύρος.

Στην μελέτη των H. Kato (2010), στην Μογγολία, υπολογίστηκε ο ρυθμός διάβρωσης/ιζηματογένεσης 2 διατομών. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης και οι ρυθμοί διάβρωσης ήταν $1.44 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ για την 1^η διατομή και $0.49 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ για την 2^η διατομή. Παρατηρήθηκε ότι αυτές οι τιμές δεν είχαν αρκετή απόκλιση από αυτές που υπολογίστηκαν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μέσω του μοντέλου διάχυσης και μετανάστευσης.

Στην μελέτη των S.P Theocharopoulos et. al. (2003), που έγινε σε καλλιεργημένη περιοχή στο Μουρίκι Βοιωτίας, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το βελτιωμένο μοντέλο ισορροπίας μάζας (§ 5.2.1.2.3) και υπολογίστηκε ο ρυθμός διάβρωσης/ιζηματογένεσης σε μία διατομή με 24 σημεία δειγματοληψίας. Το εύρος των ρυθμών διάβρωσης στα σημεία δειγματοληψίας ήταν από $6.71-85.55 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$, ενώ το εύρος των ρυθμών ιζηματογένεσης ήταν $1.23-95.78 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$. Ο ρυθμός διάβρωσης της διατομής υπολογίστηκε $18.34 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$. Στην συγκεκριμένη μελέτη φαίνεται η μεγάλη διακύμανση που μπορεί να υπάρξει στην διάβρωση από σημείο σε σημείο, όπως υπήρχε και στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Γενικά, από την εποπτεία στις 4 αυτές μελέτες, παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός διάβρωσης/ιζηματογένεσης του χώματος στα σημεία δειγματοληψίας έχουν εύρος από $0-100 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$, ενώ ο ρυθμός διάβρωσης/ιζηματογένεσης στις διατομές έχει εύρος από $0-24 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$. Οι υπολογισμοί στην παρούσα Διπλωματική Εργασία βρίσκονταν μέσα σε αυτά τα πλαίσια, οπότε τα μοντέλα εφαρμόστηκαν στην σωστή βάση και οι τιμές τους ήταν λογικές. Επίσης παρατηρήθηκε ότι στις μελέτες που εφαρμόστηκε το μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης οι τιμές των ρυθμών ήταν αρκετά μικρότερες σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα. Ίσως αυτό το μοντέλο να αντιπροσωπεύει περισσότερο την πραγματικότητα, καθώς έχει πολλές παραμέτρους που μοντελοποιούν την συμπεριφορά του Cs-137 μετά την απόθεσή του και έχει πολύ λιγότερες παραδοχές σε σχέση με τα άλλα μοντέλα. Οπότε, πιθανόν οι μεγάλες τιμές του ρυθμού διάβρωσης ($>10 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$) που υπολογίζονται από άλλα μοντέλα να είναι υπερεκτιμημένες.

6.5.2 Συμπεράσματα επί των δειγμάτων

Κατ' αρχάς η συγκέντρωση του Cs-137 στα δείγματα της περιοχής προς μελέτη, είχε πολύ μεγάλο εύρος ($36.13-5641.42 Bq / m^2$) και μεγάλη διακύμανση. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η μεγάλη διάβρωση του χώματος που έχει γίνει στην

περιοχή, είναι οφθαλμοφανής. Η διάβρωση δεν είναι ομοιόμορφη σε όλα τα σημεία και είναι μία διαδικασία που γίνεται συνεχώς, οπότε είναι λογικό τα αποτελέσματα της να είναι ανομοιογενή. Λόγω της μεγάλης ανακατανομής του χώματος, υπήρχαν σημεία της μελέτης, όπου η διάβρωση ήταν πολύ μεγάλη, ενώ σε άλλα σημεία υπήρχε ιζηματογένεση. Αυτό πιθανώς έγινε λόγω της μετακίνησης του διαβρωμένου χώματος από τα σημεία με μεγάλη διάβρωση. Επιπλέον, η συγκεκριμένη περιοχή, είχε αρκετές διακυμάνσεις του εδάφους κάτι που επίσης δικαιολογεί το μεγάλο εύρος της συγκέντρωσης Cs-137 στο χώμα.

Επίσης παρατηρήθηκε, ότι τα δείγματα με μεγάλο ποσοστό πετρών (#1, #7, #12), είχαν μικρή συγκέντρωση Cs-137. Αν υποθεθεί ότι το βάθος στο οποίο, ξεκινά το έδαφος να είναι ιδιαίτερα πετρώδες, είναι σταθερό στην περιοχή, τότε ίσως το μεγάλο ποσοστό λίθινων τμημάτων στο δείγμα, να οφείλεται στην διάβρωση του χώματος. Αυτό συμβαίνει διότι όλες οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν σε σταθερό βάθος, οπότε όταν το βάθος δείγματος όπου εμφανίζονται λίθοι, είναι μικρότερο, τότε και η διάβρωση του χώματος θα είναι μεγαλύτερη, γιατί αυτό σημαίνει ότι αρκετά εκατοστά του χώματος θα έχουν απομακρυνθεί.

Παρ' όλα αυτά υπήρχαν δείγματα με μεγάλο ποσοστό χώματος που είχαν επίσης μικρή συγκέντρωση Cs-137 (#4, #6). Οπότε δεν είναι απόλυτο, ότι υπάρχει μεγάλη διάβρωση μόνο όταν υπάρχει μεγάλο ποσοστό λίθων μέσα στο δείγμα. Ένα άλλο ενδεχόμενο είναι, την στιγμή της απόθεσης Cs-137 σε εκείνα τα σημεία, να έγινε διάβρωση του χώματος, οπότε μεγάλο ποσοστό του Cs-137 να μην ενσωματώθηκε στο χώμα εκείνων των σημείων, αλλά να μεταφέρθηκε, λόγω της διάβρωσης, σε ένα άλλο σημείο.

6.5.3 Συμπεράσματα επί των διατομών

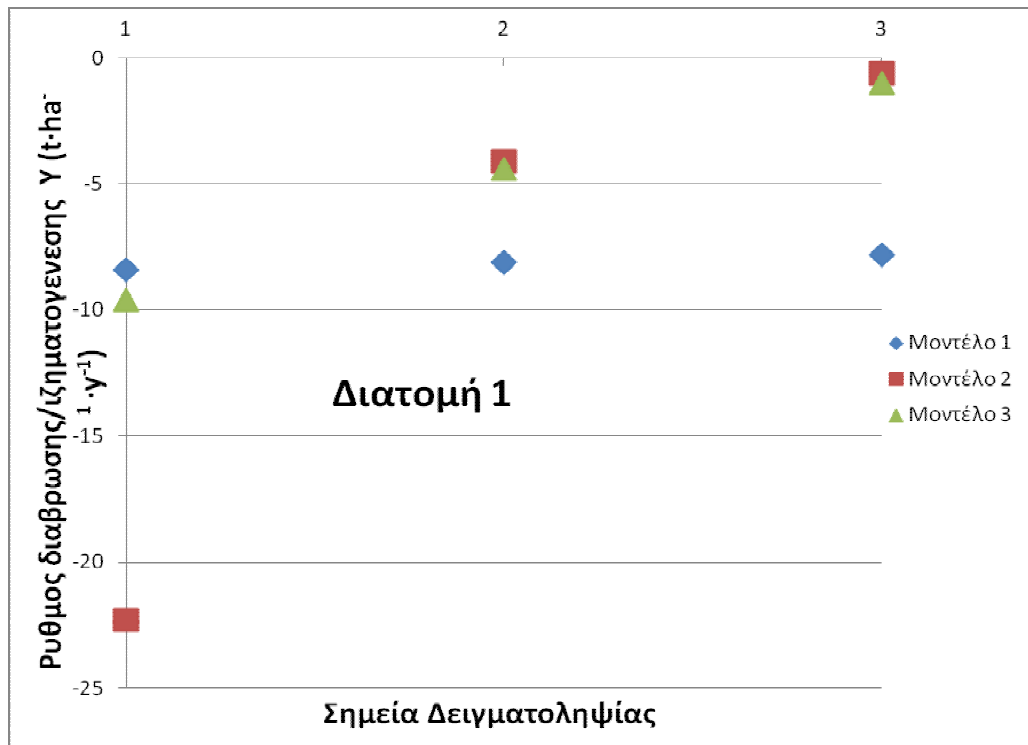
6.5.3.1 1^η διατομή

Στην δειγματοληψία της πρώτης διατομής που πραγματοποιήθηκε συλλέχθηκαν 3 δείγματα από μία περιοχή με αρκετά μεγάλη κλίση, όπως προαναφέρθηκε. Ο ρυθμός διάβρωσης της διατομής που υπολογίστηκε από τα μοντέλα ήταν από $15.0-27.0 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$. Επιπλέον, η ποιοτική συμπεριφορά των 3 μοντέλων είναι κοινή, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.33. Κάτι που σημαίνει ότι πιθανότατα η γενική ποιοτική εκτίμηση είναι σωστή αλλά προφανώς η ποσοτική είναι διαφορετική λόγω των διαφορετικών παραμέτρων κάθε μοντέλου.

Στο 1^ο μοντέλο (εμπειρικό μοντέλο), ο ρυθμός διάβρωσης είναι σχεδόν ίδιος και για τα 3 σημεία. Αυτό συμβαίνει επειδή το μοντέλο είναι πολύ απλοϊκό και έχει ελάχιστη ευαισθησία στις μεταβολές της συγκέντρωσης του Cs-137. Οπότε τα αποτελέσματα του 1^{ου} μοντέλου δεν λήφθηκαν υπόψη, αφού είναι σαφές ότι είναι σχεδιασμένο για την εύρεση της διακύμανσης του ρυθμού διάβρωσης σε μία περιοχή, η οποία έχει κατά μέσο όρο ρυθμό διάβρωσης $8 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$.

Στο 2^ο και στο 3^ο μοντέλο ο ρυθμός διάβρωσης για τα σημεία #2, #3, έχει σχετικά μικρή απόκλιση, οπότε είναι αρκετά πιθανό η εκτίμηση της τιμής να είναι κοντά στην πραγματικότητα. Όμως για το σημείο #1, η διαφορά της εκτίμησης ανάμεσα στα 2 μοντέλα είναι πολύ μεγάλη. Είναι σαφές, ότι όσο μεγαλώνει η διαφορά των συγκεντρώσεων Cs-137, ανάμεσα στην θέση αναφοράς και την θέση που γίνεται διάβρωση, τόσο περισσότερο υπερεκτιμάται ο ρυθμός διάβρωσης από το 2^ο μοντέλο. Αυτό ίσως συμβαίνει, όπως προαναφέρθηκε, διότι το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη της ανακατανομή του Cs-137 μέσα στο χώμα, μετά την απόθεσή του, το οποίο είναι λάθος και οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή h_0 . Και η αύξηση του συντελεστή οδηγεί σε υπερεκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης από το μοντέλο. Ενώ στο 3^ο μοντέλο η ανακατανομή του χώματος μοντελοποιείται στην εξίσωση μέσω των συντελεστών διάχυσης και μετανάστευσης D, V οι οποίοι είναι παράμετροι που απεικονίζουν την ανακατανομή του Cs-137 μέσα στο χώμα. Γι' αυτό τον λόγο μέσω του 3^{ου} μοντέλου υπολογίζεται μικρότερος ρυθμός διάβρωσης στο σημείο #1 που έχει μεγάλη διαφορά συγκέντρωσης Cs-137 ανάμεσα στην θέση αναφοράς και το σημείο δειγματοληψίας ($A_{ref} - A$), ενώ το 2^ο μοντέλο τον υπερεκτιμά κατά πολύ.

Σε αυτή την διατομή, ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο σημείο. Ίσως να ήταν πιο φυσιολογικό το ανώτερο σημείο της διατομής να έχει υποστεί μεγαλύτερη διάβρωση, καθώς βρίσκεται κοντά στο υψηλότερο σημείο του λόφου (Σχ. 6.5) και δεν δέχεται χώμα λόγω διάβρωσης από υψηλότερα σημεία, ώστε να ισοσκελιστεί το ποσό που έχει χάσει λόγω διάβρωσης. Παρ' όλα αυτά τα σημεία #1, #2, έχουν μεγαλύτερη διάβρωση, λόγω ίσως της μεγαλύτερης κλίσης του εδάφους σε αυτά τα σημεία. Όπως φαίνεται στο σκαρίφημα της πλαγιάς στο Παράρτημα 2, το σημείο #3 βρίσκεται υπό μικρή κλίση (10^0), ενώ τα σημεία #1, #2 βρίσκονται υπό μεγαλύτερη κλίση (25^0). Η μεγαλύτερη κλίση του εδάφους, πιθανόν κάνει εντονότερο και το μέγεθος της διάβρωσης.



Σχήμα 6.33 Γραφική απεικόνιση των 3 μοντέλων της 1^{ης} διατομής

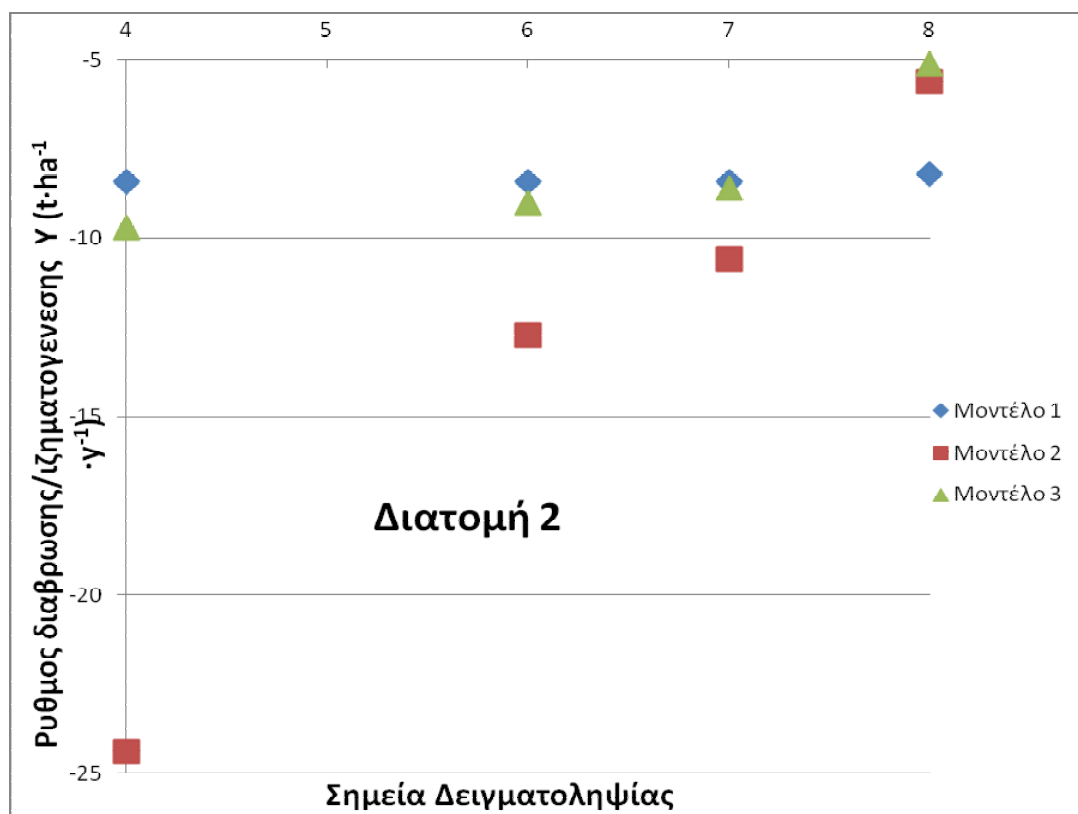
6.5.3.2 2^η διατομή

Στην δειγματοληψία της δεύτερης διατομής που πραγματοποιήθηκε συλλέχτηκαν 5 δείγματα από μία περιοχή με μικρή κλίση (Σχ. 6.5). Ο ρυθμός διάβρωσης που υπολογίστηκε σε αυτήν την διατομή είναι μεγαλύτερος από τις άλλες 2 ($32.4-53.3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$). Η ποιοτική συμπεριφορά των 3 μοντέλων είναι κοινή, όπως και στην 1^η διατομή.

Παρατηρείται και σε αυτήν την διατομή, ότι το εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού είναι ακατάλληλο για την μελέτη που πραγματοποιήσαμε, καθώς ο ρυθμός διάβρωσης έχει ελάχιστες αποκλίσεις σε όλα τα σημεία, όλων των διατομών και η τιμή του είναι σε όλα τα σημεία γύρω στα $8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$. Οπότε δεν λαμβάνεται υπόψη.

Ανάμεσα στο 2^ο και στο 3^ο μοντέλο μετατροπής, ο ρυθμός διάβρωσης έχει μικρή απόκλιση για τα σημεία #6, #7, #8, ενώ η απόκλιση για το σημείο #4 είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης, ο ρυθμός διάβρωσης ολόκληρης της διατομής, έχει αρκετά μεγάλη απόκλιση. Η απόκλιση μεγαλώνει περισσότερο, όσο μεγαλώνει η διαφορά της συγκέντρωσης Cs-137 ανάμεσα στην θέση αναφοράς και το σημείο δειγματοληψίας ($A_{ref} - A$). Αυτό είναι πιθανόν να συμβαίνει για τον ίδιο λόγο που συμβαίνει και

στην πρώτη διατομή. Δηλαδή, επειδή το 2^ο μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη της ανακατανομή του Cs-137 μέσα στο χώμα, μετά την απόθεσή του, το οποίο είναι λάθος και οδηγεί σε υπερεκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης από το μοντέλο. Στην 2^η διατομή ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται από το χαμηλότερο σημείο προς το υψηλότερο, εν αντιθέσει με την 1^η διατομή. Αυτό ίσως συμβαίνει γιατί το υψηλότερο σημείο της διατομής (Σχ. 6.5), δέχεται λιγότερα χώμα λόγω διάβρωσης από υψηλότερα σημεία, από τα ό,τι τα χαμηλότερα σημεία της διατομής. Έτσι στο υψηλότερο σημείο υπάρχει μικρότερος ισοσκελισμός του ποσού χώματος που έχει χάσει λόγω της διάβρωσης. Στο 3^ο μοντέλο οι ρυθμοί διάβρωσης έχουν μικρή απόκλιση από σημείο σε σημείο, ενώ στο 2^ο μοντέλο οι αποκλίσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες. Αυτό συμβαίνει, όπως προαναφέρθηκε, λόγω της μεγαλύτερης ευαισθησίας του 2^{ου} μοντέλου στην αύξηση της τιμής $A_{ref} - A$. Ενώ το 3^ο μοντέλο είναι πιο ομαλό στην αύξηση της τιμής $A_{ref} - A$.



Σχήμα 6.34 Γραφική απεικόνιση των 3 μοντέλων της 2^{ης} διατομής

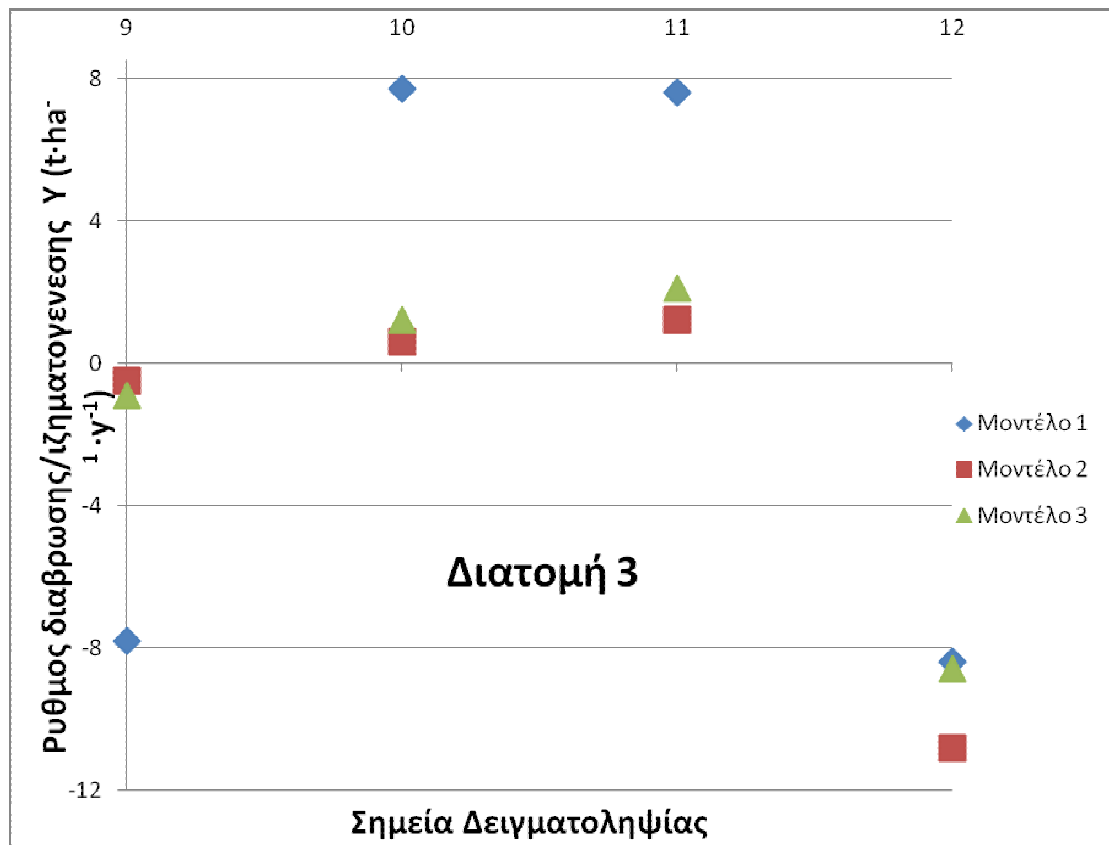
6.5.3.3 3^η διατομή

Στην δειγματοληψία της τρίτης διατομής που πραγματοποιήθηκε συλλέχτηκαν 4 δείγματα από μία περιοχή με πολύ μεγάλη κλίση (Σχ. 6.5). Σε όλα τα μοντέλα υπολογισμού, έχει υπολογιστεί αρκετά μικρότερος ρυθμός διάβρωσης σε σχέση με τις

άλλες διατομές ($0.9-9.5 t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$). Ενώ η ποιοτική συμπεριφορά και των 3 μοντέλων είναι κοινή όπως και στις 2 προηγούμενες διατομές. Οπότε υπάρχει μεγαλύτερη βεβαιότητα, αφού ισχύει και στις 3 διατομές, ότι η ποιοτική εκτίμηση των ρυθμών διάβρωσης σε μία διατομή είναι σωστή. Οι ρυθμοί ανακατανομής του χώματος, από το εμπειρικό μοντέλο δεν λαμβάνονται υπόψη, για τους προαναφερθέντες λόγους. Σε αυτή την διατομή υπάρχει μία διαφοροποίηση σε σχέση με τις άλλες δύο. Τα 2 από τα 4 σημεία της διατομής έχουν υποστεί ιζηματογένεση και όχι διάβρωση, καθώς έχουν συγκέντρωση Cs-137, μεγαλύτερη από την συγκέντρωση Cs-137 στην θέση αναφοράς.

Ανάμεσα στο 2^ο και στο 3^ο μοντέλο, ο ρυθμός διάβρωσης για το σημείο #9 και ο ρυθμός ιζηματογένεσης για τα σημεία #10, #11, έχει σχετικά μικρή απόκλιση, οπότε είναι αρκετά πιθανό η εκτίμηση της τιμής να είναι κοντά στην πραγματικότητα. Όμως για το σημείο #12, η διαφορά της εκτίμησης ανάμεσα στα 2 μοντέλα είναι λίγο μεγαλύτερη και αυτό οφείλεται στην υπερεκτίμηση της διάβρωσης του χώματος από το 2^ο μοντέλο, εξαιτίας των λόγων που έχουν προαναφερθεί.

Στην 3^η διατομή, το υψηλότερο σημείο έχει μεγάλο ρυθμό διάβρωσης, στα επόμενα 2 σημεία έχει πραγματοποιηθεί ιζηματογένεση, ενώ το χαμηλότερο σημείο έχει μικρό ρυθμό διάβρωσης. Μία πιθανή εξήγηση είναι ότι η κλίση του εδάφους είναι πολύ μεγάλη (35°) και το ανώτερο σημείο έχει υποστεί μεγάλη διάβρωση. Και επειδή είναι πολύ κοντά στην κορυφή του λόφου (Σχ. 6.5), δεν έχει μεταφερθεί στο σημείο #12 μεγάλη ποσότητα χώματος από υψηλότερα σημεία, για να ισοσκελιστεί η απώλεια χώματος λόγω της διάβρωσης. Ενώ, στα σημεία #10, #11 που έχουν υποστεί ιζηματογένεση, ίσως έχει μεταφερθεί μεγάλη ποσότητα διαβρωμένου χώματος από το σημείο #9, καθώς αυτό έχει υποστεί μεγάλη διάβρωση. Τέλος ο ρυθμός διάβρωσης στο σημείο #12, είναι αρκετά μικρός, οπότε ίσως το χώμα του που έχει μεταφερθεί λόγω διάβρωσης, έχει ισοσκελιστεί εν μέρει από χώμα που έχει μεταφερθεί από το σημείο #9



Σχήμα 6.35 Γραφική απεικόνιση των 3 μοντέλων της ^{137}Cs διατομής

6.5.4 Συμπεράσματα επί των μοντέλων

Είναι σαφές, όπως προαναφέρθηκε, ότι το 1^ο μοντέλο (εμπειρικό) κάνει λάθος εκτιμήσεις, καθώς είναι πολύ απλοϊκό και έχει σχεδιαστεί για την μελέτη διάβρωσης σε μία συγκεκριμένη περιοχή της Αυστραλίας. Η εφαρμογή του έγινε για να διαπιστωθεί και έμπρακτα ότι είναι ακατάλληλο για άλλες περιοχές. Κάτι που ήταν εμφανές από την μικρή ευαισθησία του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης στις μεταβολές της διαφοράς συγκέντρωσης Cs-137 ανάμεσα στην θέση αναφοράς και στο σημείο δειγματοληψίας ($A_{ref} - A$). Η τιμή του σε όλους τους υπολογισμούς ήταν κοντά στους $8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$, κάτι που σημαίνει ότι αυτή ήταν η μέση τιμή του ρυθμού διάβρωσης στην περιοχή της Αυστραλίας για την οποία προέκυψε.

Το 2^ο μοντέλο (μοντέλο προφίλ κατανομής), υπερεκτίμησε τις τιμές στα σημεία δειγματοληψίας με μεγάλες τιμές $A_{ref} - A$, σε σχέση με το 3^ο μοντέλο (μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης). Το πιο πιθανό είναι ότι η υπερεκτίμηση έγινε λόγω της παραδοχής ότι το Cs-137 δεν ανακατανέμεται μέσα στο χώμα, μετά την απόθεσή του. Η υπερεκτίμηση αυξάνεται, με αύξηση της τιμής X, ενώ η απόκλιση του σε σχέση με το 3^ο μοντέλο είναι μικρή για $X < 20\%$. Επιπλέον, το 2^ο μοντέλο

υποθέτει ότι όλη η επιφανειακή απόθεση Cs-137, έγινε το 1963, επομένως δεν λαμβάνει υπόψη την προοδευτική απόθεση Cs-137 και την ανακατανομή του μέσα στο χώμα καθώς τις θεωρεί μη χρονικά μεταβαλλόμενες. Ακόμα δεν συνυπολογίζει στην απόθεση του Cs-137, το ποσό που κατέπεσε λόγω του ατυχήματος του Chernobyl το 1986, το οποίο στον ευρωπαϊκό χώρο είναι μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος. Όλες αυτές οι απλοποιήσεις οδηγούν σε πολλές αβεβαιότητες και έτσι το τελικό αποτέλεσμα είναι μία προσέγγιση του ρυθμού διάβρωσης/ίζηματογένεσης με μεγάλο σφάλμα. Οπότε πιθανόν δικαιολογούνται οι μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με το μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης.

Το 3^ο μοντέλο (μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης) είναι μία πολυπαραμετρική εξίσωση, η οποία μοντελοποιεί κατά τον βέλτιστο τρόπο την διάβρωση του χώματος. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις φυσικο-χημικές και βιολογικές εργασίες στο χώμα, οι οποίες επιδρούν στην συμπεριφορά του Cs-137 σε σχέση με τον χρόνο. Οπότε στο 3^ο μοντέλο δεν υπάρχει η παραδοχή ότι η ανακατανομή του Cs-137 στο χώμα δεν είναι μεταβαλλόμενη. Επιπλέον, υπάρχει η παράμετρος που απεικονίζει την προοδευτική απόθεση του Cs-137 στο χώμα, συμπεριλαμβανομένου και του Cs-137 από το ατύχημα στο Chernobyl. Ακόμα, συνυπολογίζεται η μείωση της συγκέντρωσης του Cs-137 στο χώμα, λόγω της ραδιενεργού απομείωσης του. Επομένως, το μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης διαπιστώνεται ότι είναι το πιο αξιόπιστο από τα άλλα 2, λόγω των πολλών παραμέτρων του και επειδή λαμβάνει υπόψη το ατύχημα του Chernobyl, το οποίο επηρέασε πολύ τις συγκεντρώσεις του Cs-137 στην Ελλάδα.

7. Επίλογος

7.1 Περίληψη της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία είχε ως αντικείμενο τη μελέτη της αναδιανομής του χώματος στο έδαφος που οδηγεί σε διάβρωση ή ιζηματογένεση, μέσω των ραδιοϊσοτόπων Cs-137, Pb-210, Be-7. Η εργασία μπορεί να χωριστεί σε 2 τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι θεωρητικό, όπου αναλύθηκαν τα βιβλιογραφικά στοιχεία, για αυτή την κατηγορία μελετών. Αρχικά, έγινε μία επισκόπηση του σχεδιασμού και των μεθόδων δειγματοληψίας που χρησιμοποιούνται γενικά για τέτοιου είδους έρευνες. Έγινε αναφορά στις μεθόδους επεξεργασίας και ανάλυσης των δειγμάτων που συλλέγονται, ενώ πραγματοποιήθηκε μία εκτενής έρευνα στα μοντέλα προσδιορισμού της αναδιανομής του χώματος. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούν τις μετρούμενες τιμές των ραδιοϊσοτόπων στο χώμα για να προσδιοριστεί ο ρυθμός διάβρωσης/ιζηματογένεσης του χώματος. Το δεύτερο τμήμα ήταν το πειραματικό μέρος, που ήταν και ο κύριος σκοπός της εργασίας. Δηλαδή, η εφαρμογή των μοντέλων προσδιορισμού της αναδιανομής του χώματος για μία συγκεκριμένη περιοχή, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Αρχικά, επιλέχτηκε η μέθοδος της δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ. Το ραδιοϊσότοπο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ ήταν το Cs-137, οπότε ήταν απαραίτητη η συλλογή χώματος βάθους τουλάχιστον 20cm. Οι μέθοδοι που αναφέρονταν στην βιβλιογραφία καθώς και οι μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί στο παρελθόν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, δεν κρίθηκαν επαρκείς για την συγκεκριμένη μελέτη. Γι' αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκε μία νέα μέθοδος η οποία ήταν ιδιαίτερα εργονομική και χαμηλού κόστους. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία δοκιμαστική δειγματοληψία στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου για να αξιολογηθεί η μέθοδος δειγματοληψίας που αναπτύχθηκε, καθώς και για να διαπιστωθεί αν υπάρχει έλλειψη δεδομένων για την εφαρμογή των μοντέλων. Τελικώς, η μέθοδος δειγματοληψίας κρίθηκε επαρκής για την συγκεκριμένη μελέτη, ενώ και η εφαρμογή των μοντέλων αναδιανομής του χώματος πραγματοποιήθηκε με επιτυχία και τα αποτελέσματα είχαν λογική βάση.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε το τελικό και σημαντικότερο στάδιο της εργασίας, που ήταν η μελέτη μίας περιοχής με εμφανή δείγματα σοβαρής διάβρωσης του εδάφους. Η περιοχή επιλέχτηκε μέσω του Google Earth και ήταν κοντά στην Λαμία. Εκεί πραγματοποιήθηκε συλλογή δειγμάτων από την περιοχή προς μελέτη και την

περιοχή που επιλέχτηκε ως θέση αναφοράς, ενώ στη συνέχεια έγινε επεξεργασία και ανάλυσή τους στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την μέτρηση της ραδιενέργειας του Cs-137 (Bq/kg). Για τον υπολογισμό του ρυθμού αναδιανομής του χώματος χρησιμοποιήθηκαν 3 μοντέλα υπολογισμού με βάση το Cs-137. Ο στόχος ήταν να εφαρμοστούν τα μοντέλα και να προκύψουν λογικά συμπεράσματα για την λειτουργία τους, για τις αβεβαιότητές τους καθώς και να συγκριθούν και να αξιολογηθούν οι υπολογισθέντες τιμές. Πρέπει να επισημανθεί ότι όλα τα μοντέλα στηρίζονται στην παραδοχή ότι το Cs-137 στο έδαφος οφείλεται στην πυρηνικές δοκιμές και για το λόγο αυτό ορισμένα μοντέλα έπρεπε να υποστούν κατάλληλες τροποποιήσεις.

7.2 Γενικά συμπεράσματα

Η μέθοδος δειγματοληψίας κρίθηκε ιδιαίτερα επιτυχής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αντίστοιχες μελέτες διάβρωσης που έχουν ως βάση το Cs-137. Ίσως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μελέτες με βάση το Pb-210 καθώς και τα 2 αυτά ραδιοϊσότοπα φτάνουν σε μεγάλα βάθη (>15cm), στα οποία μπορεί να συλλέξει δείγματα η συσκευή δειγματοληψίας που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Για μελέτες με βάση το Be-7 η συσκευή δεν είναι κατάλληλη, καθώς το Be-7 έχει μικρό χρόνο ημιζωής και βρίσκεται κυρίως στο επιφανειακό χώμα. Οπότε χρειάζεται μία μέθοδος δειγματοληψίας που να μπορεί να συλλέξει με ακρίβεια δείγματα με μικρό κατά βάθος βήμα (5-10mm). Τα μειονεκτήματα της μεθόδου ήταν η μεγάλη φθορά της συσκευής μετά το τέλος των δειγματοληψιών καθώς και η επίπονη διαδικασία της διεύθυνσης της συσκευής στο χώμα.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης/ίζηματογένεσης του χώματος στην περιοχή χρησιμοποιήθηκαν 3 μοντέλα υπολογισμού της αναδιανομής του χώματος για ακαλλιέργητες περιοχές, με βάση το Cs-137. Η περιοχή που μελετήθηκε, εξετάστηκε τμηματικά, σε 3 διατομές. Σε κάθε διατομή συλλέχθηκαν 3-5 δείγματα και υπολογίστηκε ο ρυθμός διάβρωσης/ίζηματογένεσης για κάθε σημείο αλλά και για ολόκληρη την διατομή. Γενικά, οι τιμές των αποτελεσμάτων ήταν μέσα στα λογικά πλαίσια, όπως διαπιστώθηκε και από την σύγκρισή τους με αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών. Η ποιοτική συμπεριφορά των 3 μοντέλων ήταν κοινή για όλες τις διατομές, όμως η ποσοτική τους ήταν προφανώς διαφορετική λόγω των διαφορετικών παραμέτρων του κάθε μοντέλου.

Το 1^ο μοντέλο (εμπειρικό) ήταν ακατάλληλο για την μελέτη διάβρωσης που πραγματοποιήθηκε καθώς είναι σχεδιασμένο για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης σε μία συγκεκριμένη περιοχή της Αυστραλίας. Παρ' όλα αυτά χρησιμοποιήθηκε για να διαπιστωθεί και έμπρακτα η ακαταλληλότητά του για την μελέτη της παρούσας ΔΕ. Κάτι που τελικά αποδείχτηκε μέσω των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν.

Το 2^ο μοντέλο (κατανομής προφίλ) έχει αρκετές παραδοχές με αποτέλεσμα οι υπολογισμοί του να έχουν μεγάλη αβεβαιότητα. Αυτές είναι ότι λαμβάνει υπόψη μόνο το Cs-137 που έχει αποθεθεί λόγω των πυρηνικών δοκιμών και όχι αυτό που έχει αποθεθεί εξαιτίας του ατυχήματος του Chernobyl. Επιπλέον, υποθέτει ότι η συνολική απόθεση του Cs-137 έγινε το 1963 και δεν ήταν χρονικά μεταβαλλόμενη. Γενικά, αυτό το μοντέλο υπερεκτίμησε τους ρυθμούς διάβρωσης/ιζηματογένεσης του χώματος στα σημεία δειγματοληψίας, σε σχέση με το 3^ο μοντέλο υπολογισμού (διάχυσης και μετανάστευσης).

Το 3^ο μοντέλο (διάχυσης και μετανάστευσης) μοντελοποιεί την προοδευτική ανακατανομή του Cs-137 στο χώμα εξαιτίας των φυσικών και βιολογικών διεργασιών που συμβαίνουν σε αυτό. Επίσης, σημαντικό είναι ότι λαμβάνει υπόψη την χρονικά μεταβαλλόμενη απόθεση του Cs-137 λόγω των πυρηνικών δοκιμών, αλλά και λόγω του Chernobyl, που έχει επηρεάσει πολύ τον ελληνικό χώρο. Οι εκτιμήσεις των ρυθμών αναδιανομής του χώματος από το συγκεκριμένο μοντέλο δείχνουν να είναι οι πιο σωστές σε σχέση με τα άλλα μοντέλα, εξαιτίας των πολλών παραγόντων που λαμβάνει υπόψη το μοντέλο, αλλά και των πολλών παραδοχών που έχουν τα άλλα δύο.

Εν κατακλείδι, η εφαρμογή των μοντέλων ήταν επιτυχής, προέκυψαν πολλά αποτελέσματα, εξήχθησαν πολύτιμα συμπεράσματα που μπορούν να αποτελέσουν εφαλτήριο για ανάλογες μελλοντικές μελέτες.

7.3 Προοπτικές για μελλοντικές εργασίες

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορεί εξελιχθεί περαιτέρω. Το αντικείμενο με το οποίο μπορεί να ασχοληθούν επόμενες μελέτες είναι η εφαρμογή μοντέλων υπολογισμού για τα άλλα 2 ραδιοϊσότοπα (Pb-210, Be-7), που δεν έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αυτό μπορεί να γίνει για σύγκριση των αποτελεσμάτων τους, με αυτά της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Επίσης, μπορεί να

γίνει μελέτη της διάβρωσης του χρώματος σε καλλιεργημένες περιοχές, κάτι που βέβαια συναντά πολλαπλές δυσκολίες, αλλά και σε αυτήν την περίπτωση θα έχει ενδιαφέρον η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Άλλο ένα αντικείμενο μελέτης, μπορεί να είναι ανάλυση ολόκληρων των δειγμάτων, χωρίς να πραγματοποιηθεί κοσκίνισμα, για να διαπιστωθεί κατά πόσο η παρουσία των λίθων αλλοιώνει το αποτέλεσμα της μελέτης. Ακόμα, θα μπορούσε να γίνει ανάλυση του τμήματος του χρώματος που έχει διάμετρο κόκκων μεγαλύτερη από 2mm. Καθώς στην παρούσα διπλωματική εργασία, αυτό το τμήμα δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου. Η ανάλυσή του μπορεί να γίνει, όντας το τμήμα αυτούσιο ενώ μπορεί να πραγματοποιηθεί και ανάλυση αφού έχει γίνει θραύση των λίθων. Η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων μπορεί να έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Η βελτιστοποίηση της μεθόδου δειγματοληψίας που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, ή η εύρεση μίας νέας μεθόδου, θα μπορούσε επίσης να αποτελέσει νέο αντικείμενο μελέτης. Ειδικά, για τις περιπτώσεις μελέτης της διάβρωσης μέσω του Be-7 και του Pb-210, ίσως είναι αναγκαία η εύρεση μίας νέας μεθόδου δειγματοληψίας, καθώς οι ιδιότητές τους και η συμπεριφορά τους στο χρώμα είναι πολύ διαφορετική από του Cs-137.

Βιβλιογραφία

1. 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.
2. Anderson, J. M., & Ingram, J. S. I. (1993). Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods, Wallingford: CAB International.
3. Auerswald, K., & Schimmack, W. (2000). Element-pool balances in soils containing significant rock fragments. *Catena*, 40, 279–290.
4. Bachhuber, H., Bunzl, K., & Schimmack, W. (1982). The migration of Sr-90 and Cs-137 in multilayered soils: results from batch, column, and fallout investigations. *Nuclear Technology*, 59, 291–301.
5. Bates, T.E. (1993). Soil handling and preparation. In M. R. Carter (Ed.), *Soil sampling and methods of analysis* (pp. 19–24). Boca Raton: Lewis Publishers.
6. Blake, W.H., D.E. Walling, and Q. He. (1999). Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations. *Applied Radiation and Isotopes* 51(5):599-605.
7. Bunzl, K., Schimmack, W., Belli, M., & Riccardi, M. (1997). Sequential extraction of fallout radiocesium from the soil: Small scale and large scale spatial variability. *Journal of Radioanalysis and Nuclear Chemistry*, 226, 47–53.
8. Cambay, R. S., Playford, K., & Carpenter, R.C. (1989). *Radioactive fallout in air and rain: results to the end of 1988*. UK Atomic Energy Authority report AERE-R 10155. London: HMSO.
9. Campbell, B. L., Loughran, R. J., & Elliott, G. L. (1988). A method for determining sediment budgets using caesium-137. In M. P. Bordas and D. E. Walling (Eds.), *Sediment budgets*. International Association of Hydrological Sciences Publication 174, 171–179.
10. Crickmore, M. J., Tazioli, G. S. Appleby, P. G., & Oldfield, F. (1990). The use of nuclear techniques in sediment transport and sedimentation problems, IHP-III Project 5.2 SC-90/WS-49. Paris: UNESCO
11. Dahlman, R. C., & Auerbach, S.I. (1968). Preliminary estimation of erosion and radiocesium redistribution in a fescue meadow, ORNL-TM-2343. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory.
12. Dahm H, Niemeyer J, Schröder D.(2002). Application of the Weibull distribution to describe the vertical distribution of cesium-137 on a slope

- under permanent pasture in Luxembourg. *J Environ Radioact.* 2002;63(3):207-19.
13. Davis ROE, Bennett HH (1927) Grouping of soils on the basis of mechanical analysis. United States Department of Agriculture Departmental Circulation No. 419.
 14. De Jong, E., Begg, C. M., & Kachanoski, R. G. (1983). Estimates of soil erosion and deposition from Saskatchewan soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 63, 607–617.
 15. De Roo, A. P. J. (1991). The use of as a tracer in an erosion study in South Limburg (the Netherlands) and the influence of Chernobyl fallout. *Hydrological Process* 5, 215–217.
 16. Eberhardt, L. L., & Thomas, J. M. (1991). Designing environmental field studies. *Ecological Monographs*, 61, 53–73.
 17. Elliott, G. L., Campbell, B. L., & Loughran. R. J. (1990). Correlalion of erosion measurements and soil caesium-137 content. *International Journal of Radiation and Applied Instrumentation (A) Applied Radiation and Isotopes*, 41, 713–717.
 18. F. Zapata (ed. 2002). Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides © 2002 IAEA.
 19. Foster, A. M. Gurnell and B.W. Webb (Eds.), *Sediment and water quality in river catchments* (pp.189–205). Chichester: Wiley.
 20. Fredericks, D. J., & Perrens, S. J. (1988). *Estimating erosion using caesium-137: II Estimating rates of soil loss. IAHS publication 174* (pp. 225–231). Wallingford: IAHS Press.
 21. Garcia-Oliva F., R. Martinez Lugo, J. M. Maass (1995). Long-term net soil erosion as determined by ¹³⁷Cs redistribution in an undisturbed and perturbed tropical deciduous forest ecosystem. *Geoderma* Volume: 68, Issue: 1-2, Publisher: Elsevier, Pages: 135-147
 22. Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. New York: Van Nostrand Reinhold.
 23. He and Walling (1996), Interpreting particle size effects in the adsorption of ¹³⁷Cs and unsupported ²¹⁰Pb by mineral soils and sediments, *Journal of Environmental Radioactivity* (1996), Volume: 30, Issue: 2, Pages: 117-137
 24. He, Q., & Walling, D. E. (1997). The distribution of fallout ¹³⁷ Cs and ²¹⁰ Pb in undisturbed and cultivated soils. *Applied Radiation and Isotopes*, 48, 677–690.
 25. Kachanoski, R. G. (1987). Comparison of measured soil ¹³⁷-cesium losses and erosion rates. *Canadian Journal of Soil Science*, 67, 199–203.

26. Kato, H. Onda, Y. Tanaka (2010). Using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex measurements to estimate soil redistribution rates on semi-arid grassland in Mongolia. *Geomorphology* Volume 114 Issue 4 Page(s) 508-519
27. Hurlbert, S. A. (1984). Pseudoreplication and the design of ecological field experiments, *Ecological Monographs*, 54, 187–211.
28. Lettner, H., Bossew, P., & Hubmer, A. K. (2000). Spatial variability of fallout Caesium-137 in Austrian alpine regions, *Journal of Environmental Radioactivity*, 47, 71–82.
29. Lester R. Brown and Edward C. Wolf, *Soil Erosion: Quiet Crisis in the World Economy*, Worldwatch Paper 60 (Washington, DC: 1984)
30. Longmore, M. E. (1982). The caesium-137 dating technique and associated applications in Australia – A review. In W. Ambrose and P. Duerden (Eds.), *Archaeometry: an Australasian perspective* (pp. 310-321). Canberra: Australian National University Press.
31. Knatko, V. A., Skomorokhov, A. G., Asimova, V. D., Strakh, L. I., Bogdanov, A. P., & Mironov, V. P. (1996). Characteristics of ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, and ^{239,240}Pu migration in undisturbed soils of Southern Belarus after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 30, 185–196.
32. Loughran, R. C, & Campbell, B. L. (1995). The identification of catchment sediment sources. In I. D. L.
33. Martinez C., G R Hancock, J D Kalma (2009). Comparison of fallout radionuclide (caesium-137) and modelling approaches for the assessment of soil erosion rates for an uncultivated site in south-eastern Australia, Volume: 151, Issue: 3- 4, Publisher: Elsevier B.V., Pages: 128-140
34. McGee, E. J., Keatinge, M. J., Synnott, H. J., & Colgan, P. A. (1995). The variability in fallout content of soils and plants and the design of optimum field sampling strategies. *Health Physics*, 68, 320-327.
35. Nagle, G. N., Lassoie, J. P., Fahey, T. J., & McIntyre, S.C. (2000). The use of caesium-137 to estimate agricultural erosion on steep slopes in a tropical watershed. *Hydrological Proceedings*, 14, 957–969.
36. Owens P.N.; Walling D.E.; Qingping H (1996). The Behaviour of Bomb-Derived Caesium-137 Fallout in Catchment Soils *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 32, Number 3, 1996 , pp. 169-191(23)
37. Owens, Desmond, Walling (1997), The use of a numerical mass-balance model to estimate rates of soil redistribution on uncultivated land from ¹³⁷Cs measurements, *Journal of Environmental Radioactivity* Volume 40, Issue 2, 1 August 1998, Pages 185-203
38. Pegoyev, A. N., & Fridman, S. D. (1978). Vertical profiles of cesium-137 in soils (English translation). *Pochvoveteniye* 8, 77–81.

39. Pennock D.J and Appleby P.G (2002), F. Zapata (ed.), Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, 59–65. © 2002 IAEA.
40. Peterman, R. M. (1990). Statistical power analysis can improve fisheries research and management. *Canadian Journal of Fish and Aquatic Science*, 47, 2–15.
41. Quine, T. A., & Walling, D. E. (1991). Rates of soil erosion on arable fields in Britain: quantitative data from caesium-137 measurements. *Soil Use and Management* 7, 169–176.
42. Quine T. A., A. Navas, D. E. Walling, J. Machin (1994). Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near las bardenas in the central Ebro river Basin, Spain. *Land Degradation & Development* Volume 5, Issue 1, pages 41–55, April 1994
43. R. Lal (2001). Soil degradation by erosion, *land degradation & development*, 12: 519-539
44. Reynolds, W. D., Gillham, R. W., & Cherry, J. A. (1982). Evaluation of distribution coefficients for the prediction of strontium and cesium migration in a uniform sand. *Canadian Geotechnology Journal*, 19, 92–103.
45. Ritchie, J. C., & McHenry, J. R. (1975). Fallout Cs-137: a tool in conservation research. *Journal of Soil and Water Conservation*, 30, 283-286
46. Rogowski , A. S., & Tamura T. (1970a). Environment almobility of cesium-137. *Radiation Botany*, 10, 35–45.
47. Rogowski, A. S., & Tamura T. (1970b). Erosional behavior of cesium-137. *Health Physics*, 18, 467–477
48. Schuller, P., Iroume, A., Walling, D.E., Mancilla, B., Castillo, A., and Trumper, R.E. (2006). Use of Berryllium-7 to document soil redistribution following forest harvest operations. *J. Environ. Qual.* 35: 1756-1763
49. Sutherland, R. A. (1994). Spatial variability of and the influence of Cs sampling on estimates of sediment redistribution, *Catena*, 21, 57–71.
50. Sutherland, R. A. (1996). Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference locations: a literature review. *Hydrological Proceedings*, 10, 43–53.
51. Sutherland, R.A., Kowalchuk, T.A., & de Jong, E. (1991). Cesium-137 estimates of sediment redistribution by wind. *Soil Science*, 151, 387–396.
52. Theocharopoulos S. P., H. Florou, D.E. Walling, H. Kalantzakos, M. Christou^a, P. Tountas^a, T. Nikolaou^a (2003). Soil erosion and deposition rates in a cultivated catchment area in central Greece, estimated using the ¹³⁷Cs technique. *Soil and Tillage Research* Volume 69, Issues 1-2, February 2003, Pages 153-162

53. Vincent, K. R., & Chadwick, O. A. (1994). Synthesizing bulk density for soils with abundant rock fragments. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 455–464.
54. Walling, D. E., & Quine, T. A. (1992). *The use of caesium-137 measurement in soil erosion surveys, IAHS publication 210* (pp. 143–152). Wallingford: IAHS Press
55. Walling, D. E., & Quine, T. A. (1993). Use of caesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation: handbook for the application of the caesium-137 technique. Exeter: University of Exeter.
56. Walling, D. E., & Quine, T. A. (1993). Use of caesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation: Handbook for the application of the caesium-137 technique. Exeter: University of Exeter.
57. Walling, D. E., & Quine, T. A. (1995). The use of fallout radionuclides in soil erosion investigations. In *Nuclear techniques in soil-plant studies for sustainable agriculture and environmental preservation, IAEA Publication STI/PUB/947* (pp. 598–619). Vienna: IAEA.
58. Walling, D. E., & He, Q. (1997). Models for converting measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and uncultivated soils. Report to the IAEA as a contribution to the IAEA Co-ordinated
59. Walling, D. E. & He, Q. (1997). Use of fallout in investigations of overbank deposition on river floodplains. *Catena*, 29, 263–282.
60. Walling, D.E., & He, Q. (1999). Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality*, 28, 611–622.
61. Walling, D.E., Y. Zhang, and Q. He . Models for Converting Radionuclide (¹³⁷Cs, Excess ²¹⁰Pb , and ⁷Be) Measurements to Estimates of Soil Erosion and Deposition Rates
62. Walling, D. E. and He, Q. (1999). Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land. *Soil Sci. Am. J.* **63**:1404-1412
63. Walling, D. E., He, Q. and Blake, W. H. (1999). Use of ⁷Be and ¹³⁷Cs measurements to document short-term and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land. *Water Resource Research* 35: 3865-3874.
64. Walling, D. E., & He, Q. (2001). *Models for converting ¹³⁷Cs measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and undisturbed soils (including software for model implementation)*. Report to IAEA. Exeter: University of Exeter.

65. Walling, D.E., Collins, A.L. and Sickingabula, H.M. (2003). 'Using unsupported lead- 210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment.' *Geomorphology* **52**, 193-213.
66. Yang, H., Du, M. Chang, Q. Minami, K., & Hatta, T. (1998.) Quantitative model for estimating soil erosion rates using *Pedosphere*, **8**, 211–220.
67. Yang, H., Du, M., Zhao, Q., Minami, K., & Hatta, T. (2000). A quantitative model for estimating mean annual soil loss in cultivated land using measurements. *Soil Science and Plant Nutrition*, **46**,69–79.
68. Zhang, X. B., Higgitt, D.L., & Walling, D. E. (1990). A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China. *Hydrological Science Journal*, **35**, 267–276.
69. Διαφάνειες μαθήματος Ραδιοπεριβαλλοντική ανάλυση και προστασία
70. Παλαμάρα Ελένη , Διπλωματική εργασία Διερεύνηση της επίδρασης της μεθοδολογίας προετοιμασίας δειγμάτων χώματος, στον προσδιορισμό της φυσικής και τεχνητής τους ραδιενέργειας. ΕΠΤ-ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
71. Παπαδάκος Γ., Δ.Δ. υπό εκπόνηση.
72. 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.
73. Σφακιανάκη Μ., Μαγαλιού Κ., Μπότσαρης Ι. 2009. Έδαφος: (Διάβρωση – Ερημοποίηση – Ρύπανση. Προγράμματα ανοικτών περιβαλλοντικών τάξεων «Καλλιστώ»)

Παράρτημα 2 – Φόρμες Δειγματοληψιών

Περιοχή Μεγέτης

Α/Α	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΩΡΑ	ΘΕΣΗ	ΜΑΖΑ (gr)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1	1	21/6/11	11:00	1η διατομή κατω σημείο		Βαθός 0-20cm
2	2	"	"	1η διατομή ενδιάμεσο σημείο		"
3	3	"	11:15	1η διατομή ανω σημείο		"
4	4	"	11:30	2η διατομή ανω σημείο		"
5	5	"	11:35	2η διατομή ενδιάμεσο σημείο		"
6	6	"	"	"		"
7	7	"	12:00	"		"
8	8	"	12:05	2η διατομή κατω σημείο		"

ΣΕΛΙΔΑ: 1

A/A	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟ-ΛΗΨΙΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΩΡΑ	ΘΕΣΗ	ΜΑΖΑ (gr)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
9	9	21/6/11	12:30	3η διατομή κατω σημείο		Βαθός 0-20cm
10	10	11	12:45	3η διατομή ενδιάμεσο σημείο		11
11	11	11	13:00	11		11
12	12	11	13:15	3η διατομή ονω σημείο		11

ΣΕΛΙΔΑ: 2

Θεση αναφοράς

A/A	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟ-ΛΗΨΙΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΩΡΑ	ΘΕΣΗ	ΜΑΖΑ (gr)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1		21/6/11	15:15	Θεση αναφοράς		Βαθός 0-2cm
2		11	11	11		2-4cm
3		11	11	11		4-6cm
4		11	11	11		6-8cm
5		11	11	11		8-10cm
6		11	11	11		10-12cm
7		11	11	11		12-14cm
8		11	11	11		14-16cm

ΣΕΛΙΔΑ: 3

Α/Α	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟ-ΛΗΨΙΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΩΡΑ	ΘΕΣΗ	ΜΑΖΑ (gr)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
9		21/6/11	15:15	Θέση αναφοράς		16-18cm
10		"	"	"		18-20cm
		"	"	"		
		"	"	"		
		"				
		"				
		"				

ΣΕΛΙΔΑ: 4

ΘΕΣΗ: 1η Διατομή

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 21/6/11

A/A 1-3

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ: Βορ. 22,38027

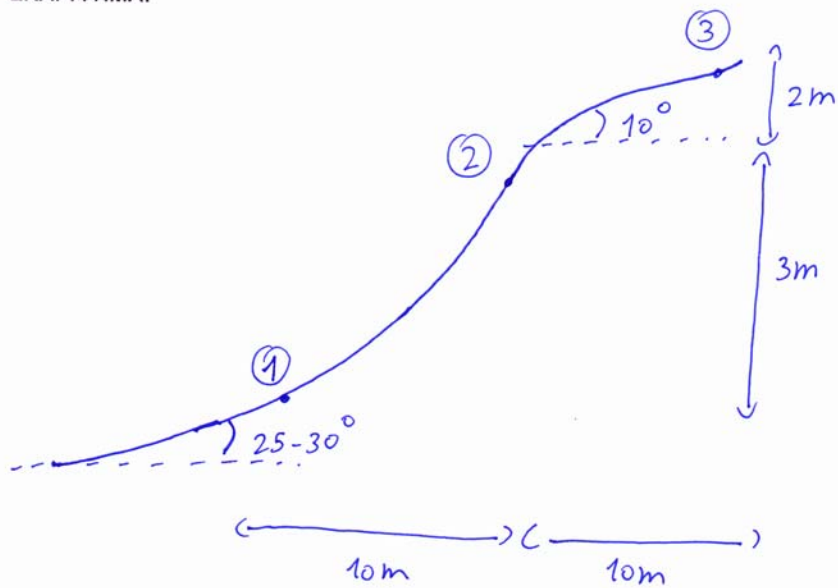
ΩΡΑ: 11:00 - 11:30

Αν. 38,99132

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΕΣ:

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ: 1-3

ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ:



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

ΘΕΣΗ: 2η Διατομή

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 21/6/11

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ: Βορ. 22,38027

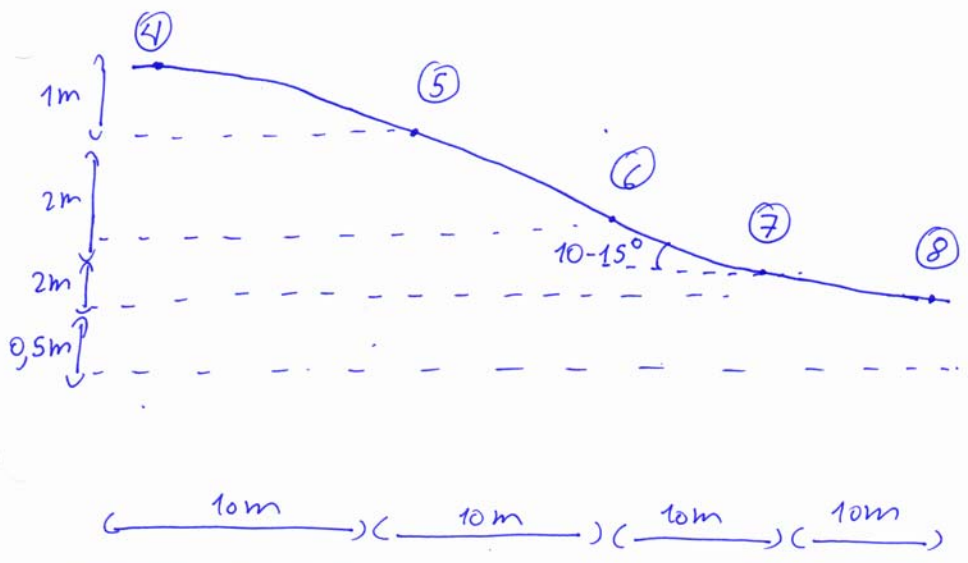
ΩΡΑ: 11:35 - 12:30

~~38,99132~~ 38,99132

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΕΣ:

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ:
4-8

ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ:



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

ΘΕΣΗ: 3η Διατομή

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 21/6/11

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ: Βορ. 22,38027

ΩΡΑ: 12:30 - 13:15

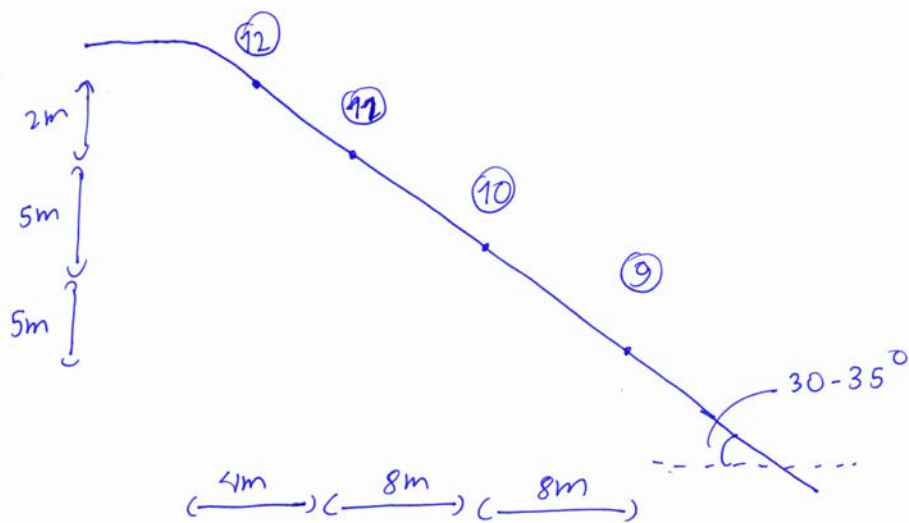
Αν. 38,99132

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΕΣ:

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ:

9 - 12

ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ:



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: — Πολύ μεγάλη κλίση

— Κορυφή εμφανώς διαβρωμένη — πολύ πετρώδης

— Δυσκολία στην συλλογή του δείγματος 12

— Η κορυφή είναι ίδια με τις διατομές 1

