



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**Χρήση φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών
ισοτόπων στη μελέτη περιβαλλοντικών
διεργασιών στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της Αρετής Σπανάκου

Επιβλέπων: Μ. Ι. Αναγνωστάκης
Αν. Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος, 2017



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**Χρήση φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών
ισοτόπων στη μελέτη περιβαλλοντικών
διεργασιών στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της Αρετής Σπανάκου

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Μ. Ι. Αναγνωστάκης
Αν. Καθηγητής

Ε.Π. Χίνης
Αν. Καθηγητής

Ν.Π. Πετρόπουλος
Επ. Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος, 2017

Ευχαριστίες

Επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μάριο Αναγνωστάκη, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα που ταυτίζεται απόλυτα με τα ενδιαφέροντά μου. Τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Οι πολύ εύστοχες υποδείξεις του καθώς και η άψογη συνεργασία μαζί του έπαιξαν καθοριστικό ρόλο για τη διεκπεραίωσή της.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Αφυπηρετήσαντα Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωστή Παρασκευαΐδη για τη θετική του στάση και τη στήριξή του.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλα τα μέλη του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, που με έκαναν δεκτή, και ειδικά να ευχαριστήσω (με αλφαβητική σειρά) τους διδάσκοντες των μαθημάτων που παρακολούθησα κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου: Μ. Αναγνωστάκη, Γ. Κουτσούμπα, Μ. Μακροπούλου, Κ. Παρασκευαΐδη, Μ. Πίσσα, Π. Ρούνη, Α. Σεραφετινίδη και Ε. Χίνη, για τις γνώσεις που μου προσέφεραν. Θα ήθελα να τους συγχαρώ όλους για το αξιόλογο έργο που επιτελούν.

Επίσης, ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ε. Χίνη και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ν. Πετρόπουλο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή καθώς και για τη θετική τους αντιμετώπιση.

Τέλος, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου για τη φιλική τους στάση και το κλίμα συνεργασίας.

Αρετή Α. Σπανάκου

Αθήνα, Ιούνιος 2017

Περίληψη

Η ραδιενέργεια στο περιβάλλον έχει μελετηθεί εκτενώς σε ολόκληρο τον κόσμο με αποτέλεσμα την ανάπτυξη του κλάδου της ραδιοοικολογίας. Πέρα από αυτή την οπτική γωνία, τις τελευταίες λίγες δεκαετίες, πολλά ραδιενεργά ισότοπα έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ως ιχνηλάτες περιβαλλοντικών διεργασιών.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) αποτελεί μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση της έρευνας, που έχει πραγματοποιηθεί παγκοσμίως, σχετικά με τη χρήση φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισωτόπων στη μελέτη περιβαλλοντικών διεργασιών στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος. Τα ραδιενεργά ισότοπα που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη τέτοιων διεργασιών είναι τα κοσμικής προέλευσης ^7Be ($T_{1/2}=53,3$ ημέρες), ^{10}Be ($T_{1/2}=1,5 \times 10^6$ έτη), ^{22}Na ($T_{1/2}=2,6$ έτη), ο γεωγενής $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ($T_{1/2}=22,3$ έτη) και το τεχνολογικά επαγώμενο ^{137}Cs ($T_{1/2}=30,2$ έτη).

Τα παραπάνω ραδιενεργά ισότοπα, αμέσως μετά την παραγωγή τους, προσκολλώνται στα σωματίδια του ατμοσφαιρικού αεροζόλ, με αποτέλεσμα να παίρνουν μέρος σε ατμοσφαιρικές διεργασίες και να αποτελούν ιχνηλάτες τους. Το κοσμογενές ^7Be , λόγω του κατάλληλου χρόνου υποδιπλασιασμού του και της σχετικά εύκολης ανίχνευσής του μέσω της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της μετακίνησης αερίων μαζών, όπως είναι η ανταλλαγή στρατοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα, η κατακόρυφη ανάμιξη μέσα στην τροπόσφαιρα, η οριζόντια μεταφορά αερίων μαζών από τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη προς τους πόλους καθώς και η μεταφορά αερίων μαζών που οφείλεται σε τοπικές μετεωρολογικές παραμέτρους. Έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε έρευνες μεταφοράς και απόθεσης σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αεροζόλ καθώς και ρύπανσης οφειλόμενης σε ρυπαντές αεροζόλ. Επιπλέον, έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό μοντέλων διάχυσης και γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας. Τα κοσμογενή ραδιενεργά ισότοπα, ^{10}Be και ^{22}Na , έχουν χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το ^7Be κι έχουν αποδειχτεί σημαντικοί ιχνηλάτες στρατοσφαιρικών εισβολών. Εντούτοις, οι δυσκολίες στην ανίχνευσή τους αποτελούν τον κυριότερο περιορισμό που εμποδίζει την ευρύτερη χρήση τους. Από την άλλη, ο γεωγενής $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ αποτελεί κατάλληλο ιχνηλάτη της ηπειρωτικής ή θαλάσσιας προέλευσης αερίων μαζών. Η συνδυαστική χρήση του με το ^7Be , καθιστά το λόγο τους ιχνηλάτη της μεταφοράς που σχετίζεται με τη δυναμική των αερίων μαζών στη χαμηλότερη τροπόσφαιρα. Τέλος, παρόλο που η παραγωγή του ^{137}Cs έχει πλέον σταματήσει, ωστόσο η επαναιώρησή του από το έδαφος μπορεί να χρησιμεύσει ως ιχνηλάτης μεταφοράς σκόνης. Πάντως, η καλύτερη κατανόηση της ατμοσφαιρικής κατανομής τέτοιων ραδιενεργών ισωτόπων - ιχνηλατών, που αποκτάται από λεπτομερείς και αξιόπιστες μετρήσεις, θα διευκολύνει και θα τελειοποιήσει τα μοντέλα γενικής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Τα φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα, που απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα και εναποτίθενται στο έδαφος, μέσω των διεργασιών της υγρής και ξηρής εναπόθεσης, αποκαλούνται “Fallout RadioNuclides” (FRNs). Ορισμένα από αυτά, όπως το ^{137}Cs , ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και το ^7Be , έχουν την ιδιότητα να προσροφώνται γρήγορα και ισχυρά από τα λεπτόκοκκα σωματίδια του χώματος. Λόγω της γεωχημικής συμπεριφοράς τους, τα παραπάνω ραδιενεργά ισότοπα μετακινούνται μαζί με το χώμα, μόνο μέσω φυσικών διεργασιών, με αποτέλεσμα να λειτουργούν ως ιχνηλάτες της μετακίνησης του χώματος. Έτσι, καταγράφοντας μια μεταγενέστερη ανακατανομή τους στο έδαφος, επιτυγχάνεται η ιχνηλασία των ρυθμών και των χωρικών μορφών της διάβρωσης και της απόθεσης ιζημάτων που συμβαίνει σε μια

περιοχή. Για την εκτίμηση των ρυθμών ανακατανομής χώματος σε μια τοποθεσία εφαρμόζεται η πυρηνική αναλυτική τεχνική, η αποκαλούμενη τεχνική των FRNs, η θεμελιώδης ιδέα της οποίας βασίζεται στη σύγκριση μεταξύ της παραμένουσας απόθεσης του ραδιενεργού ισοτόπου στην υπό μελέτη τοποθεσία και της παραμένουσας απόθεσης στην τοποθεσία αναφοράς, δηλαδή σε μια τοποθεσία που δεν υφίσταται ούτε διάβρωση ούτε απόθεση ιζημάτων. Για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs, έχουν καθιερωθεί παγκοσμίως εναρμονισμένα πρωτόκολλα που αφορούν σε μια σειρά τυποποιημένων βημάτων που πρέπει να ακολουθηθούν. Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό της δειγματοληψίας, τη συλλογή δειγμάτων χώματος από βάθος χρησιμοποιώντας κατάλληλα εργαλεία, την προετοιμασία και προ-επεξεργασία των δειγμάτων, τη μέτρηση της ειδικής ραδιενέργειάς τους, τη χρήση μοντέλων μετατροπής της παραμένουσας απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων σε ρυθμούς ανακατανομής χώματος και τέλος την απεικόνιση των εκτιμώμενων ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων σε αντίστοιχους χάρτες. Αρχικά η τεχνική περιελάμβανε μόνο το ^{137}Cs , το οποίο είναι και το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο, ενώ σταδιακά η χρήση της συμπεριέλαβε τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και το ^7Be , γεγονός που οφείλεται κυρίως στη βελτίωση των ανιχνευτικών διατάξεων και τεχνικών της φασματοσκοπίας- γ . Λόγω του χρόνου υποδιπλασιασμού του, το ^{137}Cs χρησιμοποιείται ως ιχνηλάτης μεσοπρόθεσμων, (χρονικής κλίμακας 50 ετών περίπου), ανακατανομών χώματος. Από την άλλη, η συνεχής παραγωγή του φυσικού ραδιενεργού ισοτόπου $^{210}\text{Pb}_e$, σε συνδυασμό με το χρόνο υποδιπλασιασμού του, μπορεί να επεκτείνει την παραπάνω χρονική κλίμακα, παρέχοντας εκτιμήσεις για πιο μακροπρόθεσμους (100 ετών περίπου) ρυθμούς ανακατανομής χώματος. Τέλος, ο σχετικά μικρός χρόνος υποδιπλασιασμού του ^7Be το καθιστά κατάλληλο ιχνηλάτη βραχυπρόθεσμων (ημερών έως μερικών μηνών) ανακατανομών χώματος, που σχετίζονται με μεμονωμένες περιόδους έντονων βροχοπτώσεων, καθώς και εποχιακές αλλαγές στη χρήση της γης, κυρίως σε μικρές χωρικές κλίμακες. Σήμερα, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη συνδυασμένη χρήση FRNs διότι έτσι παρέχεται η δυνατότητα του καθορισμού ρυθμών διάβρωσης για διαφορετικές χρονικές κλίμακες καθώς και για διαφορετικές τοπικές συνθήκες. Απώτερος στόχος είναι η ευρύτερη χρήση της τεχνικής των FRNs σε μεγαλύτερη κλίμακα και η προώθησή της από ερευνητικό εργαλείο σε άμεσα εφαρμόσιμο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την αποτελεσματική διαχείριση του εδάφους και την προστασία του από τη διάβρωση, η οποία αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα υποβάθμισής του.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση ραδιενεργών ισοτόπων εκτείνεται επίσης σε σημαντικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υδάτινο περιβάλλον, αλλά η μελέτη τους παρέμεινε έξω από τους στόχους της παρούσας ΔΕ.

Αναμφισβήτητα, πολλά φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα έχουν αποδειχθεί πολύτιμοι ιχνηλάτες περιβαλλοντικών διεργασιών. Μετρώντας τη ραδιενέργειά τους και παρακολουθώντας τις μεταβολές των συγκεντρώσεών της, κατανοούμε καλύτερα τους μηχανισμούς που διέπουν τις διεργασίες αυτές. Η πρόοδος της τεχνολογίας και των αναλυτικών τεχνικών θα παίξει καθοριστικό ρόλο στη μελλοντική εξέλιξη της χρήσης τους σε περιβαλλοντικές έρευνες.

Abstract

Radioactivity in the environment has been extensively studied all over the world, leading to the development of the field of radioecology. Apart from that point of view, the last few decades many radionuclides have also been used as tracers of environmental processes.

This thesis is a detailed literature review of the research has been made worldwide, reporting the use of natural and artificial radionuclides in studies of atmospheric and soil processes. The radionuclides that have been most widely used as tracers of such processes are: cosmogenic ^7Be ($T_{1/2}=53.3$ d), ^{10}Be ($T_{1/2}=1.5\times 10^6$ y), ^{22}Na ($T_{1/2}=2.6$ y); geogenic $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ($T_{1/2}=22.3$ y) and anthropogenic ^{137}Cs ($T_{1/2}=30.2$ y).

Once they are formed, the above mentioned radionuclides are rapidly associated with submicron aerosol particles, so that their fate becomes the fate of the carrier aerosols, thus, taking part in several atmospheric processes. ^7Be is the most widely used atmospheric tracer of such processes, mainly due to its convenient half-life as well as its relatively easy detection by gamma spectrometry. Cosmogenic ^7Be has been used for studying the transport of air masses, including stratosphere - to - troposphere exchange (STE), vertical and horizontal transport of air within the troposphere, convective mixing as well as air transport owing to local meteorological parameters. It has also been used for studying wet scavenging, aerosol transit and pollutants' fate. Furthermore, ^7Be has tested diffusion and global circulation models. Cosmogenic radionuclides ^{10}Be and ^{22}Na have been used, in combination with ^7Be , in order to trace stratospheric intrusions. However, limitations are revealed because of their difficult detection. On the other hand, geogenic $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ has efficiently traced the continental or maritime origin of air masses. The combined use of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^7Be and their ratio may be useful for better understanding of processes taking place in the lower troposphere. Finally, the variability in ^{137}Cs atmospheric concentration, which arises from soil resuspension, can be associated with dust events and related transport of dust particles. Moreover, an improved understanding of the atmospheric distributions of several radionuclides - tracers, obtained from detailed and reliable measurements, will facilitate the refinement and validation of global circulation models.

The natural and artificial radionuclides that are deposited onto the land surface from the atmosphere can be called "Fallout RadioNuclides" (FRNs). Some of them, such as ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^7Be , are rapidly and strongly adsorbed by fine soil particles. Due to their geochemical behavior, these FRNs can move across the landscape only in association with soil through physical processes. Thus, documenting their subsequent redistribution provides a very effective means of tracing rates and patterns of soil erosion and deposition at several temporal and spatial scales. For determining rates and patterns of soil redistribution, the analytical nuclear technique, the so-called FRN technique, is applied. The fundamental idea of the technique is based on the radionuclide inventory, measured at a study site compared with a reference site (i.e. a location undisturbed by erosion or sedimentation). Harmonized protocols have been established for a worldwide and consistent application of the FRN technique. These include: sampling design, soil sample collection (bulk and depth incremental sampling using appropriate sampling tools), sample preparation and pre-treatment, gamma spectrometry measurements, theoretical conversion models to convert radionuclides inventories to erosion and/or deposition rates, data analysis, interpretation and presentation. FRN technique was originally limited to ^{137}Cs , which is the most widely used, and eventually extended to include

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^7Be , mainly due to the development of gamma spectrometry systems and techniques. Based on its half-life, ^{137}Cs is validated for medium-term (50 years) soil redistribution assessment. On the other hand, based on its half-life as well as its continuous fallout, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ has been extended to provide long-term (100 years) soil redistribution studies. Finally, based on its relatively short half-life, ^7Be permits short-term (days to months) soil erosion assessment in connection to individual rainfall events and seasonal changes in land use/management practices. Nowadays, studies have emphasized the combined use of FRNs, which enables the determination of erosion rates at several time scales and under different local conditions. If, in the future, FRNs are to be used more widely and at a larger scale and to contribute more directly to decision making, another important challenge will be to promote a transition in their application from research tools to readily-applied decision support tools; and to promote their use as a key soil quality indicator.

It must be mentioned that many radionuclides have also been used to study major processes taking place in the marine environment. However, their study has not been included here, as it is beyond the aim of this thesis.

Undoubtedly, many natural and artificial radionuclides have been proven valuable tracers of environmental processes. Measuring their activity and monitoring their concentration variability provide a better understanding of the mechanisms governing these processes. Both technological advances and the development of analytical techniques will play a key role in future environmental research.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1	Πρόλογος	1
1.2	Σκοπός και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας	1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΙΣΟΤΟΠΑ: ${}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{22}\text{Na}$, ${}^{210}\text{Pb}$, ${}^{137}\text{Cs}$

2.1	Εισαγωγή	9
2.2	Προέλευση και παραγωγή των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων	10
2.2.1	Προέλευση και παραγωγή των ${}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$ και ${}^{22}\text{Na}$	10
2.2.2	Προέλευση και παραγωγή του ${}^{210}\text{Pb}$	13
2.2.3	Προέλευση και παραγωγή του ${}^{137}\text{Cs}$	15
2.3	Διάσπαση των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων	15
2.3.1	Ραδιενεργός διάσπαση του ${}^7\text{Be}$	15
2.3.2	Ραδιενεργός διάσπαση του ${}^{10}\text{Be}$	16
2.3.3	Ραδιενεργός διάσπαση του ${}^{22}\text{Na}$	16
2.3.4	Ραδιενεργός διάσπαση του ${}^{210}\text{Pb}$	17
2.3.5	Ραδιενεργός διάσπαση του ${}^{137}\text{Cs}$	17
2.4	Μέτρηση της ραδιενέργειας των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων	18
2.4.1	Φασματοσκοπία γάμμα	18
2.4.2	Φασματοσκοπία άλφα	29
2.4.3	Καταμέτρηση βήτα	31
2.4.4	Φασματοσκοπία υγρού σπινθηρισμού	33
2.4.5	Φασματοσκοπία μάζας	36
2.5	Ανακεφαλαίωση	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ: ^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , ^{210}Pb , ^{137}Cs ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

3.1	Εισαγωγή	41
3.2	Διεργασίες υγρής και ξηρής απομάκρυνσης / εναπόθεσης κι επαναιώρησης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων	41
3.2.1	Μεγέθη που προσδιορίζουν τις διεργασίες εναπόθεσης κι επαναιώρησης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων	43
3.3	Δειγματοληψία, επεξεργασία και ανάλυση δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ και ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων	46
3.3.1	Δειγματοληψία κι επεξεργασία δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ	46
	• Δειγματοληψία κι επεξεργασία δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	47
3.3.2	Δειγματοληψία κι επεξεργασία δειγμάτων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων	50
	• Διαδικασία συλλογής ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	51
	• Διαδικασίες επεξεργασίας των δειγμάτων των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	51
3.3.3	Μέτρηση της συγκέντρωσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων σε ατμοσφαιρικά δείγματα - Δυνατότητες και περιορισμοί	56
3.4	Συγκέντρωση των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στα νέφη και στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	57
3.4.1	Συγκέντρωση των ραδιενεργών ισοτόπων: ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^{137}Cs στα νέφη και απόδοση σάρωσης του ατμοσφαιρικού αεροζόλ από τα σταγονίδια των νεφών	57
3.4.2	Παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η συγκέντρωση ραδιενέργειας των ισοτόπων: ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^{137}Cs στο νερό της βροχής	60
3.4.3	Μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^{137}Cs κατά τη διάρκεια ενός περιστατικού βροχόπτωσης	62
3.4.4	Επίδραση του είδους κατακρήμνισης στην απόδοση του μηχανισμού σάρωσης από την ατμόσφαιρα των ραδιενεργών ισοτόπων ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{137}Cs	66
3.5	Συγκεντρώσεις των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	66
3.5.1	Εύρος τιμών των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	67

3.5.2	Εύρος τιμών των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^{137}Cs στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	68
3.5.3	Εύρος τιμών των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	68
3.6	Παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	69
3.6.1	Εξάρτηση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα από την ηλιακή δραστηριότητα	70
3.6.2	Εξάρτηση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα από το γεωμαγνητικό πλάτος και το ύψος της τροπόπαυσης - Στρατοσφαιρικές εισβολές αερίων μαζών	74
3.7	Συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων	78
3.7.1	Εισαγωγή	78
3.7.2	Συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και της κατακρήμνισης	79
3.7.3	Συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και της θερμοκρασίας	81
3.7.4	Συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα σε <i>συνδυασμό</i> με τη θερμοκρασία και την κατακρήμνιση	85
3.7.5	Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και της σχετικής υγρασίας	86
3.7.6	Συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου	88
3.7.7	Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και της ατμοσφαιρικής πίεσης	91
3.8	Χρονικές μεταβολές της συγκέντρωσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	93
3.8.1	Πολυετείς μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	93
3.8.2	Εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	95

• Υγρή σάρωση στις υποτροπικές περιοχές	95
• Οριζόντια μεταφορά στις πολικές περιοχές	97
• Ανταλλαγή στρατοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα και κατακόρυφη μεταφορά αερίων μαζών μέσα στην τροπόσφαιρα στις περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών	98
• Τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες	101
3.8.3 Ημερήσιες μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	104
3.8.4 Εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης ^7Be και ^{10}Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα - Χρήση του λόγου $^{10}\text{Be} / ^7\text{Be}$ ως ιχνηλάτη στρατοσφαιρικών εισβολών	104
3.8.5 Εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης ^7Be και ^{22}Na στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα - Χρήση του λόγου $^7\text{Be} / ^{22}\text{Na}$ ως ιχνηλάτη στρατοσφαιρικών εισβολών	108
3.8.6 Πολυετείς μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	113
3.8.7 Εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	114
3.8.8 Ημερήσιες μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	118
3.8.9 Ο λόγος $^7\text{Be} / ^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ως ιχνηλάτης διεργασιών μεταφοράς αερίων μαζών	118
3.8.10 Χρονικές μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{137}Cs στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα	122
3.9 Ροή και χωρική κατανομή εναπόθεσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης	123
3.9.1 Ροή και χωρική κατανομή εναπόθεσης του ^7Be από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης	123
3.9.2 Ροή και χωρική κατανομή εναπόθεσης του ^{22}Na από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης	125
3.9.3 Ροή και χωρική κατανομή εναπόθεσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης	126
3.9.4 Ροή και χωρική κατανομή εναπόθεσης του ^{137}Cs από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης	127
3.10 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα - Μελλοντικές προοπτικές	130

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΧΡΗΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΙΖΗΜΑΤΩΝ

4.1	Διάβρωση του εδάφους και απόθεση ιζημάτων: ένα παγκόσμιο πρόβλημα	137
4.2	Τεχνικές για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων	140
4.2.1	Κλασσικές τεχνικές για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων	141
4.2.2	Πυρηνικές αναλυτικές τεχνικές για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων	142
4.2.3	Συγκριτική αξιολόγηση κλασσικών και πυρηνικών αναλυτικών τεχνικών για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων	143
4.2.4	Η εξέλιξη των πυρηνικών αναλυτικών τεχνικών για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων	143
4.3	Η θεμελιώδης ιδέα και η εφαρμογή της τεχνικής των FRNs (Fallout Radionuclides)	145
4.3.1	Η γεωχημική συμπεριφορά των FRNs	145
4.3.2	Η θεμελιώδης ιδέα της τεχνικής των FRNs	147
4.3.3	Τα βήματα για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs	148
4.4	Σχεδιασμός δειγματοληψίας για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs	150
4.4.1	Στάδιο αναγνώρισης της τοποθεσίας αναφοράς και της υπό μελέτη περιοχής	150
4.4.2	Κριτήρια για την επιλογή της τοποθεσίας αναφοράς	150
4.4.3	Μέθοδοι και στρατηγικές δειγματοληψίας	151
4.4.4	Σχεδιασμός δειγματοληψίας στην τεχνική των FRNs	154
4.5	Συλλογή δειγμάτων χώματος και εργαλεία δειγματοληψίας για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs	161
4.5.1	Ολική δειγματοληψία με χρήση κυλινδρικών πυρήνων («καρότων»)	163
4.5.2	Κατά βάθος δειγματοληψία: μέθοδοι και εργαλεία	164
4.6	Προετοιμασία και προ-επεξεργασία των δειγμάτων χώματος για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs	171
4.7	Ραδιομετρικές τεχνικές μέτρησης της ραδιενέργειας των FRNs στο χώμα	176

4.8	Κατακόρυφες κατανομές και παραμένουσες αποθέσεις των FRNs στο έδαφος	179
4.8.1	Συγκριτική περιγραφή κι ερμηνεία των κατακόρυφων κατανομών στο έδαφος και της παραμένουσας απόθεσης των FRNs	180
4.8.2	Μελέτες περιπτώσεων κατακόρυφων κατανομών στο έδαφος και παραμένουσες αποθέσεις των FRNs	186
4.9	Μοντέλα μετατροπής της παραμένουσας απόθεσης των FRNs σε ρυθμούς διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων.....	197
4.9.1	Εμπειρικά μοντέλα μετατροπής	197
4.9.2	Θεωρητικά μοντέλα μετατροπής	198
4.9.3	Δυνατότητες και περιορισμοί των θεωρητικών μοντέλων μετατροπής	199
4.9.4	Παράμετροι των θεωρητικών μοντέλων μετατροπής	203
4.9.5	Το λογισμικό που σχετίζεται με τα θεωρητικά μοντέλα μετατροπής	220
4.10	Παρουσίαση των εκτιμώμενων ρυθμών ανακατανομής του χώματος που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs	221
4.11	Μελέτη των ραδιενεργών ισοτόπων ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε ελληνικά εδάφη και εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ	230
4.11.1	Σχεδιασμός δειγματοληψίας χώματος	230
4.11.2	Συλλογή δειγμάτων χώματος και εργαλεία δειγματοληψίας	230
4.11.3	Προετοιμασία και προ-επεξεργασία των δειγμάτων χώματος	235
4.11.4	Φασματοσκοπία-γ για τη μέτρηση της ραδιενέργειας των FRNs στο χώμα	237
4.11.5	Κατακόρυφες κατανομές στο έδαφος των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$	239
4.11.6	Μοντέλα μετατροπής και σχετικά αποτελέσματα	242
4.11.7	Δυνατότητες, περιορισμοί και μελλοντικές προοπτικές για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	243
4.12	Συγκριτική ανασκόπηση των δυνατοτήτων και περιορισμών της τεχνικής των FRNs	245
4.12.1	Χρήση του ^{137}Cs ως ιχνηλάτη μεσοπρόθεσμων ανακατανομών χώματος	246
4.12.2	Χρήση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ως ιχνηλάτη μακροπρόθεσμων ανακατανομών χώματος ...	248
4.12.3	Χρήση του ^7Be ως ιχνηλάτη βραχυπρόθεσμων ανακατανομών χώματος	249
4.12.4	Τρέχουσα κατάσταση και μελλοντικές προοπτικές για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs	251

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Επίλογος	255
----------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

A.1 Ηλιακή δραστηριότητα	261
A.2 Κοσμική ακτινοβολία	265

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Η ατμόσφαιρα της Γης

B.1 Εισαγωγή	266
B.2 Κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας	266
B.3 Γεωγραφική κατανομή ισοζυγίου ενέργειας και μεταφορά της	269
B.4 Ύψος και αναδίπλωση τροπόπαυσης - Ανταλλαγή στρατοσφαιρικού και τροποσφαιρικού αέρα - Αεροχέιμαρροι - Κύματα Rossby	272
B.5 Γενική Κυκλοφορία της Ατμόσφαιρας	275
B.6 Εποχικοί άνεμοι ή μουσσώνες	277
B.7 Ημερήσιοι άνεμοι	278
B.8 Αέριες Μάζες	279
B.9 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (υετός)	281
B.10 Σχετική υγρασία	283

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Ατμοσφαιρικά αερολύματα (aerosol) ή αιωρούμενα σωματίδια

Γ.1 Εισαγωγή	284
Γ.2 Μορφές αιωρούμενων σωματιδίων	284
Γ.3 Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων	286
Γ.4 Μηχανισμοί σχηματισμού των αιωρούμενων σωματιδίων	286
Γ.5 Μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων – Αεροδυναμική διάμετρος	287
Γ.6 Κατανομή κατά το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων	288
Γ.7 Χρόνοι παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα	290
Γ.8 Ατμοσφαιρικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων	292

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Μερικά φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών

Δ.1.	Ορισμός του εδάφους	294
Δ.2.	Φαινόμενη πυκνότητα (Bulk Density)	294
Δ.3.	Ταξινόμηση των εδαφών με βάση την κοκκομετρική τους σύσταση	295
Δ.4.	Κοκκομετρικές καμπύλες	297
Δ.5.	Κοκκομετρική σύσταση εδάφους και διαβρωσιμότητα	297

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

	Διεργασίες και είδη διάβρωσης του εδάφους	298
--	---	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

	Μαθηματική περιγραφή των θεωρητικών μοντέλων μετατροπής	300
--	---	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	313
---------------------------	------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 Πρόλογος

Στο περιβάλλον υπάρχουν πολυάριθμα ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία μπορεί να είναι φυσικής προέλευσης (π.χ. να προέρχονται από την κοσμική ακτινοβολία, τα πετρώματα, το υδάτινο περιβάλλον) ή να είναι αποτελέσματα ανθρώπινων δραστηριοτήτων (π.χ. να προέρχονται από τις πυρηνικές δοκιμές, τα πυρηνικά ατυχήματα ή ακόμα και από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας για ειρηνικούς σκοπούς). Αυτό που ενδιαφέρει είναι να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις των ραδιενεργών ισοτόπων και οι ισοτοπικές τους αναλογίες, οι οποίες καθορίζουν τόσο την παραγωγή τους όσο και την εκάστοτε παρουσία τους και την πορεία τους στο περιβάλλον.

Τα τελευταία 50 χρόνια η ραδιενέργεια στο περιβάλλον έχει μελετηθεί εκτενώς σε ολόκληρο τον κόσμο με αποτέλεσμα την ανάπτυξη του κλάδου της ραδιοοικολογίας και την απόκτηση γνώσεων σχετικών με τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει μια παρούσα ή μελλοντική έκθεση των ζωντανών οργανισμών σε ραδιενεργές ακτινοβολίες, οι οποίες επιδρούν δια μέσου της ατμόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και του εδάφους.

Εκτός από το ενδιαφέρον για την προστασία των ζωντανών οργανισμών από την ακτινοβολία, τις τελευταίες δεκαετίες οι έρευνες για τη μελέτη της ραδιενέργειας στο περιβάλλον στοχεύουν επίσης στην απόκτηση γνώσεων σχετικά με τη *χρήση ραδιενεργών ισοτόπων ως ιχνηλατών περιβαλλοντικών διεργασιών*.

1.2 Σκοπός και αντικείμενο μελέτης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) αποτελεί μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση της έρευνας, που έχει πραγματοποιηθεί παγκοσμίως, σχετικά με τη χρήση φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στη μελέτη περιβαλλοντικών διεργασιών. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη εστιάζεται σε μελέτες για διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος. Τα ραδιενεργά ισότοπα που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη τέτοιων διεργασιών, και τα οποία αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας ΔΕ, είναι τα: ^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , ^{210}Pb και ^{137}Cs . Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση επιχειρήθηκε να παρουσιαστεί το πλαίσιο των σχετικών ερευνών όπως είναι: η εξέλιξη της προόδου των σχετικών ερευνών με το πέρασμα του χρόνου, τα στάδια που περιλαμβάνει η πραγματοποίηση τέτοιων ερευνών, οι δυνατότητες που παρέχουν τα παραπάνω ραδιενεργά ισότοπα να λειτουργούν ως ιχνηλάτες διεργασιών που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα και το έδαφος, οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να ερμηνευθεί η συμπεριφορά τους σε σχέση με διεργασίες αυτές, τα

προβλήματα στην ανίχνευσή τους που ξεπεράστηκαν με την πρόοδο της τεχνολογικής ανάπτυξης, αλλά και οι περιορισμοί που ακόμα ζητούν λύση.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση επικεντρώνεται γύρω από δύο πυρήνες ανάπτυξης. Ο ένας περιλαμβάνει τη μελέτη **ατμοσφαιρικών διεργασιών**, τον τρόπο που αυτές επιδρούν στα επίπεδα συγκέντρωσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων ^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , ^{210}Pb και ^{137}Cs , αλλά και αντίστροφα τον τρόπο με τον οποίο οι χρονικές και χωρικές μεταβολές αυτών των ραδιενεργών ισοτόπων μπορούν να αποτελέσουν ιχνηλάτες αυτών των ατμοσφαιρικών διεργασιών και να ερμηνεύσουν ή να διαφωτίσουν περαιτέρω τους μηχανισμούς που τις διέπουν. Ο άλλος πυρήνας ανάπτυξης περιλαμβάνει τη **διάβρωση του εδάφους**, η οποία αποτελεί μια παγκόσμια απειλή καθώς είναι ο κυριότερος μηχανισμός της υποβάθμισής του. Τα ραδιενεργά ισότοπα που εναποτίθενται στο έδαφος από την ατμόσφαιρα (fallout radionuclides, FRNs): ^{137}Cs , ^{210}Pb και ^7Be έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί ιχνηλάτες της ανακατανομής χρώματος, που προκαλείται από τη διάβρωση του εδάφους.

Με βάση το παραπάνω πλαίσιο, η διάρθρωση των υπόλοιπων τεσσάρων Κεφαλαίων της παρούσας ΔΕ έχει γίνει ως εξής:

Στο **2^ο Κεφάλαιο** δίνονται οι προαπαιτούμενες γνώσεις που αφορούν στα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα: ^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , ^{210}Pb και ^{137}Cs , (**§2.1**), οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση της εμπλοκής τους στις περιβαλλοντικές διεργασίες, που θα εξετασθούν στη συνέχεια, καθώς και των περιορισμών και δυνατοτήτων που παρέχουν ως προς τη μελέτη αυτών των διεργασιών. Συγκεκριμένα, παρέχονται πληροφορίες για την *προέλευση και παραγωγή* (**§2.2**), τη *ραδιενεργό διάσπαση* (**§2.3**) καθώς και τον τρόπο *ανίχνευσής τους* (**§2.4**). Η μέτρηση της ραδιενέργειας των υπό μελέτη ισοτόπων μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους (φασματοσκοπία $-\gamma$, $-\alpha$, υγρού σπινθηρισμού, μάζας), ανάλογα με το είδος της διάσπασης που πραγματοποιούν. Παρουσιάζονται οι δυνατότητες και οι περιορισμοί των ανιχνευτικών τεχνικών και δίνεται έμφαση στη φασματοσκοπία- γ , η οποία είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη. Εκτός από το ^{10}Be , όλα τα υπόλοιπα ραδιενεργά ισότοπα, που μελετώνται, εκπέμπουν ακτινοβολία- γ , με αποτέλεσμα για την ανίχνευσή τους σε περιβαλλοντικές μελέτες να χρησιμοποιείται συνήθως η φασματοσκοπία- γ . Εντούτοις, οι δυνατότητες που παρέχει δεν είναι απεριόριστες. Γίνονται προσπάθειες για περαιτέρω βελτιώσεις της τεχνικής ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί σε δύσκολες περιπτώσεις ανίχνευσης ραδιενεργών ισοτόπων στο περιβάλλον, όπως συμβαίνει με την περίπτωση του ^{22}Na . Στην ανακεφαλαίωση (**§2.5**), συνοψίζονται όλα τα παραπάνω.

Το **3^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζει τη χρήση των ραδιενεργών ισοτόπων: ^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , ^{210}Pb και ^{137}Cs σε μελέτες ατμοσφαιρικών διεργασιών (**§3.1**). Τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα μετά το σχηματισμό τους προσκολλώνται στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα με τις διεργασίες της υγρής (wet deposition) και ξηρής εναπόθεσης (dry deposition) (**§3.2**). Η υγρή εναπόθεση είναι πιο αποτελεσματική διεργασία και περιλαμβάνει δύο μηχανισμούς: την απόπλυση (washout) και τη βροχόπλυση (rainout). Η επαναιώρηση (resuspension) θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη. Ορισμένα μεγέθη που προσδιορίζουν τις παραπάνω διεργασίες είναι ο συντελεστής καθαρισμού της ατμόσφαιρας (washout ratio ή precipitation scavenging ratio), η ταχύτητα εναπόθεσης (deposition velocity) και ο παράγοντας επαναιώρησης (resuspension factor).

Πραγματοποιούνται δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αεροζόλ, αλλά και ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (§3.3). Τα δείγματα επεξεργάζονται προκειμένου να προετοιμασθούν για την ανάλυσή τους. Παρουσιάζονται μερικά στοιχεία για τον τρόπο συλλογής κι επεξεργασίας των δειγμάτων, που απαντώνται στη βιβλιογραφία, αλλά έμφαση δίνεται στις μεθόδους που ακολουθούνται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) και διακρίνεται η προσπάθεια που γίνεται για τη συνεχή βελτίωσή τους. Οι τεχνικές ανίχνευσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων σε περιβαλλοντικά δείγματα έχουν ήδη συζητηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εδώ, απλώς γίνεται μια ονομαστική ταξινόμηση των βιβλιογραφικών αναφορών με βάση τις τεχνικές ανίχνευσης ραδιενέργειας που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ατμοσφαιρικά δείγματα.

Εστιάζοντας πρώτα στη διεργασία της υγρής εναπόθεσης (wet deposition) ή υγρής απομάκρυνσης (wet removal), εξετάζονται τα συμπεράσματα ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τη συγκέντρωση των ραδιενεργών ισοτόπων ^7Be , ^{210}Pb και ^{137}Cs στα *νέφη* και στα *ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα* (§3.4). Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μελετών σχετικά με την *απόδοση του μηχανισμού της σάρωσης* από την κατακρήμνιση (scavenging by precipitation), καθώς επίσης και την *επίδραση του είδους της κατακρήμνισης* στην απόδοση του μηχανισμού σάρωσης από την ατμόσφαιρα.

Συνεχίζοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, παρουσιάζονται συμπεράσματα από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τη συγκέντρωση των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον *επιφανειακό ατμοσφαιρικό αέρα*. Αρχικά, παρουσιάζεται το εύρος τιμών των συγκεντρώσεών τους, όπως έχει καταγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία (§3.5). Εξετάζονται οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η συγκέντρωση των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης, όπως είναι η ηλιακή δραστηριότητα, το ύψος της τροπόπαυσης, η αναδίπλωση της τροπόπαυσης, το γεωμαγνητικό πλάτος και το υψόμετρο (§3.6). Ακολουθεί η μελέτη της συσχέτισης μεταξύ των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων (§3.7), όπως είναι η κατακρήμνιση, η θερμοκρασία, ο άνεμος, η σχετική υγρασία και η ατμοσφαιρική πίεση.

Με βάση τους παράγοντες και τις παραμέτρους, που εξετάστηκαν παραπάνω, είναι δυνατή η ερμηνεία των χρονικών μεταβολών (πολυετών, εποχιακών και ημερήσιων) των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον επιφανειακό ατμοσφαιρικό αέρα (§3.8). Οι μεταβολές του ^7Be μπορούν να αναδειξουν ποιες είναι οι κυρίαρχες ατμοσφαιρικές διεργασίες που επικρατούν σε μια τοποθεσία (π.χ. υγρή σάρωση στις υποτροπικές περιοχές, οριζόντια μεταφορά στις πολικές περιοχές, ανταλλαγή στρατοσφαιρικού-τροποσφαιρικού αέρα σε περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών). Επιπλέον, οι λόγοι των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης, όπως $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ και $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$, αποτελούν ιχνηλάτες στρατοσφαιρικών εισβολών, ενώ ο λόγος των συγκεντρώσεων ραδιενεργών ισοτόπων διαφορετικής προέλευσης, όπως $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, μπορεί να αποδειχτεί ιχνηλάτης των διεργασιών μεταφοράς αερίων μαζών. Επίσης, τα επίπεδα των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ μαρτυρούν την ηπειρωτική ή τη θαλάσσια προέλευση των αερίων μαζών, ενώ η εκτίμηση της επαναιώρησης του ^{137}Cs μπορεί να χρησιμεύσει για τη μελέτη της άφιξης αερίων μαζών και σκόνης από την έρημο Σαχάρα στον επιφανειακό αέρα Ευρωπαϊκών Μεσογειακών χωρών.

Τέλος, παρουσιάζονται αποτελέσματα μελετών σχετικά με τη ροή και τη χωρική κατανομή της εναπόθεσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα στην

επιφάνεια της γης (§3.9). Η γνώση αυτών των δεδομένων είναι πολύ σημαντική όχι μόνο για τη μελέτη της επίδρασης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στους ζώντες οργανισμούς, αλλά και για την εναπόθεση στην επιφάνεια της γης ρυπαντών που σχετίζονται με το ατμοσφαιρικό αεροζόλ καθώς επίσης και για την εφαρμογή των πυρηνικών τεχνικών για την εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης του εδάφους.

Το κεφάλαιο κλείνει με μια ανακεφαλαίωση (§3.10) των κυριότερων συμπερασμάτων, των δυνατοτήτων και περιορισμών της χρήσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων ως ιχνηλατών ατμοσφαιρικών διεργασιών. Αναφέρονται επίσης μελλοντικές προοπτικές, που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία, όπως είναι η επίτευξη αποτελεσματικότερων μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{22}Na , η προσπάθεια δημιουργίας βάσης δεδομένων για αυτό και η ένταξη των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων σε μοντέλα γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας.

Το **4^ο Κεφάλαιο** ασχολείται με την εφαρμογή των πυρηνικών τεχνικών για την εκτίμηση της **διάβρωσης του εδάφους** και της συσχετιζόμενης **απόθεσης ιζημάτων**. Η διάβρωση του εδάφους αποτελεί ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα που εκτείνεται σε παγκόσμια κλίμακα (§4.1). Παρουσιάζονται περιληπτικά οι περιορισμοί των κλασσικών τεχνικών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους και αντιπαρά τίθενται οι δυνατότητες των πυρηνικών τεχνικών. Επίσης, παρουσιάζεται η εξέλιξη των τελευταίων, οι οποίες αρχικά περιελάμβαναν μόνο την τεχνική του ^{137}Cs . Με το πέρασμα του χρόνου η εφαρμογή τους επεκτάθηκε συμπεριλαμβάνοντας τον ^{210}Pb , ενώ η χρήση του ^7Be δοκιμάζεται σε αρκετές περιπτώσεις. Η τεχνική των FRNs εφαρμόζεται πλέον ευρύτερα (§4.2).

Ακολουθεί η ανάπτυξη της θεμελιώδους ιδέας, πάνω στην οποία βασίζεται η τεχνική των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , προκειμένου να διαπιστωθεί εάν σε μια τοποθεσία συμβαίνει διάβρωση ή απόθεση ιζημάτων (§4.3). Η επιλογή της τοποθεσίας αναφοράς, δηλαδή μιας τοποθεσίας που δεν υφίσταται ούτε διάβρωση ούτε απόθεση ιζημάτων, είναι ζωτικής σημασίας. Επιπλέον, η τιμή της παραμένουσας απόθεσης (inventory) (Bq m^{-2}) των FRNs τόσο στην τοποθεσία αναφοράς όσο και στην υπό μελέτη τοποθεσία είναι απαραίτητη για τη μεταξύ τους σύγκριση. Επίσης, αναφέρεται περιληπτικά η σειρά των βημάτων που ακολουθούνται για την υλοποίηση της τεχνικής. Καθένα από τα βήματα αυτά εξετάζονται στη συνέχεια αναλυτικά.

Το πρώτο βήμα σχετίζεται με τον σχεδιασμό της δειγματοληψίας (§4.4) και περιλαμβάνει το στάδιο αναγνώρισης της τοποθεσίας αναφοράς καθώς και της υπό μελέτη περιοχής. Δίνονται τα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται για την επιλογή της τοποθεσίας αναφοράς. Αναπτύσσονται οι μέθοδοι και οι στρατηγικές που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό της δειγματοληψίας για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs. Η τοπογραφία της υπό μελέτη τοποθεσίας παίζει πολύ μεγάλο ρόλο για την επιλογή κατάλληλου σχεδιασμού δειγματοληψίας.

Το δεύτερο βήμα είναι η συλλογή δειγμάτων χώματος από βάθος (§4.5). Είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν δύο ειδών δειγματοληψίες: ολική κατά βάθος δειγματοληψία (bulk sampling) και δειγματοληψία με βήμα αυξανόμενου βάθους (depth incremental sampling). Αυτό είναι απαραίτητο να γίνει προκειμένου να προσδιοριστούν τόσο οι παραμένουσες αποθέσεις των FRNs όσο και οι κατακόρυφες κατανομές τους. Οι μέθοδοι και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι θεμελιώδους σημασίας. Η επιλογή των εργαλείων εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του εδάφους και το μήκος του βήματος. Η επιλογή του τελευταίου

εξαρτάται από το ραδιενεργό ισότοπο που μελετάται. Ο μεγαλύτερος περιορισμός προκύπτει για το ${}^7\text{Be}$ διότι το βήμα της δειγματοληψίας πρέπει να είναι πολύ μικρό.

Το τρίτο βήμα αφορά στην προετοιμασία και προ-επεξεργασία των δειγμάτων χώματος (§4.6). Υπάρχουν συγκεκριμένα πρωτόκολλα που πρέπει να ακολουθούνται, τα οποία περιλαμβάνουν κυρίως την ξήρανση και το κοσκίνισμα των δειγμάτων χώματος. Στο στάδιο αυτό γίνεται ο υπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας του χώματος.

Το τέταρτο βήμα περιλαμβάνει τη μέτρηση της ειδικής ραδιενέργειας (Bq kg^{-1}) των FRNs (§4.7). Σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο, χρησιμοποιείται κυρίως η φασματοσκοπία-γ και για τα τρία ραδιενεργά ισότοπα: ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ${}^7\text{Be}$. Επίσης, στα πλαίσια της εφαρμογής της τεχνικής των FRNs η μέτρηση της ειδικής ραδιενέργειας, κυρίως του ${}^{137}\text{Cs}$, έχει πραγματοποιηθεί και με επιτόπιες (in situ) μετρήσεις.

Στο πέμπτο βήμα (§4.8), οι μετρήσεις της ειδικής ραδιενέργειας (Bq kg^{-1}), που έχουν προκύψει από το προηγούμενο στάδιο, μετατρέπονται σε παραμένουσες αποθέσεις (Bq m^{-2}) μέσω της φαινόμενης πυκνότητας του χώματος. Επίσης, κατασκευάζονται οι κατακόρυφες κατανομές των FRNs: ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ${}^7\text{Be}$ στο έδαφος, η ερμηνεία των οποίων προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση μιας τοποθεσίας, δηλαδή εάν είναι αδιατάρακτη, καλλιεργούμενη, εάν έχει υποστεί διάβρωση ή απόθεση ιζημάτων.

Στο έκτο βήμα (§4.9), γίνεται ο υπολογισμός των ρυθμών ανακατανομής χώματος, χρησιμοποιώντας τις τιμές της παραμένουσας απόθεσης, οι οποίες έχουν προηγουμένως υπολογιστεί, καθώς και τις τιμές ενός πλήθους παραμέτρων, ο προσδιορισμός των οποίων δεν είναι πάντα εύκολος. Η μετατροπή της παραμένουσας απόθεσης των FRNs σε ρυθμούς ανακατανομής χώματος (διάβρωσης ή απόθεσης ιζημάτων) επιτυγχάνεται μέσω εμπειρικών και θεωρητικών μοντέλων μετατροπής. Τα εμπειρικά μοντέλα εμφανίζουν σοβαρούς περιορισμούς. Για τα θεωρητικά μοντέλα έχει σχεδιαστεί κατάλληλο λογισμικό, το οποίο διαχειρίζεται τις εξισώσεις της μαθηματικής περιγραφής τους, και αποσκοπεί σε μια τυποποιημένη εφαρμογή τους από την ευρύτερη επιστημονική κοινότητα.

Το έβδομο βήμα (§4.10), που είναι και το τελευταίο, περιλαμβάνει την παρουσίαση των ρυθμών ανακατανομής χώματος, που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs, η οποία γίνεται μέσω της απεικόνισής τους σε χάρτες, χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους.

Στη συνέχεια (§4.11), παρουσιάζεται η δουλειά που έχει γίνει στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τη μελέτη των ραδιενεργών ισωτόπων ${}^{137}\text{Cs}$ και ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε ελληνικά εδάφη καθώς και για την εφαρμογή της τεχνικής του ${}^{137}\text{Cs}$ για την εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους. Παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν στις σχετικές μελέτες, οι βελτιώσεις που έγιναν στα εργαλεία και στις τεχνικές της δειγματοληψίας, αλλά και στην τεχνική ανίχνευσης του ${}^{210}\text{Pb}$ σε δείγματα χώματος. Επίσης, γίνεται μια ανασκόπηση των δυνατοτήτων, περιορισμών και μελλοντικών προοπτικών για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Τέλος, αναπτύσσεται μία συγκριτική ανασκόπηση (§4.12) των δυνατοτήτων και περιορισμών της εφαρμογής των FRNs για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της συσχετιζόμενης απόθεσης ιζημάτων. Εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης των ραδιενεργών ισωτόπων ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ${}^7\text{Be}$ ως ιχνηλατών μεσοπρόθεσμων, μακροπρόθεσμων και βραχυπρόθεσμων, αντίστοιχα, ανακατανομών χώματος. Κλείνοντας, παρουσιάζεται η τρέχουσα κατάσταση και οι μελλοντικές προοπτικές για την πιο αποτελεσματική εφαρμογή της τεχνικής των FRNs σε ευρύτερη κλίμακα. Η βελτίωση των μοντέλων μετατροπής θα

συμβάλει σημαντικά προς την κατεύθυνση αυτή. Απώτερος στόχος είναι η ευρύτερη και σε μεγαλύτερη κλίμακα χρήση της τεχνικής των FRNs καθώς επίσης και η πιο άμεση συνεισφορά της στη λήψη αποφάσεων για την επίτευξη της διατήρησης των εδαφικών πόρων.

Το **5^ο Κεφάλαιο**, που είναι και το τελευταίο, αποτελεί τον επίλογο της παρούσας ΔΕ. Τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα έχουν αποδειχθεί αναμφισβήτητα πολύτιμοι ιχνηλάτες ατμοσφαιρικών διεργασιών, όπως επίσης και χρήσιμα εργαλεία εκτίμησης των ρυθμών ανακατανομής χώματος. Η χρήση τους δεν περιορίζεται μόνο στην ατμόσφαιρα και το έδαφος, αλλά εκτείνεται και σε διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υδάτινο περιβάλλον. Τα ραδιενεργά ισότοπα, που έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ως ιχνηλάτες περιβαλλοντικών διεργασιών, μας βοηθούν να κατανοήσουμε καλύτερα τους μηχανισμούς που τις διέπουν. Η πρόοδος των αναλυτικών τεχνικών θα παίξει καθοριστικό ρόλο στη μελλοντική εξέλιξη της χρήσης ραδιενεργών ισωτόπων σε περιβαλλοντικές έρευνες.

Η παρούσα ΔΕ περιλαμβάνει επίσης έξι **Παραρτήματα**, τα οποία έχουν συμπληρωματικό χαρακτήρα και περιέχουν κυρίως πληροφορίες σχετικές με έννοιες, φαινόμενα και διεργασίες που συχνά αναφέρονται στον κεντρικό κορμό της. Τα Παραρτήματα Α, Β και Γ σχετίζονται με το 3^ο Κεφάλαιο, ενώ τα Δ, Ε και ΣΤ με το 4^ο. Συγκεκριμένα:

Το **Παράρτημα Α** περιλαμβάνει μια περιληπτική εξήγηση των φαινομένων που σχετίζονται με την ηλιακή δραστηριότητα και τον 11ετή ηλιακό κύκλο καθώς επίσης και κάποιες πληροφορίες για την κοσμική ακτινοβολία. Οι πληροφορίες αυτές βοηθούν στην κατανόηση θεμάτων που σχετίζονται με τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα κοσμικής προέλευσης.

Το **Παράρτημα Β** περιλαμβάνει πληροφορίες που αφορούν στην ατμόσφαιρα της Γης, αποτελώντας συμπλήρωμα του 3^{ου} Κεφαλαίου της παρούσας ΔΕ. Παρουσιάζονται: η κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, οι αναστροφές θερμοκρασίας, η γεωγραφική κατανομή και η μεταφορά της θερμότητας που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία, οι ανοδικές και καθοδικές κινήσεις των αερίων μαζών, οι προκαλούμενες διαφορές στην πίεση, τα κυκλωνικά και αντικυκλωνικά συστήματα. Δίνεται μια σύντομη εξήγηση για τη μεταβολή του ύψους της τροπόπαυσης, την αναδίπλωσή της, την ανταλλαγή στρατοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα, τους αεροχειμάρους και τα κύματα Rossby. Τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα επηρεάζονται από όλα τα παραπάνω και σε πολλές περιπτώσεις αποτελούν ιχνηλάτες σχετικών διεργασιών. Επίσης, η γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας δίνει τη γενικότερη εικόνα των κινήσεων των αερίων μαζών, ενώ οι εποχικοί άνεμοι (μουςώνες) καθώς και οι ημερήσιοι (π.χ. θαλάσσια αύρα) ερμηνεύουν τοπικά φαινόμενα που σχετίζονται με χρονικές και χωρικές μεταβολές των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ραδιενεργών ισωτόπων. Η προέλευση των αερίων μαζών (π.χ. θαλάσσιες, ηπειρωτικές) είναι σημαντική όταν στην έρευνα εμπλέκονται φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που προέρχονται από το έδαφος, όπως είναι ο ²¹⁰Pb. Επίσης, ορισμένες πληροφορίες για τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα είναι χρήσιμες, αφού τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα κι εναποτίθενται στη επιφάνεια της γης κυρίως με τη διεργασία της υγρής εναπόθεσης που επιτυγχάνεται μέσω της σάρωσης από την κατακρήμνιση.

Το **Παράρτημα Γ** ασχολείται με τα ατμοσφαιρικά αερολύματα (aerosol), παρουσιάζοντας τις μορφές τους, τις πηγές προέλευσής τους, τους μηχανισμούς σχηματισμού τους, το μέγεθος και την αεροδυναμική διάμετρό τους, τους χρόνους παραμονής τους στην ατμόσφαιρα και τέλος τους μηχανισμούς απομάκρυνσής τους από αυτήν. Τέτοιου είδους

γνώσεις είναι χρήσιμες, αφού τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα, αμέσως μετά τον σχηματισμό τους, προσκολλώνται στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και με αυτόν τον τρόπο μπορούν να πάρουν μέρος στις ατμοσφαιρικές διεργασίες.

Το **Παράρτημα Δ** περιλαμβάνει μερικά φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών, όπως είναι η ταξινόμηση με βάση την κοκκομετρική τους σύσταση, η οποία σχετίζεται με τη διαβρωσιμότητα.

Το **Παράρτημα Ε** αναλύει τις διεργασίες και τα είδη της διάβρωσης του εδάφους, δίνοντας πληροφορίες που συμπληρώνουν το 4^ο κεφάλαιο της παρούσας ΔΕ.

Το **Παράρτημα ΣΤ** περιέχει τη μαθηματική περιγραφή των θεωρητικών μοντέλων μετατροπής για τον υπολογισμό των ρυθμών ανακατανομής του χώματος (διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων). Η μαθηματική περιγραφή παραλείφθηκε στην § 4.9 ώστε να δοθεί έμφαση στις δυνατότητες και τους περιορισμούς που περιλαμβάνει το κάθε μοντέλο, χωρίς να διακόπτεται η ροή των κειμένων από πολλές μαθηματικές σχέσεις κι εξισώσεις.

Στο τέλος, παρατίθενται οι **βιβλιογραφικές αναφορές**, που απαντώνται στα κείμενα της παρούσας ΔΕ, πάνω στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξή της. Είναι πρακτικά αδύνατο να συμπεριληφθούν «όλες» οι υπάρχουσες σχετικές δημοσιεύσεις, οι οποίες άλλωστε φαντάζουν ανεξάντλητες...

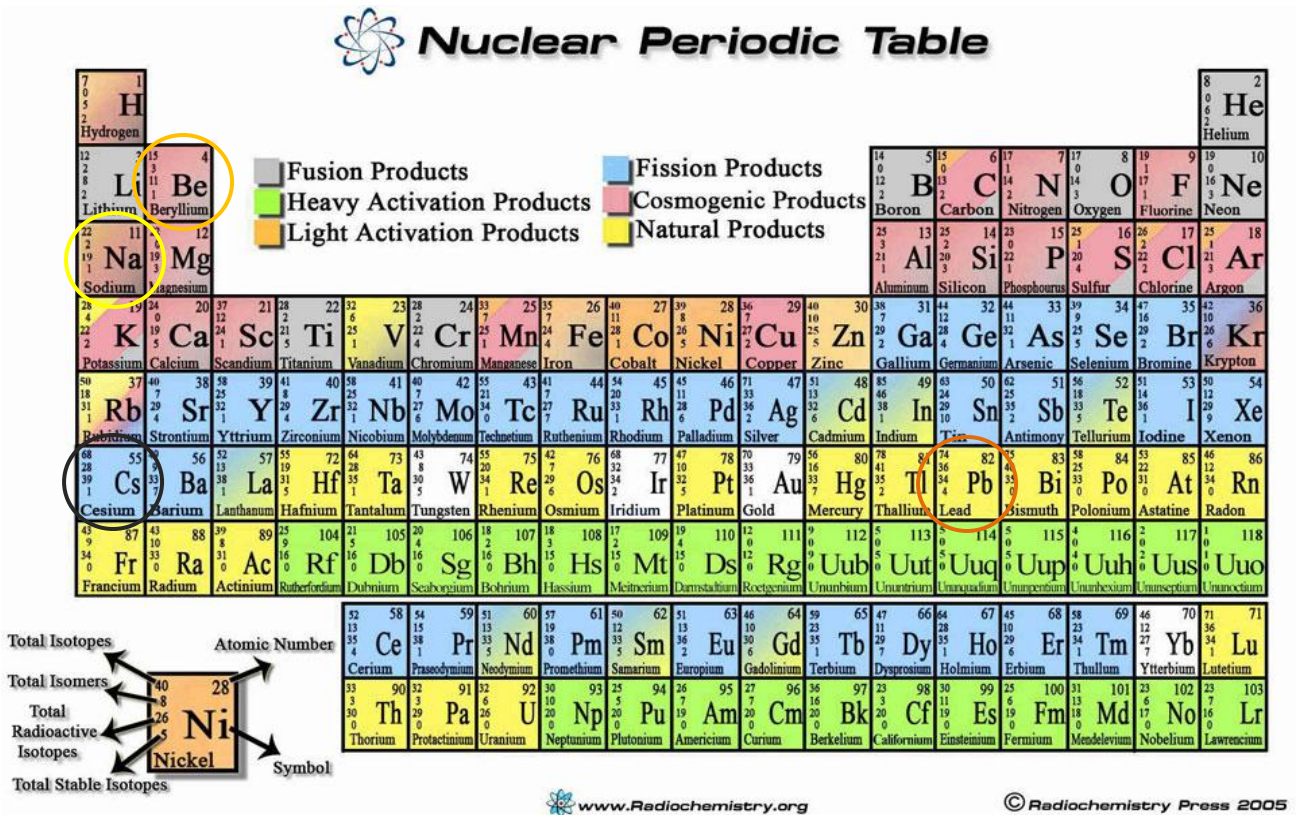
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΙΣΟΤΟΠΑ:

^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , ^{210}Pb και ^{137}Cs

2.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες αρκετά ραδιενεργά ισότοπα έχουν χρησιμοποιηθεί ως *ιχνηλάτες* ατμοσφαιρικών διεργασιών καθώς επίσης και διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων. Καθώς η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζεται στη χρήση των ραδιενεργών ισότοπων: ^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , ^{210}Pb και ^{137}Cs , ως ιχνηλατών τέτοιων περιβαλλοντικών διεργασιών, παρουσιάζεται αρχικά η θέση των αντίστοιχων στοιχείων στον Περιοδικό Πίνακα (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1

Περιοδικός Πίνακας των στοιχείων.

Σημειώνονται τα στοιχεία, τα ραδιενεργά ισότοπα των οποίων χρησιμοποιούνται σε μελέτες περιβαλλοντικών διεργασιών και αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Το βηρύλλιο (Be) έχει ατομικό αριθμό 4 και ανήκει στην ομάδα των αλκαλικών γαιών. Στη σταθερή του μορφή, είναι συστατικό κάποιων ορυκτών. Έχει αρκετά ισότοπα, από τα οποία μόνο το ${}^9\text{Be}$ είναι σταθερό. Τα ραδιενεργά ισότοπα ${}^7\text{Be}$ και ${}^{10}\text{Be}$ έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτες ατμοσφαιρικών διεργασιών, ενώ το ${}^7\text{Be}$ έχει χρησιμοποιηθεί και σε μελέτες βραχυχρόνιων και απότομων περιστατικών διάβρωσης του εδάφους.

Το νάτριο (Na) έχει ατομικό αριθμό 11 και ανήκει στην ομάδα I_A των αλκαλίων. Είναι μαλακό, αργυρόλευκο και πολύ δραστικό μέταλλο. Το μοναδικό σταθερό ισότοπο είναι το ${}^{23}\text{Na}$. Από τα υπόλοιπα ραδιενεργά ισότοπά του, ενδιαφέρον για ατμοσφαιρικές διεργασίες παρουσιάζει το ${}^{22}\text{Na}$.

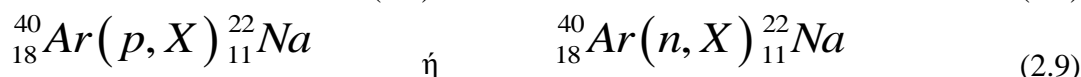
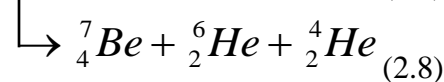
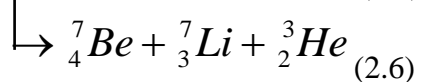
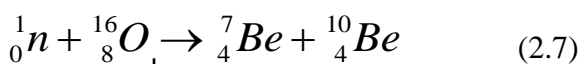
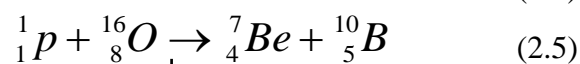
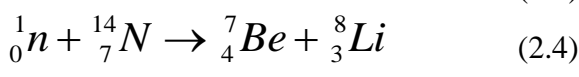
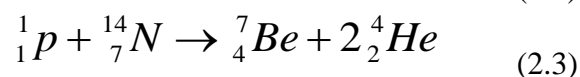
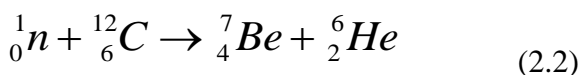
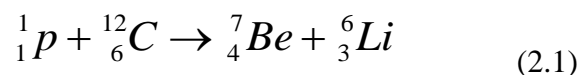
Το καίσιο (Cs), με ατομικό αριθμό 55, ανήκει στην ομάδα I_A των αλκαλίων. Μόνο το σταθερό ισότοπο ${}^{133}\text{Cs}$ είναι φυσικό. Από τα πιο γνωστά ραδιενεργά ισότοπα είναι το ${}^{137}\text{Cs}$, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε μελέτες διάβρωσης του εδάφους, αλλά και σε μελέτες ατμοσφαιρικών διεργασιών.

Ο μόλυβδος (Pb) έχει ατομικό αριθμό 82. Είναι μέταλλο, αρκετά μαλακό κι εύκαμπτο, χρώματος γκρίζου-μπλε. Έχει αρκετά ισότοπα σταθερά και ραδιενεργά. Το ραδιενεργό ισότοπο ${}^{210}\text{Pb}$ παρουσιάζει ενδιαφέρον για τη μελέτη περιβαλλοντικών διεργασιών στον επιφανειακό αέρα, και στο έδαφος.

2.2 Προέλευση και παραγωγή των υπό μελέτη ραδιενεργών ισotόπων

2.2.1 Προέλευση και παραγωγή των ${}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$ και ${}^{22}\text{Na}$

Το βηρύλλιο-7 (${}^7\text{Be}$), το βηρύλλιο-10 (${}^{10}\text{Be}$) και το νάτριο-22 (${}^{22}\text{Na}$) ⁽¹⁾ είναι φυσικά ραδιενεργά ισότοπα *κοσμικής προέλευσης*, τα οποία σχηματίζονται στην κατώτερη στρατόσφαιρα και στην ανώτερη τροπόσφαιρα ως αποτέλεσμα των αντιδράσεων κατακερματισμού (spallation reactions) ελαφρών ατμοσφαιρικών πυρήνων άνθρακα ($Z=6$), αζώτου ($Z=7$) και οξυγόνου ($Z=8$), για την περίπτωση του ${}^7\text{Be}$ και του ${}^{10}\text{Be}$, και πυρήνων αργού ($Z=18$), για την περίπτωση του ${}^{22}\text{Na}$, με τις κυριότερες συνιστώσες της κοσμικής ακτινοβολίας (πρωτόνια και νετρόνια). Το ενεργειακό κατώφλι του αργού προς σχηματισμό του ${}^{22}\text{Na}$ ($E_T \approx 200$ MeV) είναι μεγαλύτερο από αυτό των ελαφρύτερων στοιχείων προς σχηματισμό ${}^7\text{Be}$ ($E_T \approx 30$ MeV).

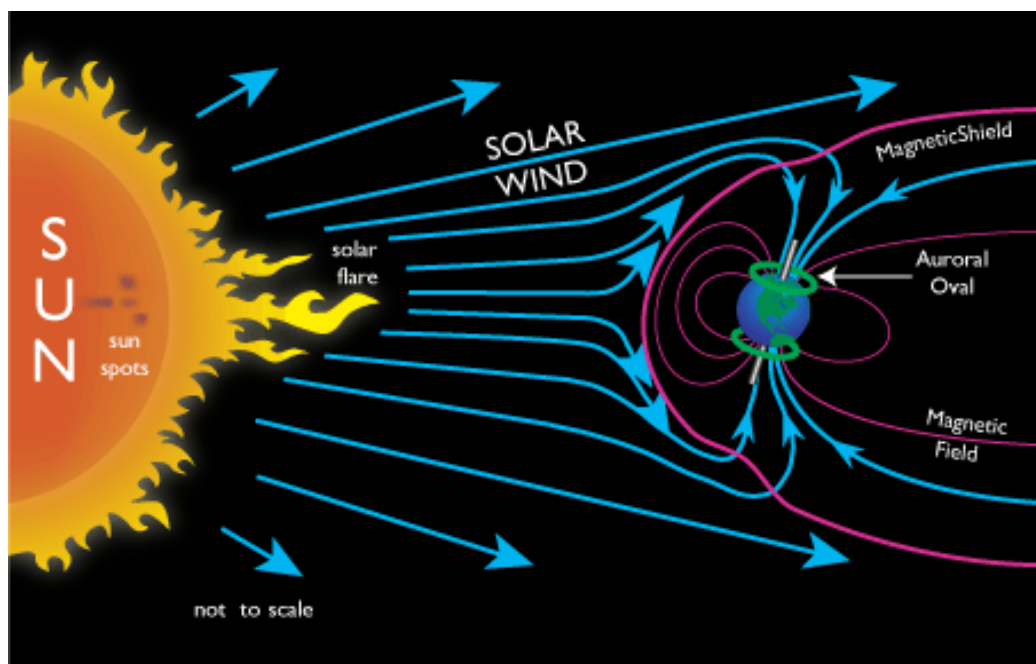


⁽¹⁾ Το ${}^{22}\text{Na}$ μπορεί επίσης να παραχθεί τεχνητά από πυρηνικές δοκιμές ή πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Οι ρυθμοί παραγωγής των ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης: ^7Be , ^{10}Be και ^{22}Na εξαρτώνται από την **ηλιακή δραστηριότητα**⁽²⁾. Η ένταση της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας στην τροχιά της γης σχετίζεται αντίστροφα με την ηλιακή δραστηριότητα διότι ο ηλιακός άνεμος θωρακίζει την τροχιά της γης από τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες. Έτσι, μια αύξηση της ηλιακής δραστηριότητας, η οποία μετριέται ως αύξηση του αριθμού των κηλίδων, οδηγεί σε μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στην τροχιά της γης κι επομένως σε μείωση του ρυθμού παραγωγής των προϊόντων της, όπως είναι τα ραδιενεργά ισότοπα κοσμικής προέλευσης: ^7Be , ^{10}Be και ^{22}Na . Αντίστροφα, κατά την περίοδο των ελαχίστων δράσης των ηλιακών κηλίδων, σημειώνεται αύξηση στη γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία, που εισέρχεται στο γήινο μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός παραγωγής των ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης (Εικόνα 2.2).

Επίσης, η παραγωγή των ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης εξαρτάται από το **γεωμαγνητικό πλάτος**, με τη μεγαλύτερη παραγωγή να λαμβάνει χώρα στους πόλους, λόγω της εκτροπής της κοσμικής ακτινοβολίας προς τις πολικές περιοχές (Εικόνα 2.3).

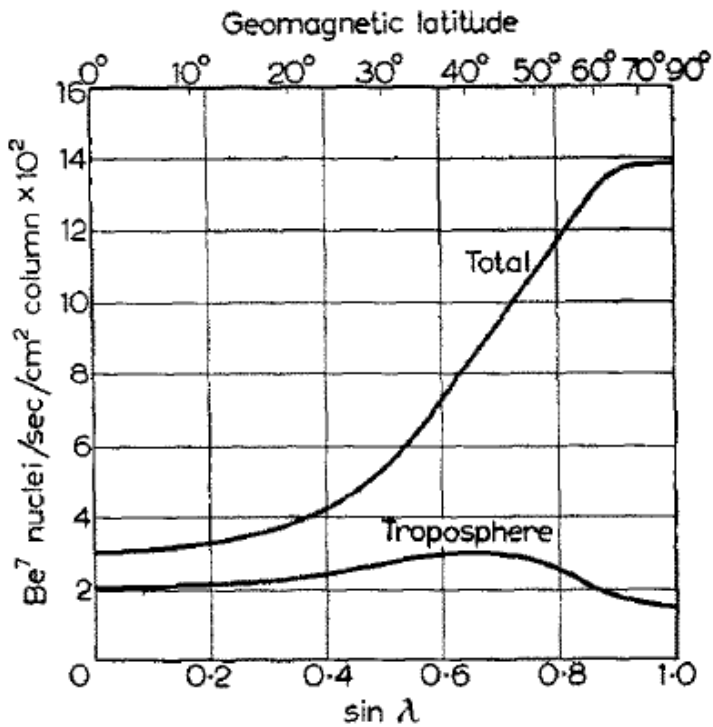
Τέλος, η παραγωγή τους επηρεάζεται από το **υψόμετρο**, με τα υψηλότερα επίπεδά της να λαμβάνουν χώρα στη στρατόσφαιρα από ό,τι στην τροπόσφαιρα. Τα δύο τρίτα περίπου των ^7Be και ^{10}Be παράγονται στην στρατόσφαιρα και το ένα τρίτο στην τροπόσφαιρα (Εικόνες 2.4 και 2.5).



Εικόνα 2.2

Ροή φορτισμένων σωματιδίων και ηλιακού ανέμου (άρα ροή κοσμικής ακτινοβολίας).

⁽²⁾ Βλ. Παράρτημα Α

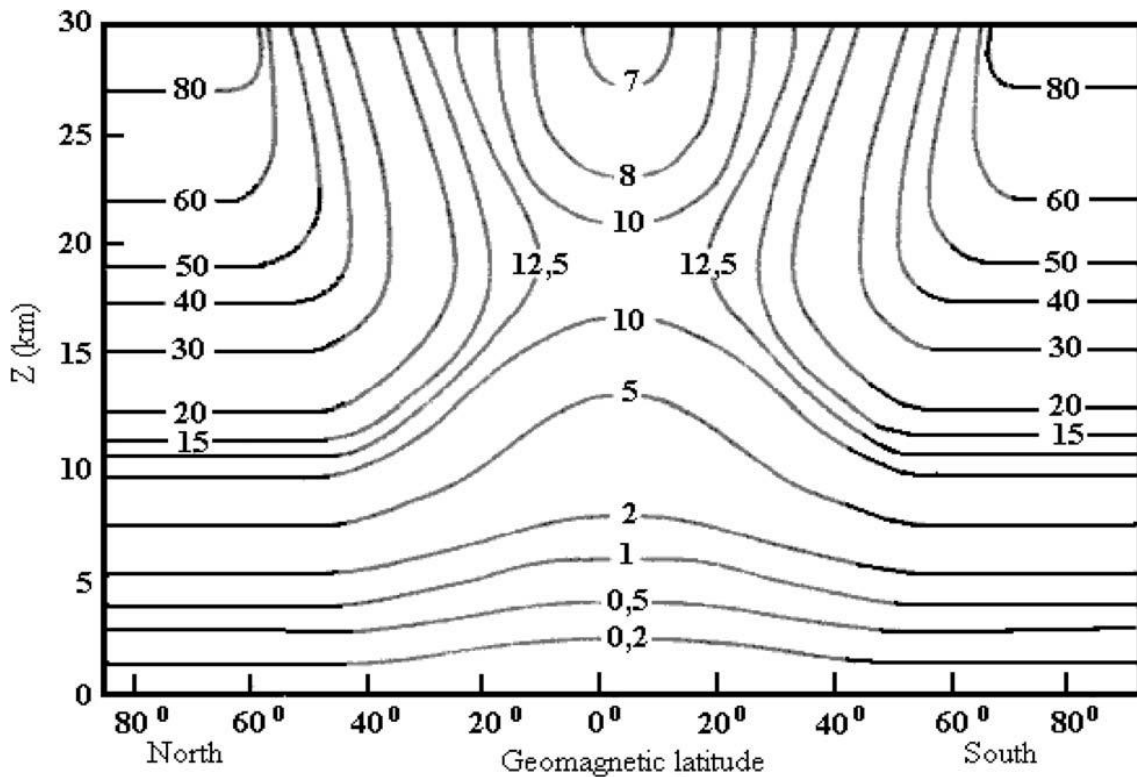


Εικόνα 2.3

Ρυθμός παραγωγής του ${}^7\text{Be}$ ως συνάρτηση του γεωμαγνητικού πλάτους για ολόκληρη την ατμόσφαιρα καθώς και για την τροπόσφαιρα μόνο.

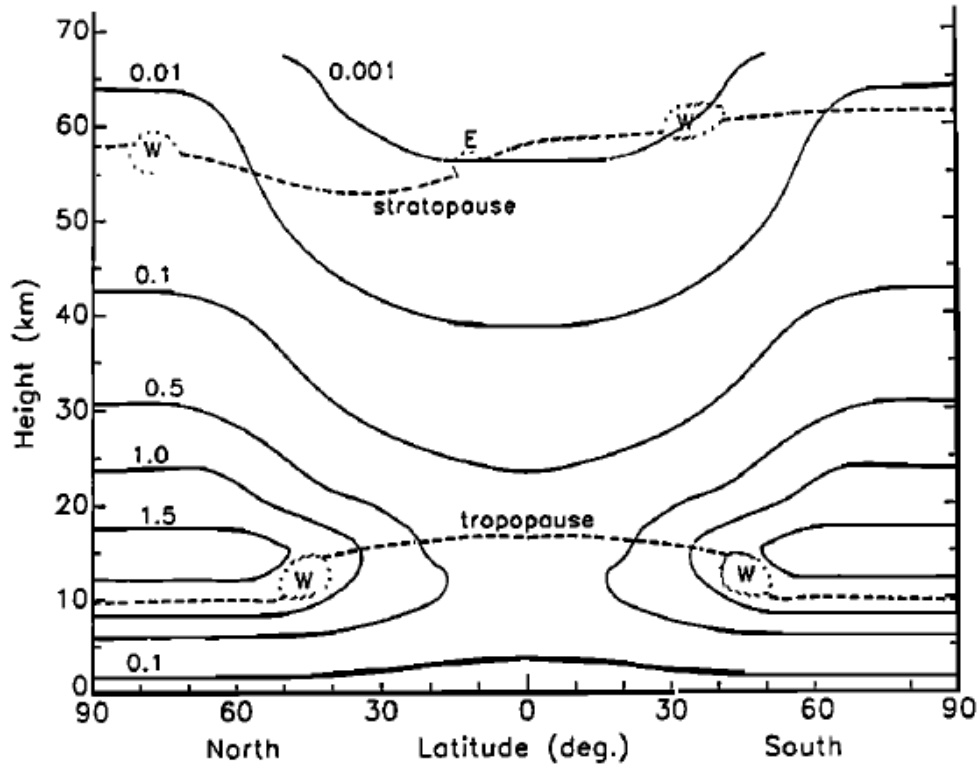
Είναι δυνατό να υπολογιστεί επίσης και ο ρυθμός παραγωγής του ${}^{10}\text{Be}$ πολλαπλασιάζοντας επί 1,17 τον κατακόρυφο άξονα.

(Lal et al., 1958)



Εικόνα 2.4

Ρυθμός παραγωγής ($\text{nuclei m}^{-3} \text{min}^{-1}$) του ${}^7\text{Be}$ σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. (Lal et al., 1967 όπως παρατίθεται στους Jasiulionis and Wershofen, 2005)



Εικόνα 2.5

Ρυθμός παραγωγής ($\text{atoms cm}^{-3} \text{y}^{-1}$) του ^{10}Be σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Οι δυτικοί (W, westerlies) και οι ανατολικοί (E, easterlies) άνεμοι έχουν τοποθετηθεί θεωρώντας ότι είναι καλοκαίρι στο βόρειο ημισφαίριο.

(Lal et al., 1967 όπως παρατίθεται στους McHargue and Damon, 1991)

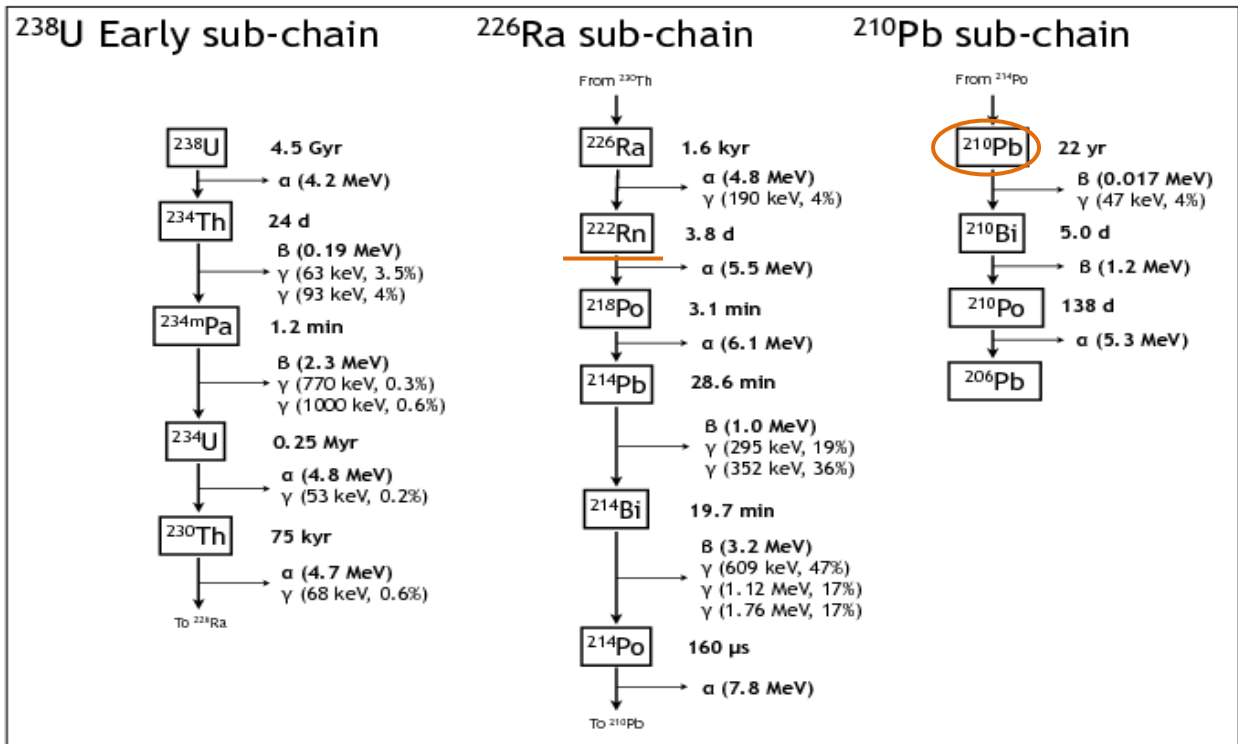
2.2.2 Προέλευση και παραγωγή του ^{210}Pb

Ο μόλυβδος-210 (^{210}Pb) είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο, το οποίο αποτελεί προϊόν της σειράς του ^{238}U (Εικόνα 2.6) που περιέχεται στον φλοιό της γης. Θεωρητικά το ^{226}Ra και ο ^{210}Pb θα έπρεπε να βρίσκονται σε αιώνια ισορροπία, αλλά εξαιτίας της διάχυσης του ευγενούς αερίου ^{222}Rn , μπορεί να συμβεί διαταραχή αυτής της ισορροπίας σε φυσικά υλικά. Ένα ποσοστό του ^{222}Rn διαφεύγει από τα γεωλογικά υλικά και διασκορπίζεται στον αέρα ή στα ανώτερα στρώματα του εδάφους, με αποτέλεσμα τη διαταραχή της ισορροπίας μεταξύ των πατρικών και θυγατρικών ραδιενεργών ισωτόπων. Περίπου το 10% του ^{222}Rn που παράγεται από τη ραδιενεργό διάσπαση του ^{226}Ra στο ανώτερο 1m του εδάφους ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα (Turekian et al., 1989). Όταν το ^{222}Rn διαφεύγει στον αέρα, τα θυγατρικά του προϊόντα (συμπεριλαμβανομένου και του ^{210}Pb) προσροφώνται στα σωματίδια του ατμοσφαιρικού αεροζόλ, τα οποία καταλήγουν στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα το επιφανειακό στρώμα του εδάφους να περιέχει μεγαλύτερη συγκέντρωση ^{210}Pb από αυτήν που αναμένεται από την ισορροπία του με το ^{226}Ra .

Η ποσότητα του ^{210}Pb , που βρίσκεται σε ισορροπία με το ^{226}Ra , αποκαλείται “**supported ^{210}Pb** ” και η ραδιενέργειά του μειώνεται με το χρόνο υποδιπλασιασμού του ^{226}Ra (1620 έτη).

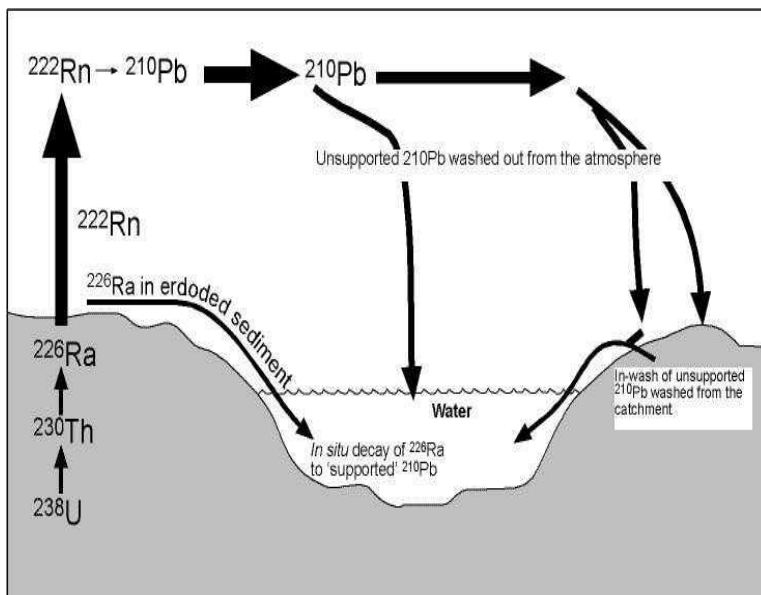
Ο ^{210}Pb που περισσεύει αποκαλείται “*unsupported ^{210}Pb* ” ή “*excess ^{210}Pb* ”, συμβολίζεται ως $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και η ραδιενέργειά του μειώνεται με το χρόνο υποδιπλασιασμού του ^{210}Pb (~22 έτη). Δηλαδή, ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ είναι εκείνος που παράγεται στην ατμόσφαιρα κοντά στο επιφανειακό επίπεδο από τη ραδιενεργό διάσπαση του πατρικού του ^{222}Rn ($T_{1/2}=3,82$ ημέρες), το οποίο απελευθερώνεται από το έδαφος των ηπειρωτικών επιφανειών στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 2.7).

238U Chain



Εικόνα 2.6 Η ραδιενεργός σειρά του ^{238}U .

Αναγράφονται οι χρόνοι υποδιπλασιασμού των ραδιενεργών ισοτόπων, το είδος των διασπάσεων (α,β,γ) που πραγματοποιούνται, η αντίστοιχη ενέργεια (MeV ή keV) και το ποσοστό εκπομπής των φωτονίων-γ.



Εικόνα 2.7

Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας του “supported ^{210}Pb ” και “excess ^{210}Pb ” ή $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$.

2.2.3 Προέλευση και παραγωγή του ^{137}Cs

Το καίσιο-137 (^{137}Cs) είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο *ανθρωπογενούς προέλευσης*, το οποίο δημιουργείται ως προϊόν πυρηνικών σχάσεων. Είναι συνιστώσα της αλυσίδας της ραδιενεργού διάσπασης του ^{137}I :

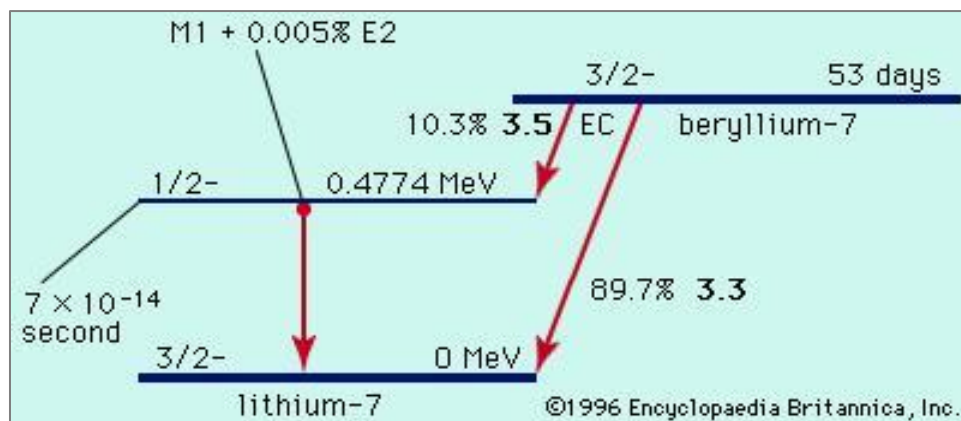


Οι κύριες πηγές του ^{137}Cs , που υπάρχουν στο περιβάλλον, είναι οι ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές που διεξήχθησαν κατά την περίοδο από τα τέλη της δεκαετίας του '50 μέχρι τη δεκαετία του '70, το ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό του Chernobyl το 1986 και οι ελεγχόμενες αποδεσμεύσεις σε τοπική κλίμακα από πυρηνικούς αντιδραστήρες και εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας πυρηνικών αποβλήτων. Σήμερα, η κυρίαρχη πηγή του ^{137}Cs είναι η επαναιώρησή του από το έδαφος, όπου είχε εναποτεθεί παλαιότερα, και η επανεκπομπή του από καύσεις βιομάζας.

2.3 Διάσπαση των υπό μελέτη ραδιενεργών ισωτόπων

2.3.1 Ραδιενεργός διάσπαση του ^7Be

Το ^7Be μεταστοιχείωνεται με σύλληψη ηλεκτρονίου (electron capture, EC) σε ^7Li κι εκπέμπει ακτινοβολία γάμμα ενέργειας **477,6 keV** με ποσοστό εκπομπής 10,3%. Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού: $T_{1/2} = 53,3$ ημέρες.

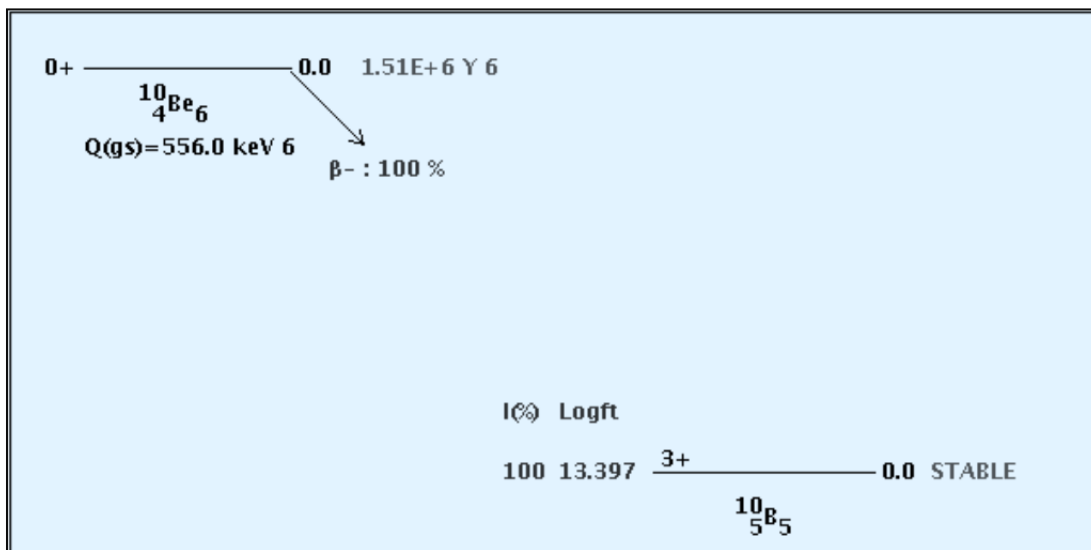
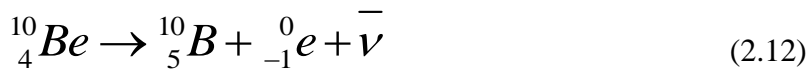


Εικόνα 2.8

Σχηματική απεικόνιση της ραδιενεργού διάσπασης του ^7Be .

2.3.2 Ραδιενεργός διάσπαση του ^{10}Be

Το ^{10}Be μεταστοιχειώνεται σε ^{10}B με διάσπαση β^- . Εκπέμπει *μόνο ακτινοβολία β^-* . Έχει πολύ μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού: $T_{1/2} = 1,5 \times 10^6$ έτη.

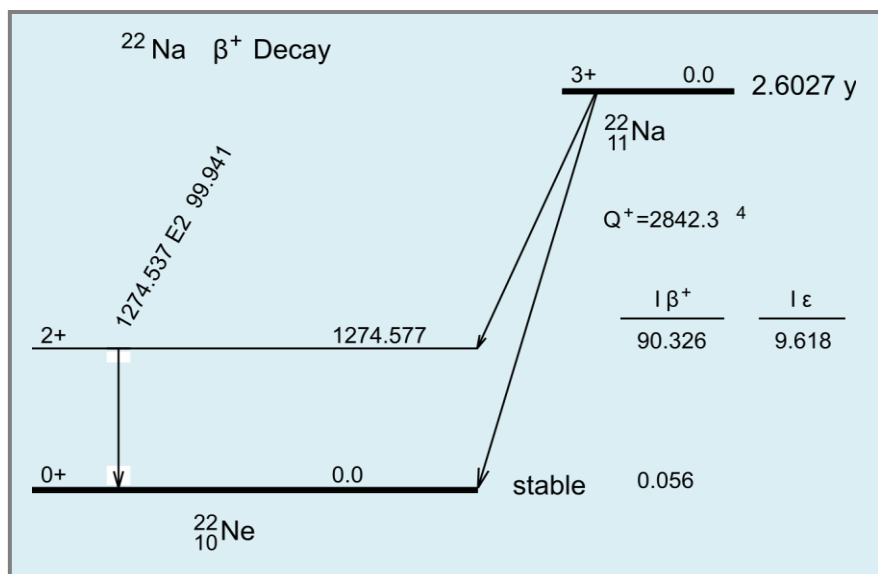


Εικόνα 2.9

Σχηματική απεικόνιση της ραδιενεργού διάσπασης του ^{10}Be .

2.3.3 Ραδιενεργός διάσπαση του ^{22}Na

Το ^{22}Na μεταστοιχειώνεται σε ^{22}Ne με διάσπαση β^+ . Εκπέμπει ακτινοβολία γάμμα ενέργειας **1274,5 keV**. Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού: $T_{1/2} = 2,6$ έτη.

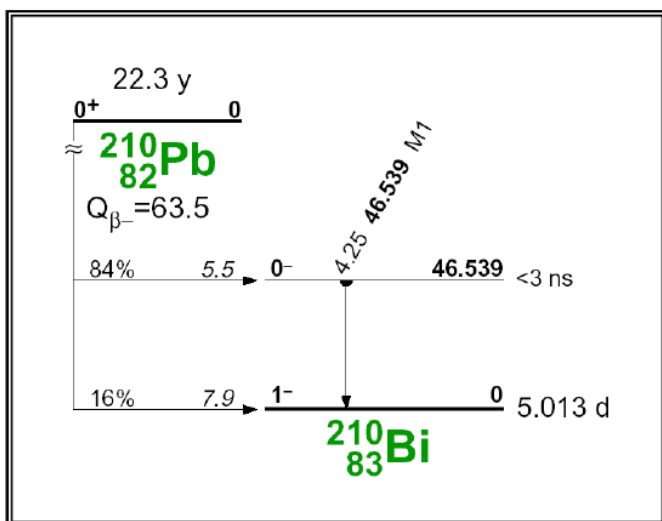
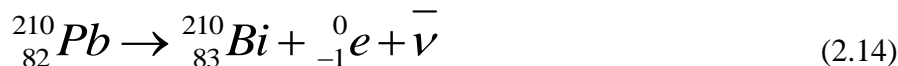


Εικόνα 2.10

Σχηματική απεικόνιση της ραδιενεργού διάσπασης του ^{22}Na .

2.3.4 Ραδιενεργός διάσπαση του ^{210}Pb

Ο ^{210}Pb μεταστοιχειώνεται σε ^{210}Bi με διάσπαση β^- . Κατά τη διάσπασή του, εκπέμπει σωματίδια-β μέγιστων ενεργειών 17,0 keV (84%) και 63,5 keV (16%) καθώς επίσης και ακτοβολία-γ 46,5 keV με χαμηλό ποσοστό εκπομπής 4,25%. Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού: $T_{1/2} = 22,3$ έτη.

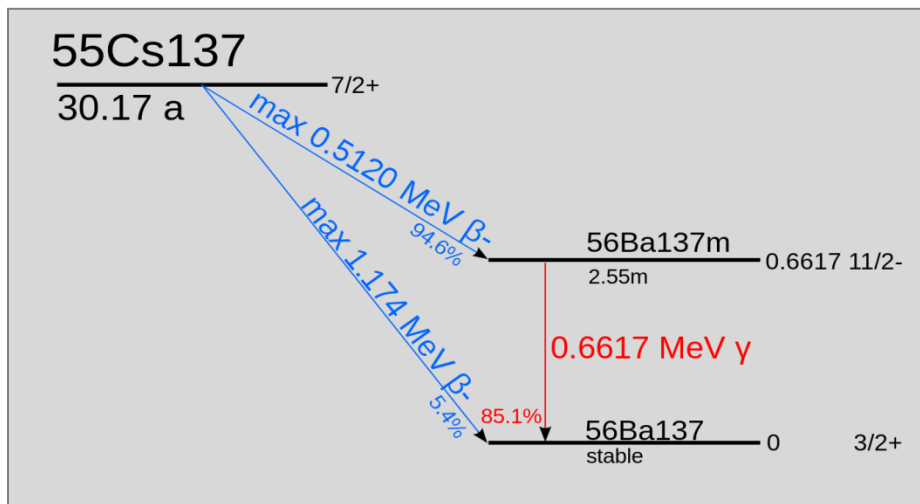
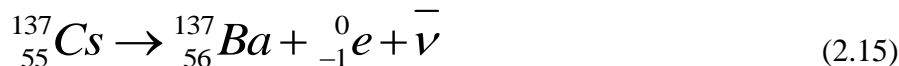


Εικόνα 2.11

Σχηματική απεικόνιση της ραδιενεργού διάσπασης του ^{210}Pb .

2.3.5 Ραδιενεργός διάσπαση του ^{137}Cs

Το ^{137}Cs μεταστοιχειώνεται σε ^{137}Ba με διάσπαση β^- . Εκπέμπει σωματίδια-β με μέγιστες ενέργειες 514 keV (94,4%) και 1175 keV (5,4%) και ακτινοβολία-γ 661,7 keV με ποσοστό εκπομπής 85,1%. Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού: $T_{1/2} = 30,2$ έτη.



Εικόνα 2.12

Σχηματική απεικόνιση της ραδιενεργού διάσπασης του ^{137}Cs .

2.4 Μέτρηση της ραδιενέργειας των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων

Η ραδιενέργεια στο περιβάλλον έχει μελετηθεί εκτενώς σε παγκόσμια κλίμακα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη του κλάδου της ραδιοοικολογίας, ενώ τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον στρέφεται όλο και περισσότερο στη χρήση ραδιενεργών ισοτόπων ως ιχνηλατών περιβαλλοντικών διεργασιών. Προϋπόθεση για την επίτευξη τέτοιων μελετών αποτελεί η δυνατότητα μετρήσεων υψηλής ποιότητας, ενώ η βελτίωση των ορίων ανίχνευσης είναι συχνά ζωτικής σημασίας (Anagnostakis, 2015). Λόγω των ολοένα αυξανόμενων ερευνητικών αναγκών, ο τομέας των μετρήσεων ραδιενέργειας στο περιβάλλον έχει παρουσιάσει μεγάλη πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες. Οι αναλυτικές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να μπορούν να εκμεταλλεύονται πλήρως τις δυνατότητες του ήδη υπάρχοντος εξοπλισμού, ενώ ταυτόχρονα δοκιμάζονται καινοτόμες εφαρμογές.

Ανάμεσα στις τεχνικές οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες για την ανάλυση της ραδιενέργειας στο περιβάλλον είναι η φασματοσκοπία- γ , η φασματοσκοπία- α και η φασματοσκοπία υγρού σπινθηρισμού. Καθώς η φασματοσκοπία- α απαιτεί ραδιοχημική επεξεργασία και είναι χρονοβόρα κι επίπονη, δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για μελέτες περιβαλλοντικής ραδιενέργειας, ενώ η φασματοσκοπία- γ αποτελεί την κυρίαρχη τεχνική ανάλυσης της ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Από την άλλη, ο υγρός σπινθηρισμός υπερέχει στην ανάλυση υγρών δειγμάτων (Anagnostakis, 2015).

Εκτός από τις ραδιομετρικές τεχνικές, έχουν επίσης εφαρμοστεί και τεχνικές φασματοσκοπίας μάζας. Εντούτοις, είναι δαπανηρές και η εφαρμογή τους σε περιβαλλοντικά δείγματα είναι περιορισμένη, ειδικά όταν απαιτούνται μετρήσεις σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Ακολουθεί μια παρουσίαση των παραπάνω τεχνικών, η οποία στοχεύει στην ανάδειξη των δυνατοτήτων και περιορισμών τους ως προς τη μέτρηση της ραδιενέργειας των υπό μελέτη ισοτόπων: ^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , ^{210}Pb και ^{137}Cs σε περιβαλλοντικά δείγματα. Δίνεται έμφαση στη φασματοσκοπία- γ , η οποία, εκμεταλλευόμενη τις ιδιότητες των ημιαγωγών και τις δυνατότητες που παρέχουν, έχει εξελιχθεί ως η ευρύτερα κι ευκολότερα εφαρμοζόμενη μέθοδος.

2.4.1 Φασματοσκοπία γάμμα

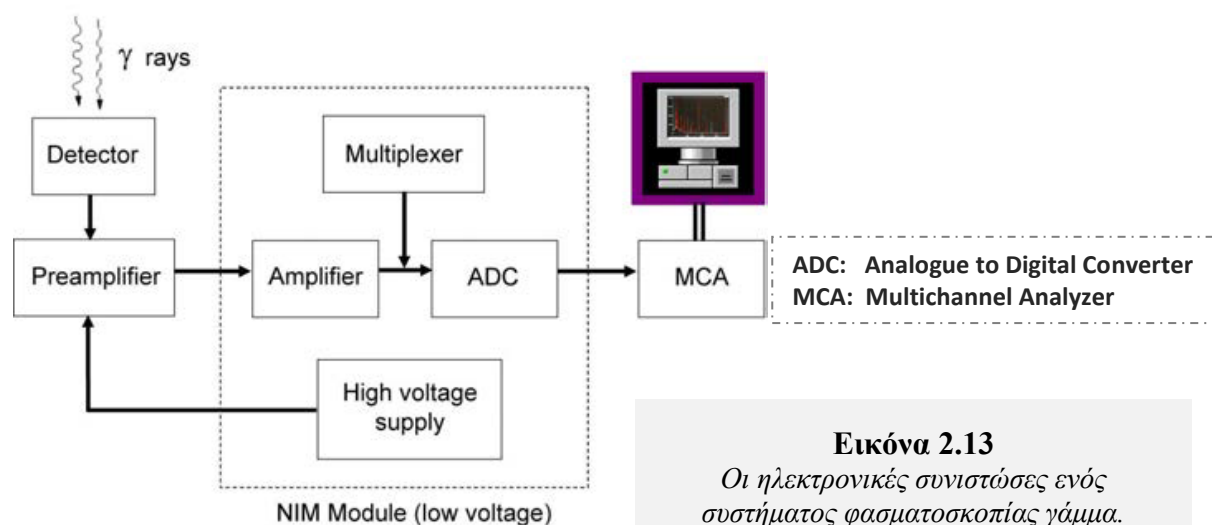
Η φασματοσκοπία- γ αποτελεί μια εξαιρετική αναλυτική τεχνική για τη μέτρηση φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων. Η μέθοδος επιτρέπει τόσο τον ποιοτικό όσο και τον ποσοτικό προσδιορισμό των ραδιενεργών ισοτόπων άμεσα στο αρχικό δείγμα μέσω της ανίχνευσης των ακτίνων- γ χωρίς την ανάγκη χημικών διαχωρισμών.

Οι περισσότεροι ανιχνευτές ακτινοβολίας- γ είναι κατασκευασμένοι από κρυστάλλους γερμανίου υψηλής καθαρότητας (High Purity Germanium detectors, HPGe), οι οποίοι έχουν σταθεροποιηθεί μηχανικά σε έναν κύλινδρο διαφόρων διαστάσεων. Ο κρύσταλλος συμπεριφέρεται ως ημιαγωγός στον οποίο εφαρμόζεται υψηλή τάση ανάστροφης πόλωσης σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Οι κρύσταλλοι γερμανίου παράγουν ελεύθερα ηλεκτρόνια όταν απορροφούν την ενέργεια που ελευθερώνεται από τη διάσπαση των ραδιενεργών ισοτόπων. Το ηλεκτρικό φορτίο (ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών), που παράγεται από την απορρόφηση των

ακτίνων-γ, κατευθύνεται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου σε ειδικές επαφές στις απέναντι πλευρές του κρυστάλλου γερμανίου. Το μέγεθος του ηλεκτρικού φορτίου στον κρύσταλλο σχετίζεται άμεσα με την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας γάμμα.

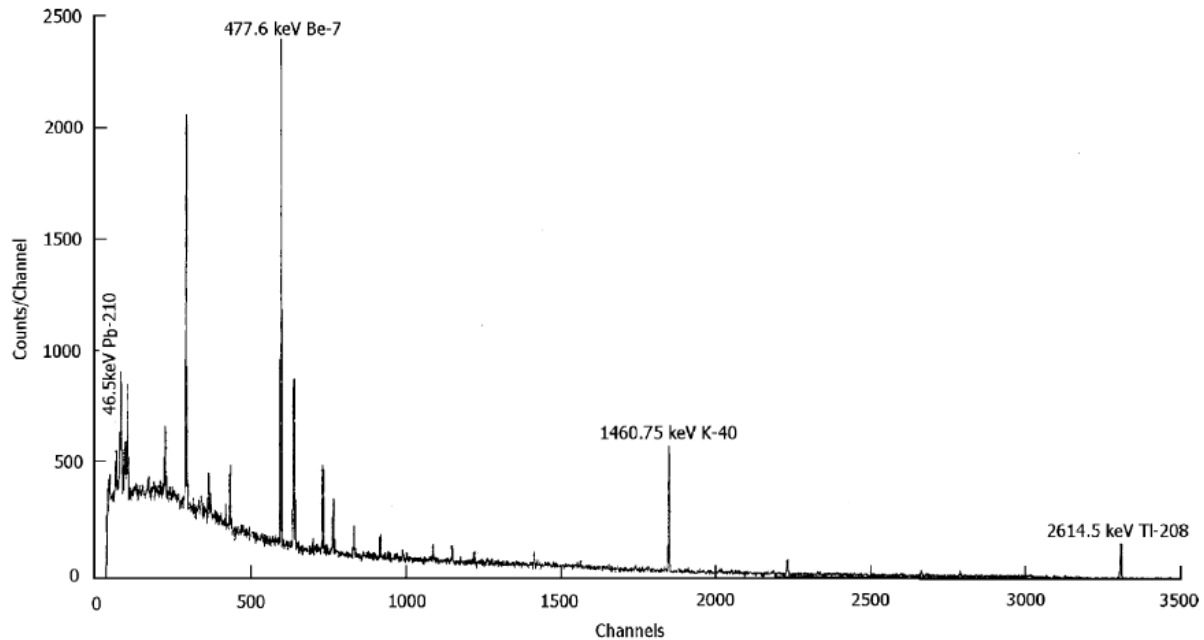
Το ηλεκτρικό φορτίο ολοκληρώνεται από έναν ευαίσθητο σε φορτία προενισχυτή και μετατρέπεται σε παλμό τάσης με τιμή ανάλογη της ενέργειας του φωτονίου από το οποίο προήλθε. Είναι δυνατή η ταυτόχρονη ανίχνευση διαφόρων εκπομπών-γ στο ίδιο δείγμα υλικού. Τα σήματα ενισχύονται και μεταφέρονται στον πολυκαναλικό αναλυτή (multichannel analyzer, MCA) (Εικόνα 2.13). Η διαδικασία συσχέτισης της ενέργειας των φωτονίων με τα κανάλια του πολυκαναλικού ανιχνευτή αποτελεί την ενεργειακή βαθμονόμηση της διάταξης.

Παράγεται τότε ένα ενεργειακό φάσμα⁽³⁾ ακτινοβολίας-γ χαρακτηριστικό των ραδιενεργών ισοτόπων (Εικόνα 2.14), ως αποτέλεσμα τριών φαινομένων (φωτοηλεκτρικού, Compton και δίδυμης γένεσης) εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των ακτίνων-γ με τον κρύσταλλο γερμανίου. Η μετατροπή της καθαρής επιφάνειας της κορυφής, δηλαδή των καταμετρήσεων ανά δευτερόλεπτο (counts per second) του υπό μελέτη ραδιενεργού ισοτόπου, σε ειδική ραδιενέργεια ($Bq\ kg^{-1}$) καθώς επίσης και η επεξεργασία των δεδομένων ολόκληρου του φάσματος πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό.



Εικόνα 2.13
Οι ηλεκτρονικές συνιστώσες ενός συστήματος φασματοσκοπίας γάμμα. (IAEA-TECDOC-1741, 2014)

⁽³⁾ Κατά τη διάσπαση ενός ραδιενεργού ισοτόπου, το φάσμα εκπομπής των ακτίνων-γ που εκπέμπεται είναι γραμμικό αφού αποτελείται από φωτόνια διακριτών ενεργειών. Παρόλα αυτά, στις ανιχνευτικές διατάξεις ακτινοβολίας-γ καταγράφεται σύνθετο φάσμα αποτελούμενο από συνεχή και γραμμική συνιστώσα. Η γραμμική συνιστώσα (φωτοκορυφή) οφείλεται στα φωτόνια της αντίστοιχης ενέργειας, τα οποία αφήνουν όλη την ενέργειά τους στον ανιχνευτή (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Η συνεχή συνιστώσα οφείλεται στα φωτόνια εκείνα που αποθέτουν στον ανιχνευτή μέρος της ενέργειάς τους (π.χ. εξαιτίας της σκέδασης Compton), όπως επίσης και στο υπόστρωμα (π.χ. εξαιτίας της κοσμικής ακτινοβολίας). Το ύψος και η επιφάνεια της φωτοκορυφής εξαρτάται από το πλήθος των απορροφώμενων φωτονίων.

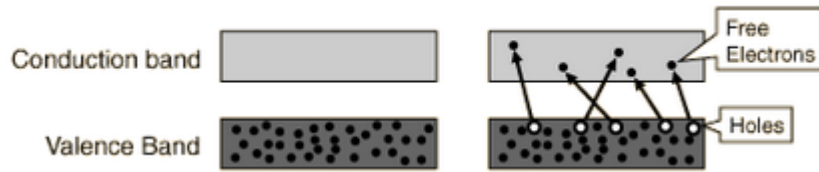


Εικόνα 2.14

Τυπικό φάσμα ακτίνων-γ φίλτρου αέρα που προκύπτει από ανιχνευτή Ge.
(Papastefanou, 2006)

Μία συνιστώσα της ανιχνευτικής διάταξης - πέραν του ανιχνευτή - που έχει μεγάλη επίδραση στο υπόστρωμα του συλλεγόμενου φάσματος είναι η θωράκιση. Εξαιρετική σημασία έχει το πάχος και η καθαρότητα του υλικού, καθώς και η γεωμετρία της θωράκισης. Συνήθως η θωράκιση έχει εσωτερική επένδυση από μια σειρά από στρώματα μικρού πάχους, από διάφορα υλικά με σταδιακά μειούμενο ατομικό αριθμό Z , που στόχο έχουν να θωρακίσουν τον ανιχνευτή από τις ακτίνες- X , που παράγονται μέσα στο ίδιο το υλικό της θωράκισης, κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας της πηγής με αυτήν. Ένα υλικό που περιέχεται συνήθως στη θωράκιση είναι ο μόλυβδος.

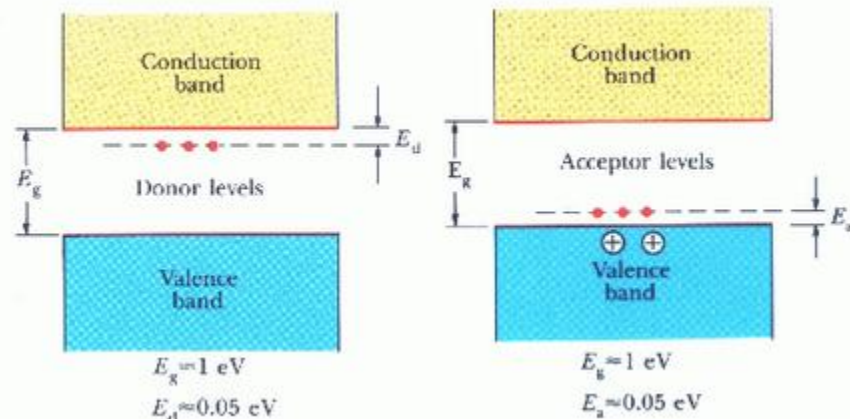
Ο κυριότερος περιορισμός των ανιχνευτών γερμανίου είναι ότι πρέπει να λειτουργούν σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, τα ηλεκτρόνια μπορούν εύκολα να διασχίσουν το ενεργειακό χάσμα και να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας, όπου είναι ελεύθερα να ανταποκρίνονται στο ηλεκτρικό πεδίο, με συνέπεια να παράγεται ηλεκτρικός θόρυβος. Για να αποφευχθεί αυτό το αποτέλεσμα, οι ανιχνευτές HPGc είναι συνδεδεμένοι με κρυστατικό σύστημα ψύξης, τοποθετημένο μέσα σε δοχείο Dewar που περιέχει υγρό άζωτο (θερμοκρασίας 77,4K), προκειμένου να μειωθεί η θερμική διέγερση των ηλεκτρονίων της ζώνης σθένους. Με αυτόν τον τρόπο, μόνο η αλληλεπίδραση με ακτινοβολία- γ να μπορεί να δώσει σε ένα ηλεκτρόνιο την απαιτούμενη ενέργεια για να διασχίσει το ενεργειακό χάσμα και να μεταβεί στη ζώνη αγωγιμότητας (Εικόνες 2.15 και 2.16).



Εικόνα 2.15

Η ηλεκτρονική διάταξη ημιαγωγού σε $T=0K$ (αριστερά) και σε $T>0K$ (δεξιά).

Πηγή: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/semcn.html>



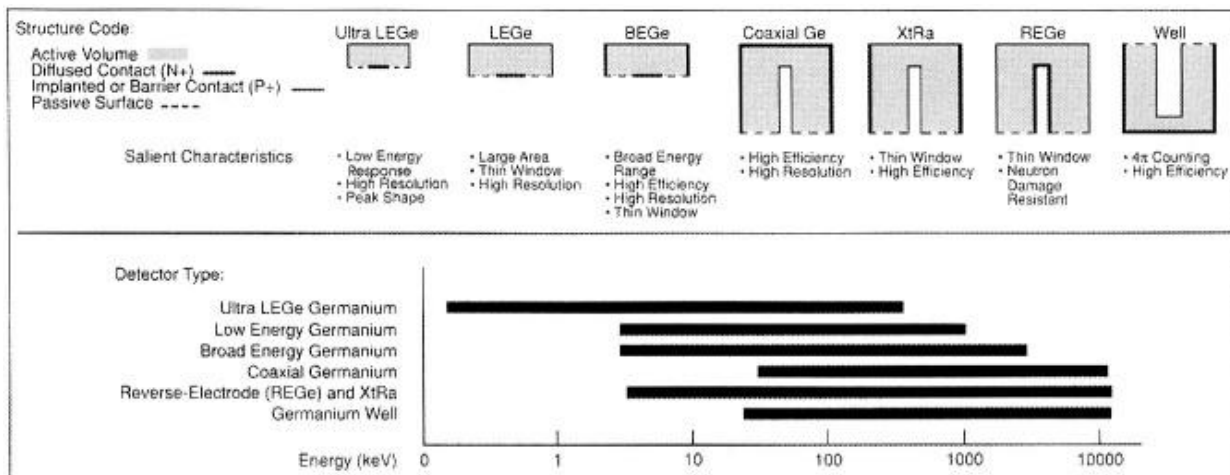
Εικόνα 2.16

Ηλεκτρονική διάταξη ημιαγωγού τύπου n (αριστερά) και τύπου p (δεξιά).

Πηγή: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/semcn.html>

Κατά την κατασκευή ενός ανιχνευτή, χρησιμοποιούνται λεπτά στρώματα από υλικά ημιαγωγών προκειμένου να δημιουργηθούν οι ηλεκτρικές επαφές του. Οι ανιχνευτές HPGe χρησιμοποιούν διάχυση λιθίου για τη δημιουργία μιας παχιάς (~600μm) επαφής n, η οποία είναι δότης και ένα λεπτό (~0.3μm) εμφύτευμα βορίου για τη δημιουργία επαφής p, η οποία είναι δέκτης. Η μορφή, η θέση και το πάχος των επαφών προσδιορίζουν τη σύνθεση του ανιχνευτή καθώς και το ενεργειακό εύρος για το οποίο μπορούν να λειτουργούν. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές συνθέσεις για τη μορφή του κρυστάλλου γερμανίου, για τους τρόπους με τους οποίους εφαρμόζεται η τάση και για τον τρόπο με τον οποίο συλλέγεται το ηλεκτρικό φορτίο που προκύπτει από τις ακτίνες-γ. Στην Εικόνα 2.17 απεικονίζονται οι συνθέσεις των διαφορετικών τύπων ανιχνευτών της εταιρείας Canberra καθώς και τα αντίστοιχα ενεργειακά εύρη στα οποία λειτουργούν. Ανιχνευτές HPGe με κεντρική επαφή p αναφέρονται ως ανιχνευτές «τύπου P», ενώ εκείνοι με κεντρική επαφή n αναφέρονται ως ανιχνευτές «τύπου N». Για παράδειγμα, στην Εικόνα 2.17, ο ομοαξονικός (coaxial) ανιχνευτής Ge κατατάσσεται στους ανιχνευτές «τύπου P» και ο REGe στους ανιχνευτές «τύπου N». Ένας ομοαξονικός ανιχνευτής «τύπου P» μπορεί να λειτουργήσει σε ενεργειακό εύρος από 40 keV έως 10 MeV. Εντούτοις, για φωτόνια χαμηλών ενεργειών, η απόδοση της ανίχνευσης μειώνεται σημαντικά. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση ανιχνευτών

«τύπου N», οι οποίοι αυξάνουν κατά πολύ την απόδοση, ειδικά για ενέργειες μικρότερες από 100keV, καθιστώντας τους κατάλληλους για τη μέτρηση ακτίνων-γ χαμηλών, αλλά και υψηλών, ενεργειών. Το ενεργειακό εύρος αυτών των ανιχνευτών κυμαίνεται από 3keV έως 10MeV.



Εικόνα 2.17

*Διάφορες γεωμετρίες ανιχνευτών και ενεργειακό εύρος στο οποίο λειτουργούν καλύτερα.
(Canberra Detector user's manual)*

Στη συνέχεια, αναφέρουμε περιληπτικά μερικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών γερμανίου, με τη σειρά που έχουν τοποθετηθεί στην Εικόνα 2.17.

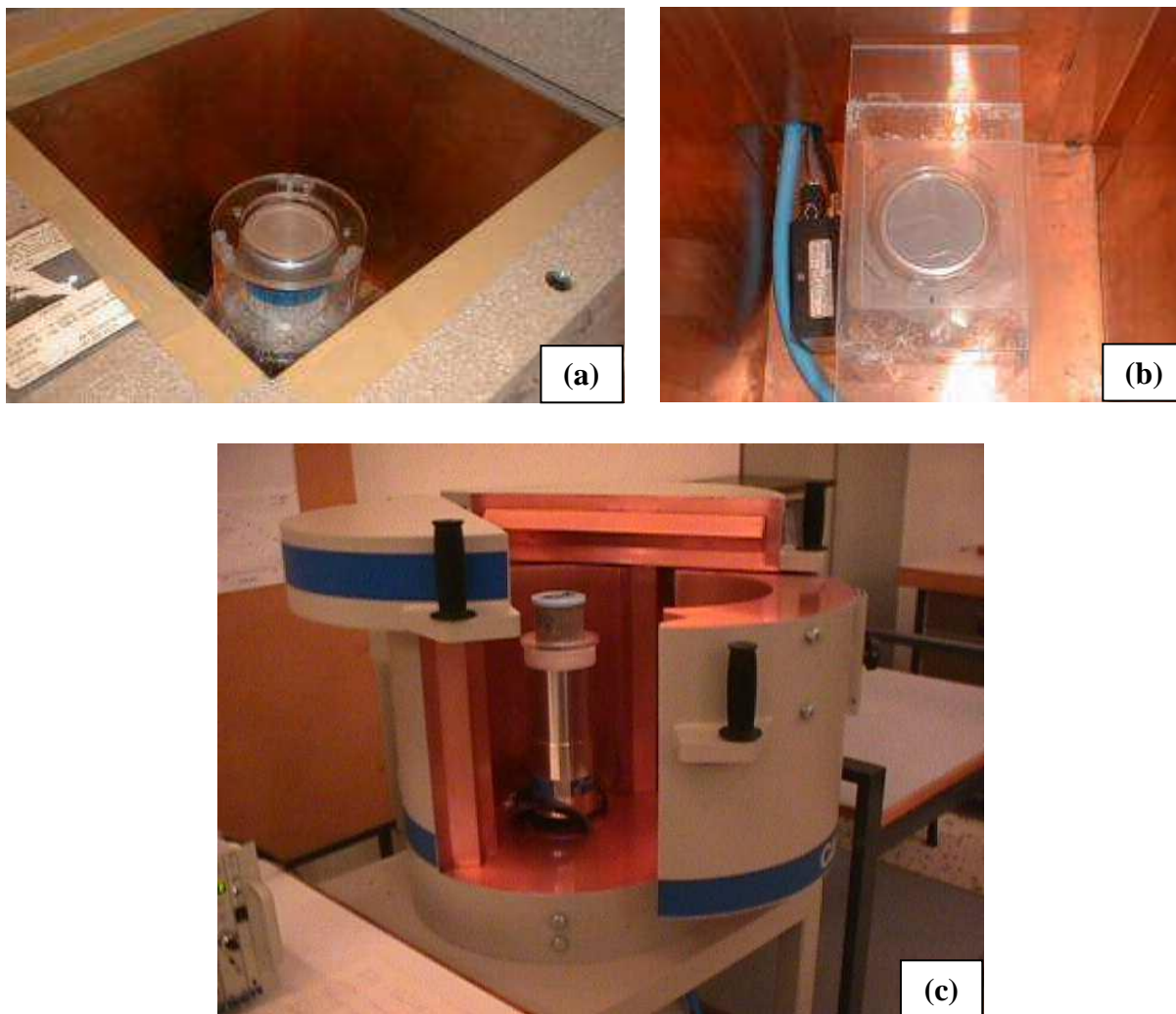
- Οι ανιχνευτές **γερμανίου χαμηλών ενεργειών** (Low Energy Ge detector, **LEGe**) είναι κατασκευασμένοι από κρύσταλλο Ge «τύπου N». Διαθέτουν κρυστάτη με παράθυρο από Be με συνέπεια την υψηλή απόδοση ανίχνευσης φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Η τεχνολογική ανάπτυξη οδήγησε επίσης στη δημιουργία των ανιχνευτών **Ultra LEGe**, οι οποίοι έχουν υψηλή απόδοση σε ακόμη χαμηλότερες ενέργειες, αφού για την κατασκευή του παραθύρου του κρυστάτη χρησιμοποιούν πολυμερή φιλμ στηριγμένα σε νήματα πυριτίου.
- Οι ανιχνευτές **γερμανίου πλατειάς ενεργειακής περιοχής** (Broad Energy Ge detector, **BEGe**) καλύπτουν όσο το δυνατό μεγαλύτερη ενεργειακή περιοχή ακτινοβολίας-γ (3keV-3MeV) με διακριτική ικανότητα που, για τις χαμηλές ενέργειες, συγκρίνεται με αυτή των ανιχνευτών LEGe, ενώ για τις υψηλές ενέργειες συγκρίνεται με τη διακριτική ικανότητα καλής ποιότητας ομοαξονικών ανιχνευτών. Έχουν μεγάλη διάμετρο και μικρό ύψος, χαρακτηριστικό που εξασφαλίζει υψηλές αποδόσεις στις αναλύσεις πραγματικών δειγμάτων.
- Οι κυλινδρικοί **ομοαξονικοί ανιχνευτές γερμανίου** (**Coaxial Ge**) είναι κατασκευασμένοι από κυλινδρικό κρύσταλλο Ge «τύπου P». Έχουν παράθυρο από Al με συνέπεια τη σημαντική εξασθένιση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών και για τον λόγο αυτό είναι εκμεταλλεύσιμοι για ενέργειες φωτονίων άνω των 50keV.

- Οι ανιχνευτές γερμανίου **ευρείας ενεργειακής περιοχής** (Extended Range Ge detector, **XtRa**) είναι κυλινδρικοί ανιχνευτές «τύπου P», οι οποίοι έχουν ειδικά σχεδιασμένο *λεπτό παράθυρο* στην πάνω επιφάνεια επαφής, το οποίο εκτείνει την περιοχή ενεργειών προς τα κάτω, έως και τα 5keV. Οι ανιχνευτές αυτοί σε συνδυασμό με παράθυρο κρυστάτη από Be παρουσιάζουν υψηλή απόδοση και καλή διακριτική ικανότητα σε μια εκτεταμένη κλίμακα ενεργειών από τις χαμηλές έως τις υψηλές και λογικό κόστος. Μπορούν εναλλακτικά να εξοπλιστούν με κρυστάτη με παράθυρο εισόδου κατασκευασμένο από συνθετικά ανθρακονήματα, παρέχοντας ακόμα υψηλότερη απόδοση στην ανίχνευση φωτονίων.
- Οι ανιχνευτές **γερμανίου αντεστραμμένου ηλεκτροδίου** (Reverse Electrode Ge detector, **REGe**) είναι παρόμοιας γεωμετρίας με τους κυλινδρικούς ανιχνευτές με τη διαφορά ότι η λεπτή επαφή τύπου p είναι στην εξωτερική πλευρά του ανιχνευτή, πρόκειται δηλαδή για ανιχνευτές «τύπου N». Ο συνδυασμός της εξωτερικής αυτής επαφής με έναν κρυστάτη με *λεπτό παράθυρο* μπορεί να εκτείνει τη χρήση του ανιχνευτή σε ενέργειες χαμηλότερες από τα 5keV.
- Στην προσπάθεια για την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής απόδοσης, κατασκευάστηκε μια ειδική κατηγορία ανιχνευτών, οι **Well type Ge detectors**, στους οποίους το δείγμα βυθίζεται μέσα στη μάζα του ανιχνευτή και απαιτείται να έχει μικρό όγκο.

Ακολούθως, αναφέρονται οι ανιχνευτές που είναι εγκατεστημένοι και χρησιμοποιούνται για γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Εικόνα 2.18). Λεπτομέρειες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους καθώς επίσης και για άλλα καίρια θέματα που αφορούν στη φασματοσκοπία γάμμα (*βαθμονόμηση του ανιχνευτή, διορθώσεις για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, διόρθωση για το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης, υπόβαθρο του ανιχνευτή, αβεβαιότητες, ανάλυση δύσκολων φωτοκορυφών*) παρουσιάζονται εκτενέστατα σε Διπλωματικές Εργασίες και Διδακτορικές Διατριβές που έχουν εκπονηθεί στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Επίσης, στο ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει αναπτυχθεί λογισμικό γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης: ο κώδικας SPUNAL (SPectrum UNix AnaLysis).

- **2 ανιχνευτές τύπου HPGe (High Purity Germanium)**: Πρόκειται για ομοαξονικούς ανιχνευτές από υπερκάθαρο γερμάνιο «τύπου P» με παράθυρο κρυστάτη από Al και για το λόγο αυτό η απόδοσή τους για φωτόνια χαμηλών ενεργειών είναι χαμηλή. Οι ανιχνευτές περιβάλλονται από ατσάλινη θωράκιση.
- **LEGe (Low Energy Germanium detector)**: Πρόκειται για επίπεδο ανιχνευτή από υπερκάθαρο γερμάνιο «τύπου N», κυλινδρικού σχήματος. Το παράθυρο του κρυστάτη είναι κατασκευασμένο από Be πάχους 0.5mm, με συνέπεια η εξασθένιση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών να είναι πολύ μικρή. Λόγω του μικρού πάχους, αλλά και της ύπαρξης κενού μέσα στον κρυστάτη, το παράθυρο του Be είναι εξαιρετικά ευαίσθητο. Ο ανιχνευτής περιβάλλεται από ατσάλινη θωράκιση. Χρησιμοποιείται με δύο διαφορετικές ρυθμίσεις ενίσχυσης. Σε *χαμηλή ενίσχυση* ο πολυκαναλικός αναλυτής καλύπτει την περιοχή 0 - 2000 keV, όπως τυπικά γίνεται στους ανιχνευτές γερμανίου. Σε *υψηλή ενίσχυση* το φάσμα περιορίζεται στην περιοχή 0 – 200 keV.
- **XtRa (Extended Range Germanium detector)**: Πρόκειται για ομοαξονικό ανιχνευτή γερμανίου «τύπου P» με κρύσταλλο μεγάλου όγκου. Διαθέτει λεπτό παράθυρο κατασκευασμένο από ανθρακονήματα, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ανάλυση

φωτονίων χαμηλών ενεργειών, καθώς η χρήσιμη ενεργειακή κλίμακα εκτείνεται προς τα κάτω έως και τα 5keV.



Εικόνα 2.18

Οι ανιχνευτές γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ (a) HPGe, (b) LEGe, (c) XtRa.
(Αναγνωστάκης Μ.Ι., διαφάνειες μαθήματος «Ραδιοπεριβαλλοντική Ανάλυση και Προστασία»).

Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνική, καθώς τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα, που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, εκπέμπουν ακτίνες-γ. Επιπλέον, παρέχει το πλεονέκτημα ότι τα δείγματα δεν χρειάζονται ιδιαίτερη προετοιμασία. Απαιτείται συνήθως η απλή συλλογή και συσκευασία τους σε δοχείο καθορισμένης γεωμετρίας και η εν συνεχεία τοποθέτησή τους πάνω στον ανιχνευτή.

Εκτός από το ^{10}Be , όλα τα υπόλοιπα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα (δηλαδή ^7Be , ^{22}Na , ^{210}Pb και ^{137}Cs) εκπέμπουν ακτινοβολία-γ κι επομένως είναι δυνατή η χρήση της φασματοσκοπίας-γ για τον προσδιορισμό τους.

● Χρήση φασματοσκοπίας-γ για τον προσδιορισμό των ^{137}Cs και ^7Be

Για τον προσδιορισμό του ^{137}Cs ($E_\gamma=661,7\text{keV}$, 85,1%), αλλά και του ^7Be ($E_\gamma=477,6\text{keV}$, 10,3%), συνηθίζεται η χρήση της φασματοσκοπίας-γ λόγω της μεγάλης αφθονίας και της υψηλής ενέργειας των ακτίνων-γ που εκπέμπουν. Είναι επαρκής η χρήση ενός κλασσικού κυλινδρικού ομοαξονικού ανιχνευτή γερμανίου «τύπου P», με εύρος ενεργειών από 40 keV έως 10 MeV. Βέβαια, η ανίχνευση του ^7Be , συγκρινόμενη με αυτή του ^{137}Cs , παρουσιάζει μεγαλύτερα επίπεδα αβεβαιότητας και όρια ανίχνευσης για τις ίδιες συνθήκες καταμέτρησης. Αυτό συμβαίνει διότι οι χαμηλότερες ενεργειακές γραμμές του ^7Be , σε συνδυασμό με το μικρότερο ποσοστό εκπομπής του, έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση στο φάσμα υψηλότερου υπόβαθρου στην περιοχή της φωτοκορυφής, σε σχέση με την περίπτωση του ^{137}Cs .

● Χρήση φασματοσκοπίας-γ για τον προσδιορισμό του ^{210}Pb

Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση φωτονίων χαμηλών ενεργειών, όπως τα φωτόνια 46,5 keV (με μικρό ποσοστό εκπομπής ~ 4%) του ^{210}Pb , παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες εξαιτίας:

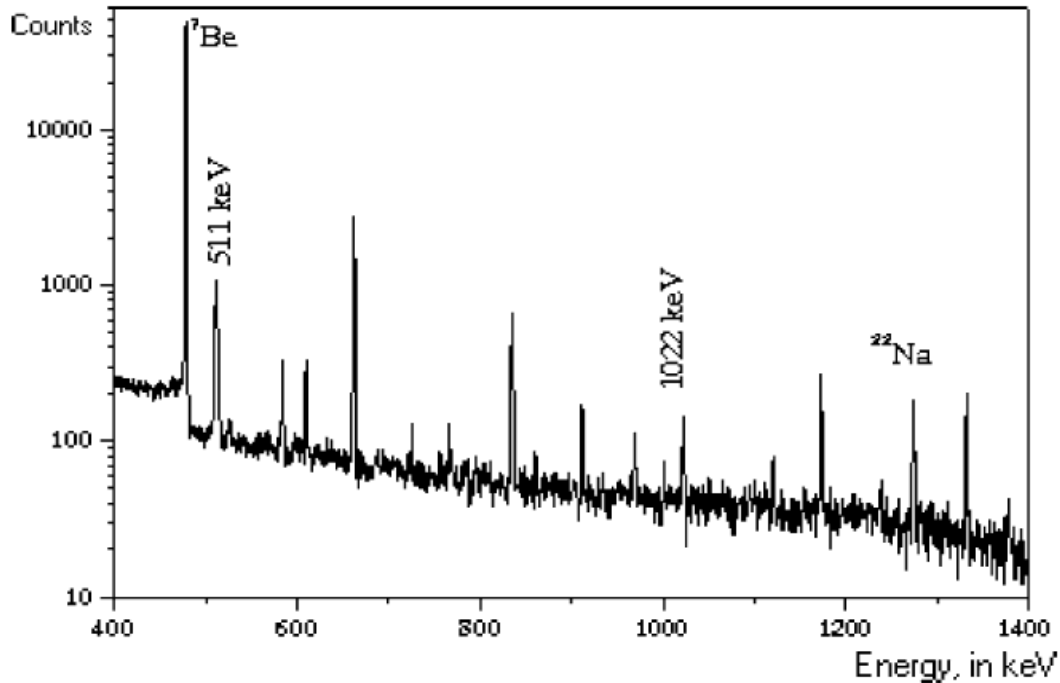
- της ισχυρής εξασθένησης των φωτονίων χαμηλών ενεργειών κατά τη διέλευσή τους μέσα από την ύλη, π.χ. κατά τη διέλευσή τους μέσα από τα υλικά που παρεμβάλλονται μεταξύ της πηγής και της ευαίσθητης περιοχής του ανιχνευτή (διέλευση από το παράθυρο του ανιχνευτή),
- του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης, δηλαδή της εξασθένησης των φωτονίων που εκπέμπονται μέσα στο δείγμα κατά τη διέλευσή τους μέσα από το ίδιο το υλικό του δείγματος, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το δείγμα έχει σχετικά μεγάλο όγκο, και
- του μεγάλου πλήθους των ακτίνων-γ και ακτίνων-X που ανιχνεύονται στην περιοχή χαμηλών ενεργειών.

Έτσι, ένας τυπικός γ-ανιχνευτής δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, διότι το χαμηλότερό του εύρος ενέργειας δεν εκτείνεται σε αυτήν την τιμή. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση ανιχνευτών «τύπου N» με εύρος ενεργειών από 3keV έως 10MeV.

● Χρήση φασματοσκοπίας-γ για τον προσδιορισμό του ^{22}Na

Η ανίχνευση του ^{22}Na παρουσιάζει δυσκολίες ακόμα και στη σύγχρονη εποχή. Το ^{22}Na εκπέμπει ακτινοβολία-γ ενέργειας 1274,5 keV, η οποία τυπικά θα μπορούσε να μετρηθεί χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας, εντούτοις τα επίπεδα ραδιενέργειάς του είναι υπερβολικά χαμηλά (περίπου 4 τάξεις μεγέθους χαμηλότερα από αυτά του ^7Be). Επιπλέον, το υπόβαθρο λόγω της σκέδασης Compton μειώνει την ευαισθησία και υποβιβάζει το όριο ανίχνευσης, περιορίζοντας περαιτέρω τη μέτρηση του ^{22}Na . Τα τελευταία χρόνια, έχει επιτευχθεί πρόοδος της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης πολύ χαμηλού υπόβαθρου.

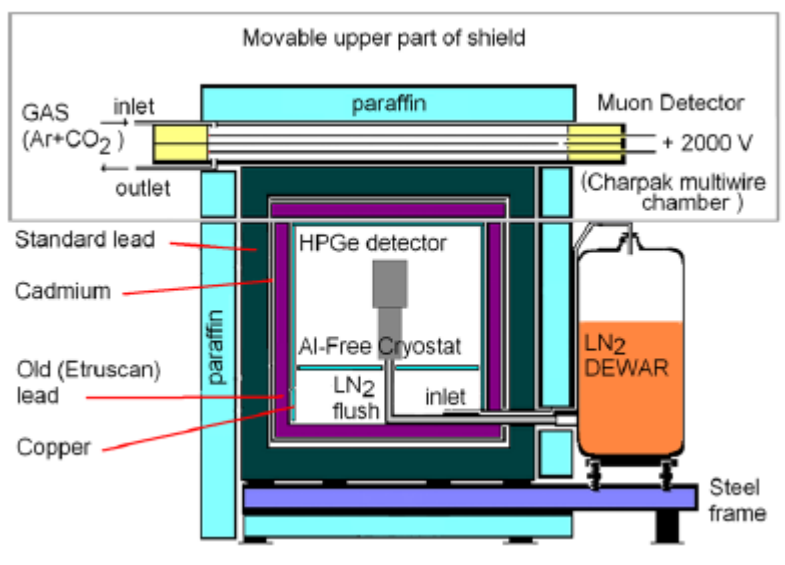
- Οι Jasiulionis and Wershofen (2005) χρησιμοποίησαν έναν ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας (well-type) με θωράκιση από μόλυβδο και υδράργυρο. Ένα τυπικό φάσμα χαμηλού υπόβαθρου, που προέκυψε από τη μελέτη τους επιτρέποντας τον προσδιορισμό του ^{22}Na και του ^7Be σε ένα δείγμα ατμοσφαιρικού αεροζόλ, φαίνεται στην Εικόνα 2.19.



Εικόνα 2.19

Φάσμα ακτινοβολίας-γ χαμηλού υπόβαθρου σε δείγμα ατμοσφαιρικού αέρα ($150\,000\text{ m}^3$), στο οποίο διακρίνονται οι φωτοκορυφές των ${}^7\text{Be}$ (478 keV) και ${}^{22}\text{Na}$ (1275 keV). Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στη Λιθουανία ($\sim 55^\circ\text{N}$, 26°E) το έτος 1999. (Jasiulionis and Wershofen, 2005)

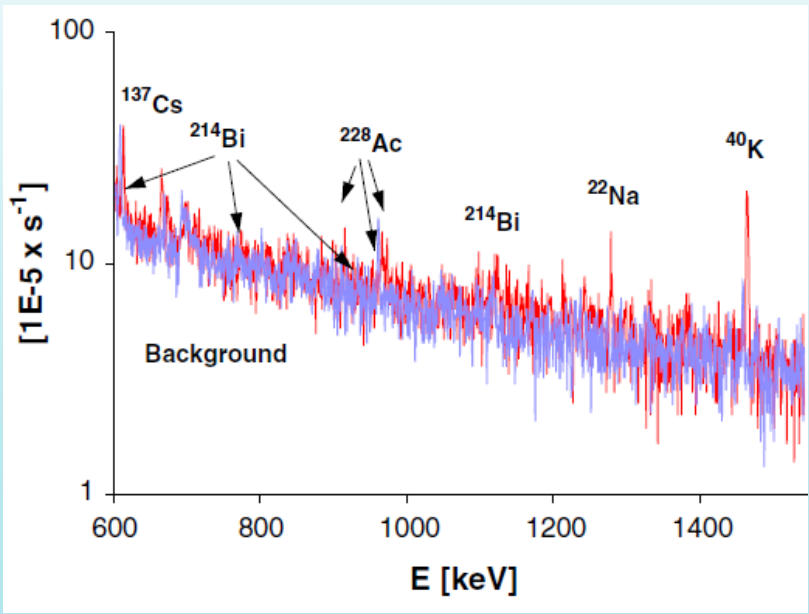
- Οι Blazej and Mietelski (2014) χρησιμοποίησαν έναν HPGe ανιχνευτή ακτινοβολίας-γ με αυτοσχέδια θωράκιση για την επίτευξη πολύ χαμηλού υπόβαθρου (Εικόνα 2.20), προκειμένου να μετρήσουν τη συγκέντρωση του ${}^{22}\text{Na}$ σε δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ (διπλά φίλτρα) με χρονική διάρκεια συλλογής μία εβδομάδα και χρόνο ανάλυσης 7 ημέρες. Απεικονίζεται επίσης ένα προκύπτον φάσμα, στο οποίο η μείωση του υπόβαθρου είναι εμφανής.
- Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή για την ανίχνευση του ${}^{22}\text{Na}$, που προτείνουν οι Zhang et al. (2014), αποτελεί η σύνθεση ενός φασματόμετρου $\gamma\text{-}\gamma$ σύμπτωσης / αντισύμπτωσης (gamma-gamma coincidence / anticoincidence spectrometer) (Εικόνα 2.21). Η βασική αρχή που εφαρμόζεται είναι ότι δύο σχεδόν ταυτόχρονες εκπομπές ακτίνων-γ πρέπει να καταχωρούνται στον πολυκαναλικό αναλυτή ως μία καταμέτρηση, ενώ οι μεμονωμένες εκπομπές ακτίνων-γ πρέπει να απορρίπτονται. Είναι δυνατό να εφαρμοστεί η τεχνική αυτή για τον προσδιορισμό του ${}^{22}\text{Na}$, χρησιμοποιώντας δύο επαρκώς θωρακισμένους ανιχνευτές τοποθετημένους «αντικριστά», κατάλληλο λογισμικό, και εκμεταλλευόμενη την εκπομπή φωτονίου 1274 keV και την εξής ιδιότητα της διάσπασης του ${}^{22}\text{Na}$: κάθε ποζιτρόνιο που παράγεται εξαυλώνεται γρήγορα με ένα ηλεκτρόνιο, με αποτέλεσμα την εκπομπή δύο φωτονίων 511 keV με γωνία 180° μεταξύ τους. Η σχεδίαση του φασματόμετρου επιτρέπει μεγαλύτερη επιλεκτικότητα στη μέτρηση του ${}^{22}\text{Na}$ και σημαντική μείωση του υπόβαθρου, παρέχοντας ένα κρίσιμο όριο 3 mBq σε 20 ώρες χρόνο ανάλυσης.



(a)



(b)



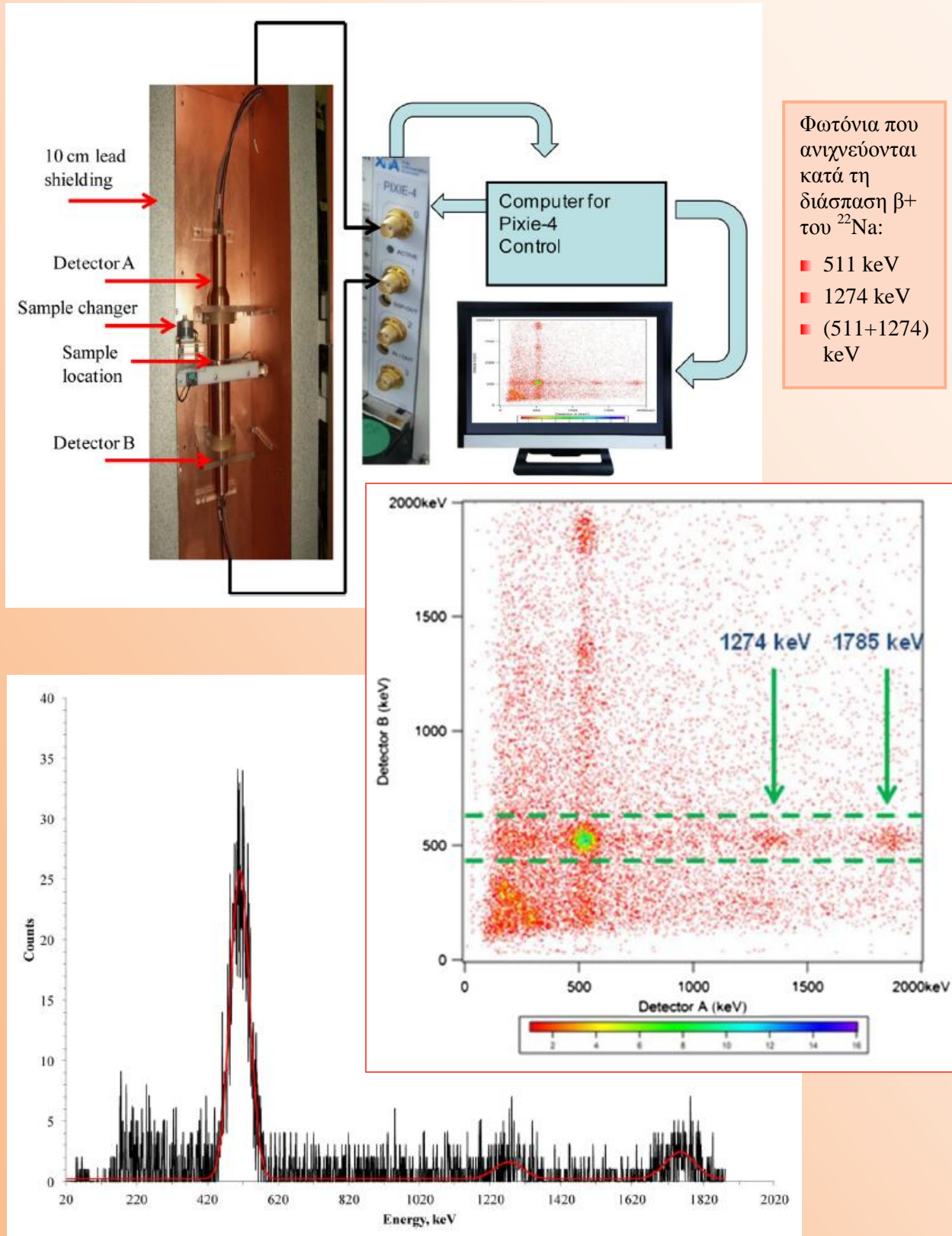
(c)

Εικόνα 2.20

(a) Σχηματική απεικόνιση και (b) φωτογραφία της αυτοσχέδιας θωράκισης του ανιχνευτή πολύ χαμηλού υπόβαθρου που χρησιμοποιήσαν οι *Blazej and Mietelski (2014)* για την ανίχνευση του ^{22}Na .

(c) Ένα μέρος του φάσματος ακτίνων-γ ενός δείγματος διπλού φίλτρου αέρα (κόκκινο) σε σύγκριση με το υπόβαθρο (μπλε) του φασματομέτρου.

(Blazej and Mietelski, 2014)



Εικόνα 2.21

Η διάταξη του φασματόμετρου γ - γ σύμπτωσης / αντισύμπτωσης (gamma-gamma coincidence / anticoincidence spectrometer) για την ανίχνευση του ^{22}Na καθώς κι ένα προκύπτον φάσμα. (Zhang et al., 2014)

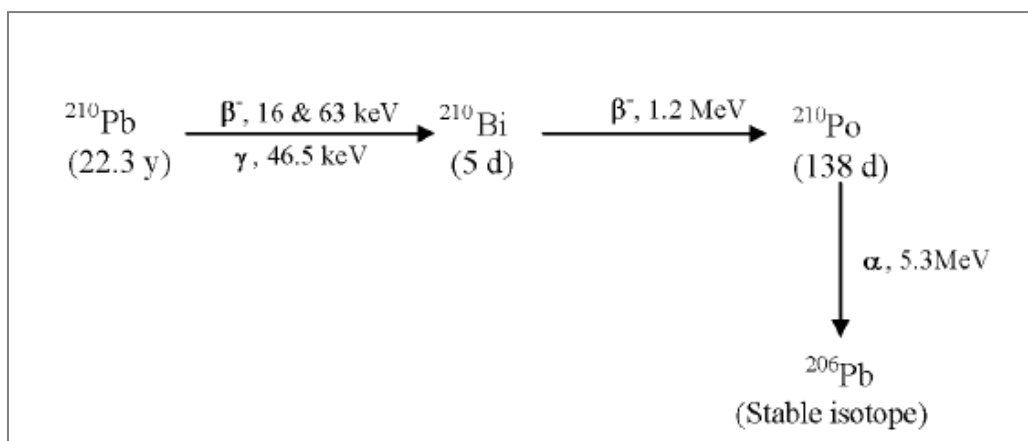
2.4.2 Φασματοσκοπία άλφα

Η φασματοσκοπία-α αποσκοπεί στην ανίχνευση σωματιδίων-α χαρακτηριστικής ενέργειας. Λόγω της εξαιρετικά μικρής εμβέλειας των σωματιδίων-α μέσα στην ύλη, προκειμένου να είναι δυνατή η ανίχνευσή τους, το υπό ανάλυση δείγμα πρέπει να υποστεί ραδιοχημική επεξεργασία, που αποσκοπεί τελικά στην απομόνωση των ραδιενεργών πυρήνων των οποίων η μέτρηση ενδιαφέρει. Η επεξεργασία περιλαμβάνει τρία στάδια:

- τη χημική επεξεργασία του δείγματος,
- την ιοντοανταλλαγή για την απομόνωση του προς ανάλυση ραδιενεργού ισοτόπου,
- την ηλεκτροεναπόθεση για την παρασκευή του προς μέτρηση δοκιμίου.

Η μέτρηση πραγματοποιείται από ανιχνευτές ημιαγωγού, κατασκευασμένων από πυρίτιο, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για την ανίχνευση σωματιδίων-α. Η όλη διαδικασία της επεξεργασίας και ανάλυσης είναι χρονοβόρα και δαπανηρή. Οδηγεί, όμως, σε πολύ χαμηλά επίπεδα ανίχνευσης, παρέχοντας τη δυνατότητα της μέτρησης χαμηλών συγκεντρώσεων, της τάξεως των mBq, με υψηλή ακρίβεια.

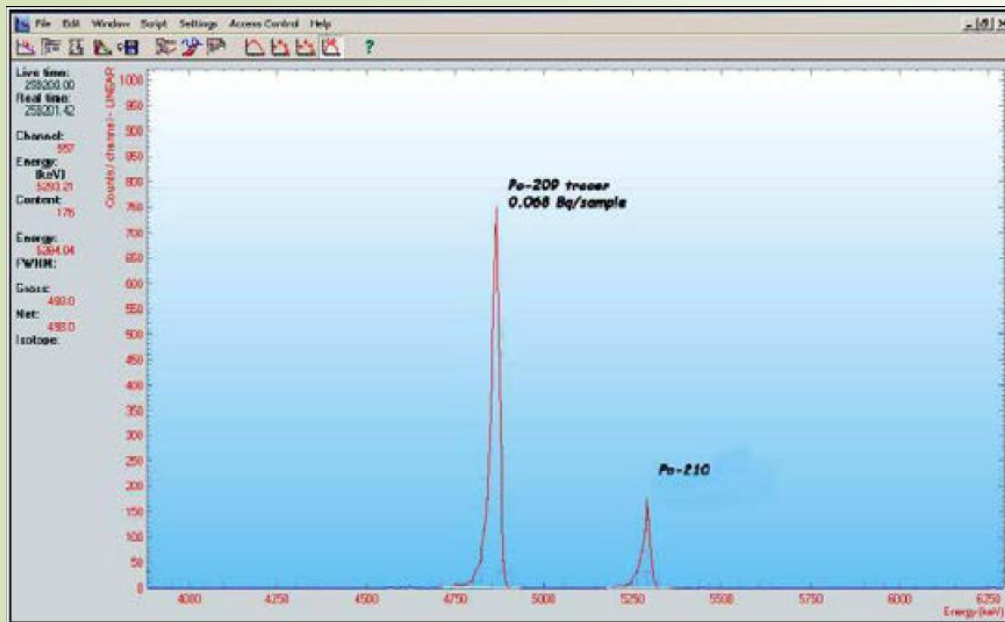
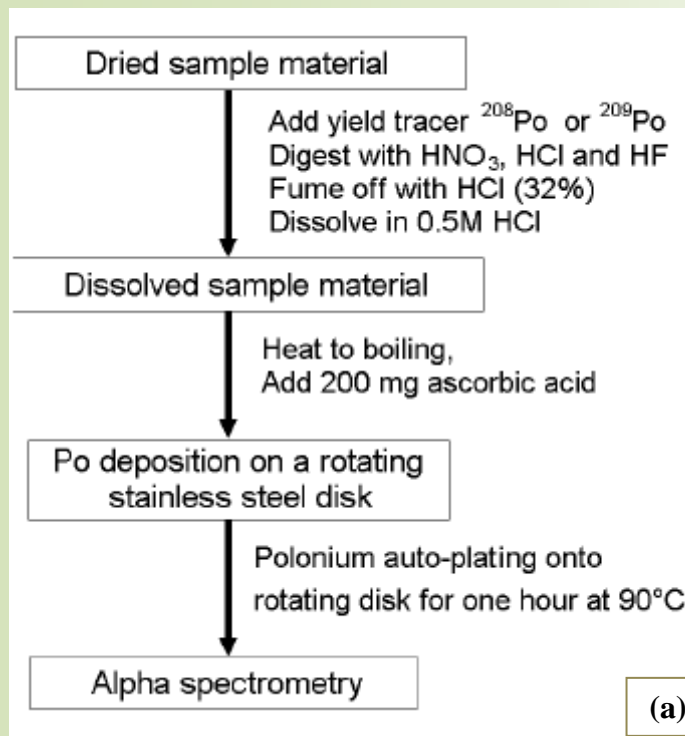
Η α-φασματοσκοπική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της ραδιενέργειας ^{210}Pb μέσω του ^{210}Po ($T_{1/2}=138$ ημέρες). Το εκπεμπόμενο σωματίο άλφα έχει ενέργεια 5,3 MeV (Εικόνα 2.22). Πρέπει ο ^{210}Pb ($T_{1/2}=22,3$ έτη) και το θυγατρικό του ^{210}Po ($T_{1/2}=138,4$ ημέρες) στο δείγμα του χώματος βρίσκονται σε ισορροπία. Η χρονική καθυστέρηση πριν την ανάλυση εξαρτάται από την κατάσταση της ισορροπίας $^{210}\text{Pb} - ^{210}\text{Po}$.



Εικόνα 2.22

Ραδιενεργός διάσπαση του ^{210}Pb . (Ebaid and Khater, 2006)

Για την εφαρμογή της α-φασματοσκοπικής ανάλυσης του ^{210}Pb (Εικόνα 2.23) απαιτείται πλήρης αποδόμηση μιας μικρής ποσότητας δείγματος (π.χ. 0,2-0,5g) χρησιμοποιώντας οξέα (HNO_3 , HF , HClO_4 και HCl) και αυθόρμητη εναπόθεση των ισοτόπων πολωνίου πάνω σε ασημένιους δίσκους. Για τη ραδιοχημική απόδοση και τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας απαιτούνται πρότυπα υδατικά διαλύματα ^{209}Po ή ^{208}Po (ραδιοχημικοί ιχνηλάτες). Η καταμέτρηση πραγματοποιείται από α-ανιχνευτές πυριτίου (Silicon Surface Barrier, SSB) ή από α-ανιχνευτές ημιαγωγών (Passivated Implanted Planar Semiconductor, PIPS).



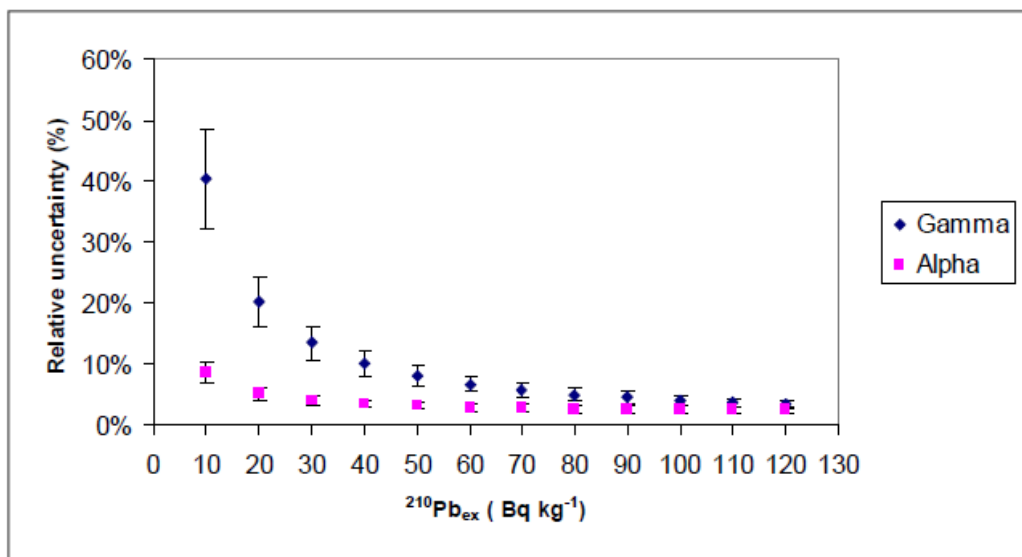
Εικόνα 2.23

(a) Διάγραμμα ροής της ραδιοχημικής ανάλυσης του ^{210}Po (^{210}Pb) για την εφαρμογή της τεχνικής της α-φασματοσκοπικής ανάλυσης (Ebaid and Khater, 2006).

(b) Συσκευές για τη ραδιοχημική επεξεργασία, (c) Ανιχνευτής σωματιδίων-α.

(d) Φάσμα ακτινοβολίας-α του ^{210}Po (χρησιμοποιώντας ^{208}Po ως ραδιοχημικό ιχνηλάτη) (IAEA- TECDOC-1741, 2014).

Μια σύγκριση της αναλυτικής ακρίβειας των μετρήσεων της α- και γ-φασματοσκοπίας για δείγμα χώματος, φαίνεται στην Εικόνα 2.24, η οποία παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της σχετικής αβεβαιότητας και της συγκέντρωσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ υπό βέλτιστες εργαστηριακές συνθήκες α- και γ-φασματοσκοπίας για τον προσδιορισμό του συνολικού ^{210}Pb . Για μικρές ειδικές ραδιενέργειες, η διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους είναι μεγάλη και η α-φασματοσκοπία αποδίδει πολύ καλύτερα από τη γ-ανάλυση.



Εικόνα 2.24

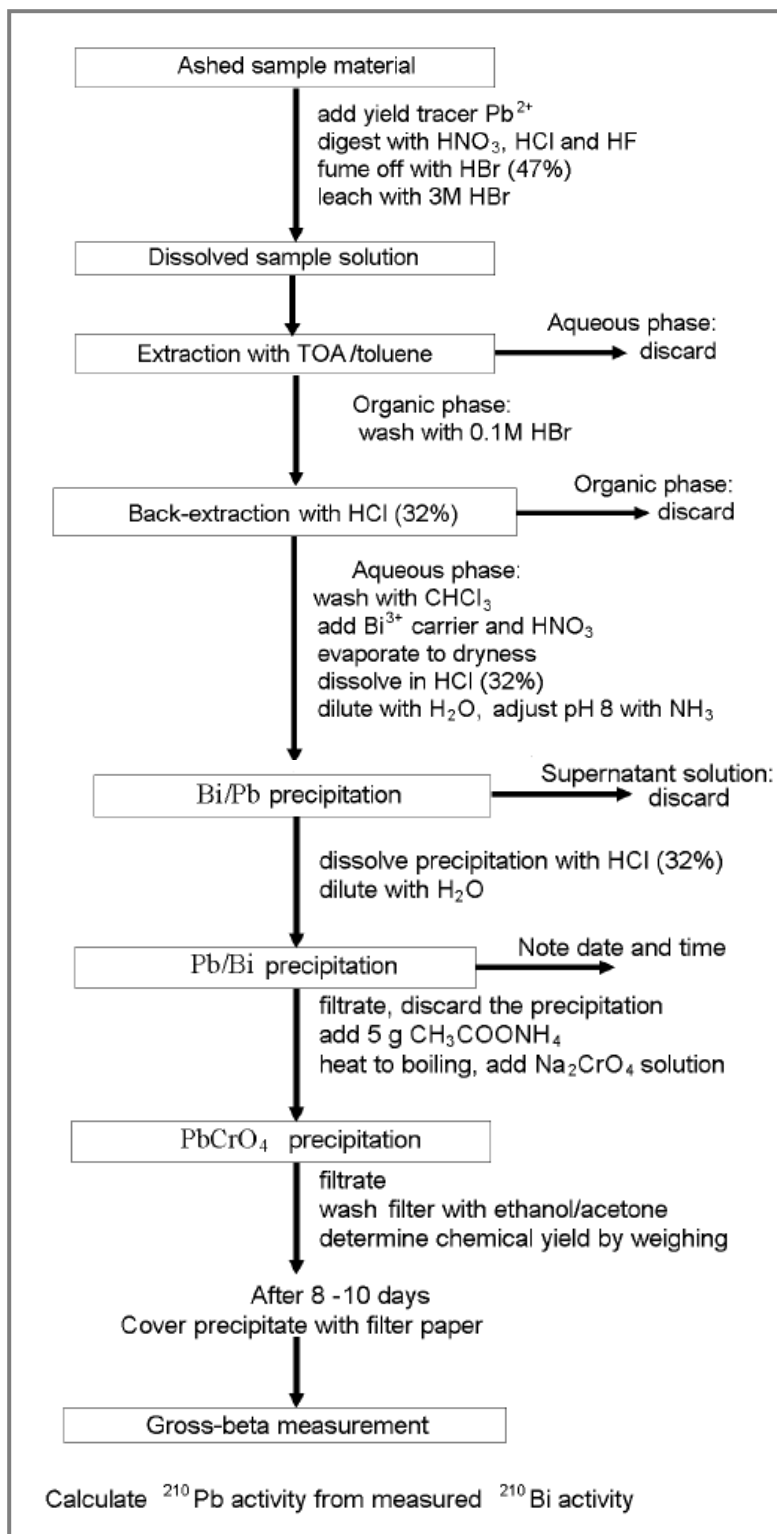
Σύγκριση της αβεβαιότητας των μετρήσεων γ- και α-φασματοσκοπίας, που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ειδικής ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε δείγμα χώματος. (Mabit et al., 2008)

2.4.3 Καταμέτρηση βήτα

Επειδή τα σωματίδια-β που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση ενός ραδιενεργού ισότοπου έχουν συνεχές ενεργειακό φάσμα, η ακτινοβολία-β δεν χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση ραδιενεργών ισότοπων παρά μόνο σε πολύ ιδιαίτερες περιπτώσεις. Το κύριο πλεονέκτημα είναι το σχετικά μικρό όριο ανίχνευσης. Τα κυριότερα μειονεκτήματα συμπεριλαμβάνουν την καταστροφή του δείγματος, τον ραδιοχημικό διαχωρισμό, την προετοιμασία της πηγής των σωματιδίων-β και τον χρόνο αναμονής της καταμέτρησης (Εικόνα 2.25).

Ο ^{210}Pb μπορεί να μετρηθεί μέσω της ακτινοβολίας-β ($E_{\text{max}}=1,2\text{MeV}$) που εκπέμπει το θυγατρικό του ^{210}Bi (Εικόνα 2.22).

Μια σύγκριση των κύριων παραμέτρων των τριών διαφορετικών αναλυτικών τεχνικών (φασματοσκοπία-γ, φασματοσκοπία-α και καταμέτρηση σωματιδίων-β) για τον προσδιορισμό του ^{210}Pb σε περιβαλλοντικά δείγματα δίνεται στον πίνακα της Εικόνας 2.26. Επιπλέον, από το διάγραμμα της Εικόνας 2.27, φαίνεται ότι υπάρχει μια αποδεκτή συμφωνία μεταξύ των τριών τεχνικών (μέσα στα πλαίσια των τιμών των σφαλμάτων) για τον προσδιορισμό του ^{210}Pb σε δείγματα χώματος.



Εικόνα 2.25

Ραδιοχημική ανάλυση του ^{210}Bi (^{210}Pb) για την εφαρμογή της τεχνικής της καταμέτρησης σωματιδίων-β. (Ebaid and Khater, 2006)

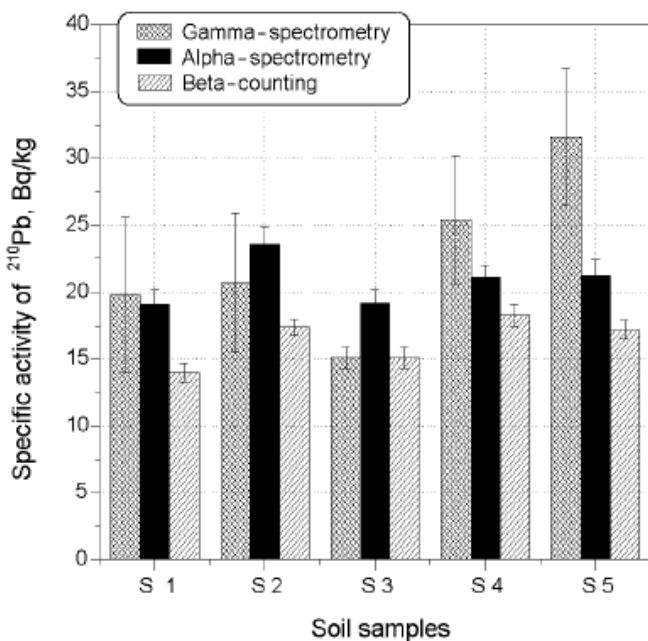
Εικόνα 2.26

Πίνακας που παρουσιάζει τη σύγκριση των παραμέτρων των τριών αναλυτικών τεχνικών για τον προσδιορισμό του ^{210}Pb σε περιβαλλοντικά δείγματα. (Ebaid and Khater, 2006)

Method	Gamma-ray spectrometry	Beta-counting	Alpha-spectrometry
Sample size, g	100	5	1-3
Counting time, minutes	1000	1000	1000
Sensitivity, $\text{s}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$	$2.9\cdot 10^{-4}$	2.5	5
Background, cpm	0.5	0.5	0.005
Counting efficiency, %	7	40	20
MDA,* mBq, in 1000 minutes	440	7.1	1
Duration of complete analysis	1 day	>10 days	3-6 months**

* MDA: Minimum detectable activity.

** 3 days, in the case of Pb-Po secular equilibrium existence.

**Εικόνα 2.27**

Ειδική ραδιενέργεια του ^{210}Pb σε δείγματα χώματος, που προέκυψε με χρήση:

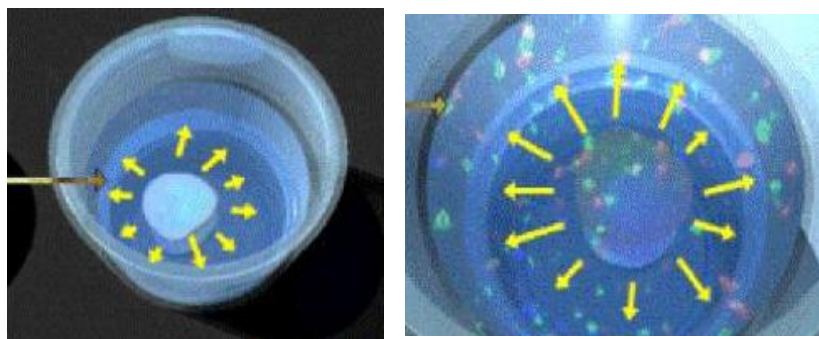
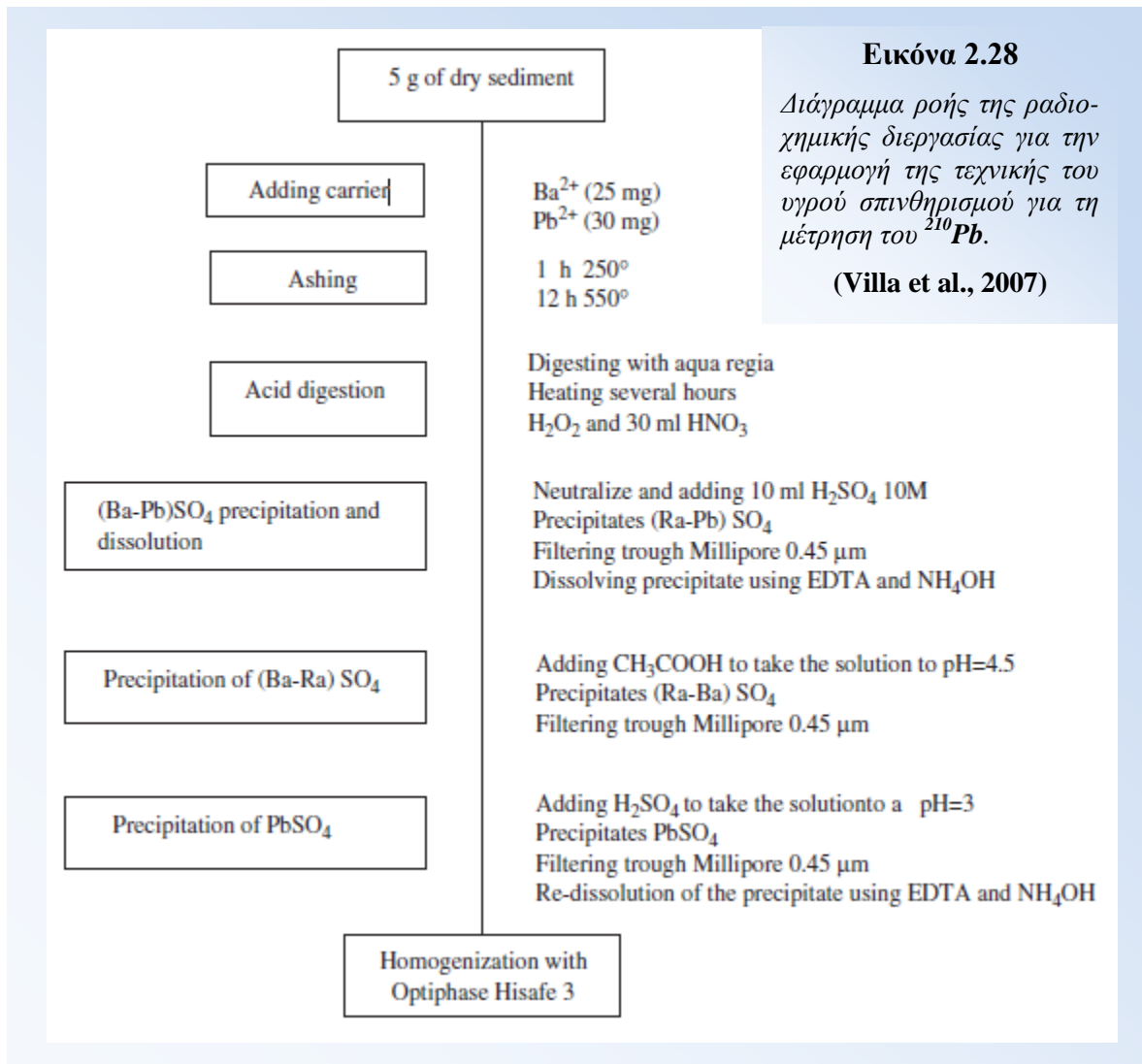
- φασματοσκοπίας-γ
- φασματοσκοπίας-α
- καταμέτρησης-β

(Ebait and Khater, 2006)

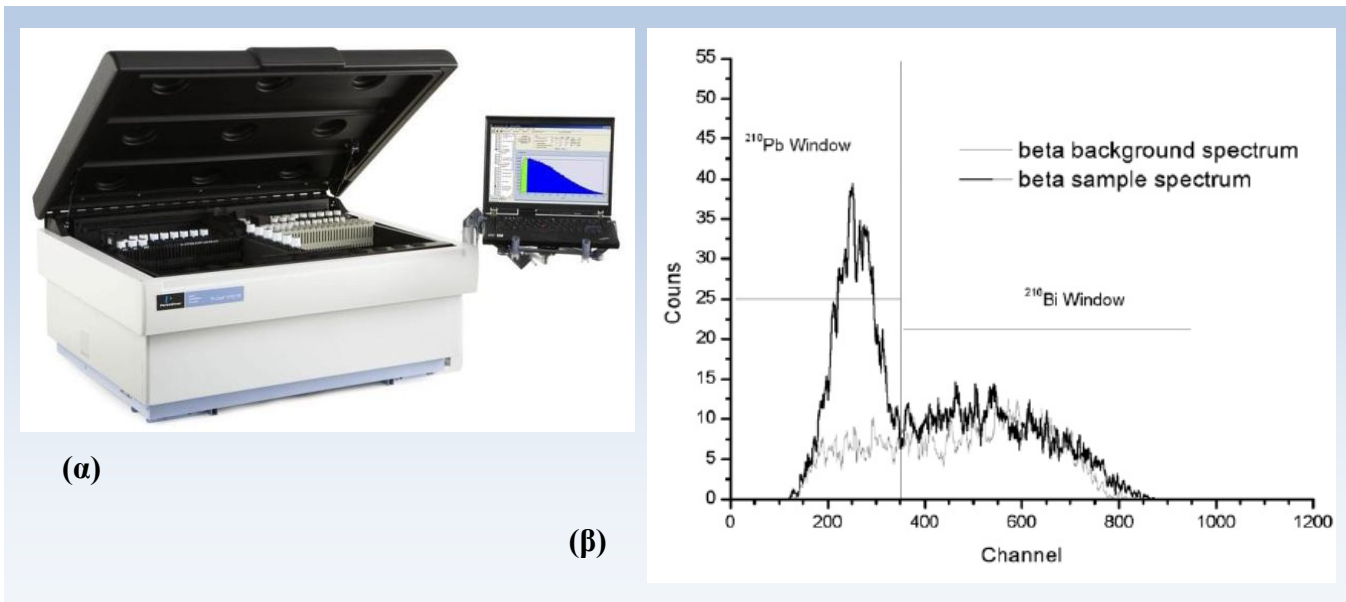
2.4.4 Φασματοσκοπία υγρού σπινθηρισμού

Η φασματοσκοπία υγρού σπινθηρισμού (Liquid Scintillation Counting, LSC) χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση ραδιενεργών ισότοπων που εκπέμπουν μόνο σωματίδια-β και για την ανάλυση υγρών δειγμάτων. Ανάλογα με το μετρούμενο ραδιενεργό ισότοπο, η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια μπορεί να είναι πολύ χαμηλή. Για την εφαρμογή της τεχνικής, μπορεί να απαιτηθεί ραδιοχημική προετοιμασία (Εικόνα 2.28). Το υπό μέτρηση δείγμα αναμιγνύεται με ένα υγρό μίγμα σπινθηρισμού, το οποίο διεγείρεται από τα σωματίδια που εκπέμπονται από τα ραδιενεργά ισότοπα και εκπέμπει φωτόνια ορατού φωτός (Εικόνα 2.29). Τα εκπεμπόμενα φωτόνια ορατού φωτός μετατρέπονται σε ηλεκτρικά

σήματα με τη χρήση φωτοπολλαπλασιαστών. Ο ^{210}Pb μπορεί να μετρηθεί με εφαρμογή της φασματοσκοπίας του υγρού σπινθηρισμού μέσω των σωματιδίων-β που εκπέμπει το θυγατρικό του ^{210}Bi (Εικόνα 2.22). Το φάσμα που προκύπτει από τους μετρητές υγρού σπινθηρισμού φαίνεται στην Εικόνα 2.30.



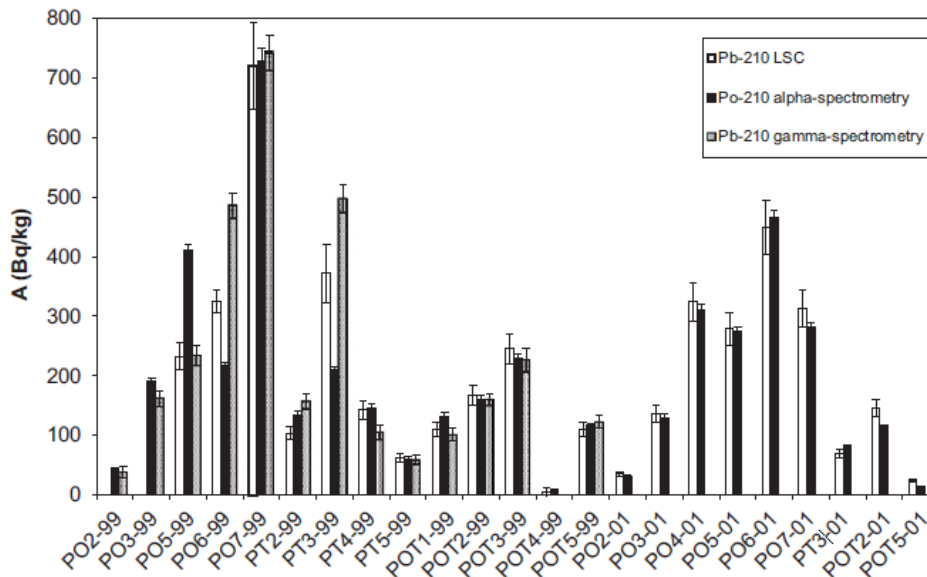
Εικόνα 2.29
Υγρό μίγμα σπινθηρισμού (scintillation cocktail). (Anagnostakis, July 3, 2015)



Εικόνα 2.30

(α) Φασματόμετρο υγρού σπινθηρισμού.
 (β) Φάσμα σωματιδίων-β σε δείγμα ιζήματος. (Villa et al., 2007)

Η εφαρμογή της φασματοσκοπίας υγρού σπινθηρισμού για τον προσδιορισμό του ^{210}Pb σε δείγματα ιζημάτων απαλλάσσει από την ανάγκη αναμονής για την επίτευξη ραδιενεργού ισορροπίας και παρέχει όρια ανίχνευσης συγκρίσιμα με αυτά της φασματοσκοπίας-α (Villa et al., 2007). Μετά από σύγκριση των μετρήσεων ειδικής ραδιενέργειας σε δείγματα ιζημάτων, που προέκυψαν από τη φασματοσκοπία υγρού σπινθηρισμού, με αυτά που προέκυψαν από τη γ-και α-φασματοσκοπία, διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος του υγρού σπινθηρισμού εκτίμησε με ακρίβεια την ειδική ραδιενέργεια των δειγμάτων (Εικόνα 2.31).



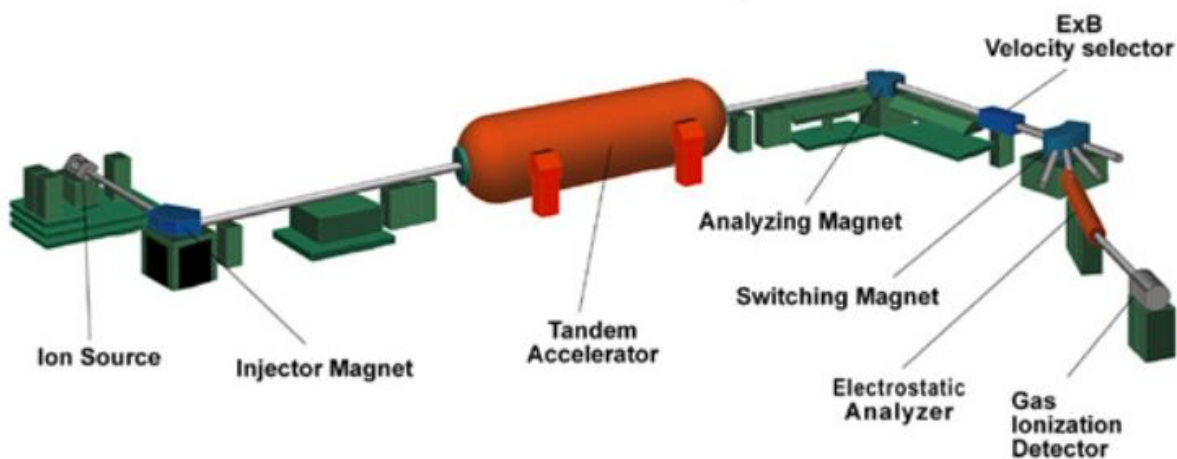
Εικόνα 2.31

Ειδική ραδιενέργεια ^{210}Pb σε δείγματα ιζημάτων, μετρημένη με χρήση φασματοσκοπίας:
 ▪ υγρού σπινθηρισμού (LSC), ▪ άλφα, ▪ γάμμα. (Villa et al., 2007)

2.4.5 Φασματοσκοπία μάζας

- **Φασματοσκοπία μάζας με χρήση επιταχυντή (Accelerator Mass Spectrometry, AMS)**

Η φασματοσκοπία μάζας με επιταχυντή (Accelerator Mass Spectrometry, AMS) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των μακρόβιων φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων, τα οποία υπάρχουν στο περιβάλλον, όπως είναι το ^{10}Be . Χρησιμοποιεί έναν επιταχυντή σωματιδίων σε συνδυασμό με πηγές ιόντων, τεράστιους μαγνήτες και ανιχνευτές (Εικόνα 2.32).



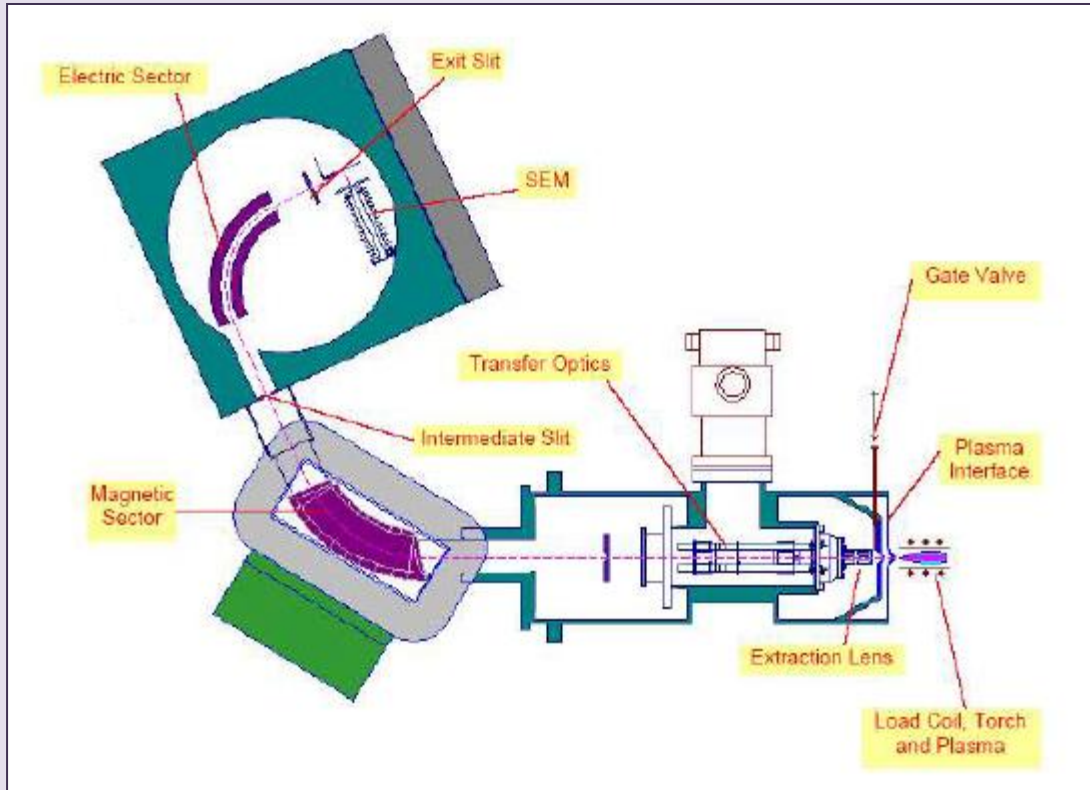
Εικόνα 2.32

Σχηματική απεικόνιση φασματογράφου μάζας με χρήση επιταχυντή (Accelerator Mass Spectrometry, AMS).

Πηγή: <https://www.physics.purdue.edu/ams/introduction/ams.html#tandem>

- **Φασματοσκοπία μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry, ICP-MS)**

Η φασματοσκοπία μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry, ICP-MS) συνδυάζει μια πηγή επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος υψηλής θερμοκρασίας με έναν φασματογράφο μάζας. Η πηγή πλάσματος μετατρέπει τα άτομα των στοιχείων σε ιόντα, τα οποία διαχωρίζονται και ανιχνεύονται από τον φασματογράφο μάζας (Εικόνα 2.33). Η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί προκειμένου να μετρήσει πολύ χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας ^{210}Pb .

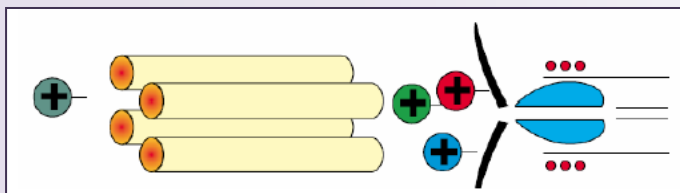
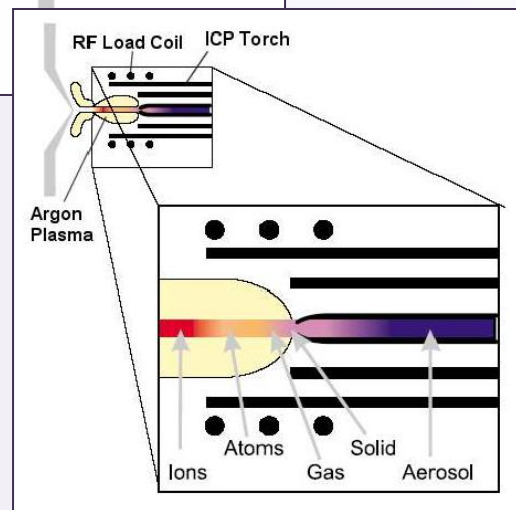
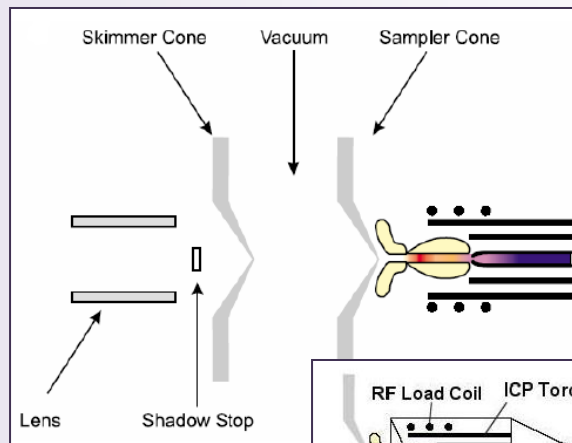


Εικόνα 2.33

Σχηματική απεικόνιση της διάταξης, καθώς και ορισμένων τμημάτων, της φασματοσκοπίας μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry, ICP-MS).

Πηγή:

<http://crustal.usgs.gov/laboratories/icpms/intro.html>



Quadrupole Mass Filter

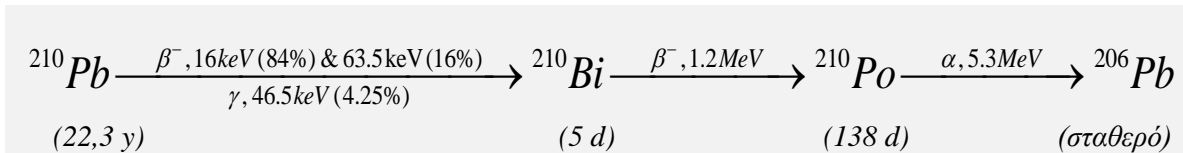
2.5 Ανακεφαλαίωση

Το κοσμικής προέλευσης ραδιενεργό ισότοπο ${}^7\text{Be}$, ($T_{1/2} = 53,3$ ημέρες), κατά τη διάσπασή του, εκπέμπει ακτινοβολία- γ ενέργειας 477,6 keV με ποσοστό εκπομπής 10,3%. Για τον προσδιορισμό του, συνηθίζεται η χρήση της φασματοσκοπίας- γ λόγω της επαρκούς αφθονίας του και της αρκετά υψηλής ενέργειας των ακτίνων- γ που εκπέμπει. Είναι κατάλληλη η χρήση ενός κλασσικού κυλινδρικού ομοαξονικού ανιχνευτή γερμανίου «τύπου P».

Το κοσμικής προέλευσης ραδιενεργό ισότοπο ${}^{10}\text{Be}$, ($T_{1/2} = 1,5 \times 10^6$ έτη), κατά τη διάσπασή του, εκπέμπει μόνο σωματίδια- β . Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον πολύ μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού του, καθιστά ευκολότερο τον προσδιορισμό του μέσω της φασματοσκοπίας μάζας με χρήση επιταχυντή (Accelerator Mass Spectrometry, AMS).

Το κοσμικής προέλευσης ραδιενεργό ισότοπο ${}^{22}\text{Na}$, ($T_{1/2} = 2,6$ έτη), κατά τη διάσπασή του, εκπέμπει ακτινοβολία- γ ενέργειας 1274,5 keV. Η ανίχνευσή του μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση φασματοσκοπίας- γ , ωστόσο παρουσιάζει δυσκολίες εξαιτίας των υπερβολικά χαμηλών συγκεντρώσεών του στο περιβάλλον. Για την επίτευξη του προσδιορισμού του, γίνονται τα τελευταία χρόνια προσπάθειες βελτίωσης της γ -φασματοσκοπικής ανάλυσης πολύ χαμηλού υπόβαθρου. Για τη μείωση του υπόβαθρου, έχουν κατασκευαστεί ειδικές θωρακίσεις (Blazej and Mietelski, 2014) κι επίσης έχει δοκιμαστεί η σύνθεση ενός φασματομέτρου γ - γ σύμπτωσης / αντισύμπτωσης (gamma-gamma coincidence / anticoincidence spectrometer) (Zhang et al., 2014), το οποίο εκμεταλλεύεται την εκπομπή των 511 keV φωτονίων εξαύλωσης.

Το γεωγενές ραδιενεργό ισότοπο ${}^{210}\text{Pb}$, ($T_{1/2} = 22,3$ έτη), κατά τη διάσπασή του, μεταστοιχειώνεται σε ${}^{210}\text{Bi}$ και στη συνέχεια σε ${}^{210}\text{Po}$ σύμφωνα με το σχήμα:

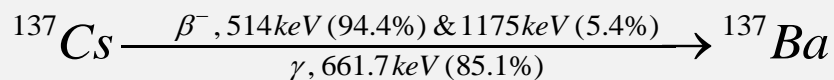


Συνεπώς, ο προσδιορισμός του ${}^{210}\text{Pb}$ μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας **φασματοσκοπία- γ** ($E_\gamma=46,5\text{keV}$), **καταμέτρηση- β** μέσω του θυγατρικού ${}^{210}\text{Bi}$ που εκπέμπει σωματίδια- β μεγάλης ενέργειας ($E_{\max}=1,2\text{meV}$) και **φασματοσκοπία- α** μέσω του ${}^{210}\text{Po}$ που εκπέμπει σωματίδια- α ($E_\alpha=5,3\text{MeV}$).

Η φασματοσκοπία- γ είναι η ευκολότερη μέθοδος καθώς το δείγμα μπορεί να μετρηθεί άμεσα χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας. Εντούτοις, εξαιτίας της χαμηλής ενέργειας των ακτίνων- γ , η αυτοαπορρόφηση και η παρεμβολή από άλλες ακτίνες γ και X πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Για τη φασματοσκοπία- γ , έχει αναφερθεί όριο ανίχνευσης 440mBq με χρόνο ανάλυσης 1000min (Ebaid and Khater, 2006).

- Για την καταμέτρηση-β, το δείγμα πρέπει να αποσυντεθεί και ο Pb να διαχωριστεί από τη μήτρα και τα άλλα ραδιενεργά ισότοπα. Για τον διαχωρισμό του Pb, έχουν χρησιμοποιηθεί οι μέθοδοι της εξαγωγής με διαλύτη, της καθίζησης και της ανταλλαγής ιόντων. Ο διαχωρισμένος Pb φυλάσσεται για 8-9 ημέρες προκειμένου να σχηματιστεί ^{210}Bi , το οποίο μετριέται χρησιμοποιώντας μετρητή υγρού σπινθηρισμού (LSC). Για τη χρήση αυτής της μεθόδου, έχει αναφερθεί όριο ανίχνευσης 7mBq με χρόνο ανάλυσης 1000min (Ebaid and Khater, 2006).
- Για τη φασματοσκοπία-α, το δείγμα αρχικά αποσυντίθεται, μετά απομακρύνεται το ^{210}Po μέσω εξαγωγής του με διαλύτη ή αυτοεναπόθεσής του σε ασημένιο δίσκο, το δείγμα φυλάσσεται για περισσότερο από 3 μήνες προκειμένου να σχηματισθεί ^{210}Po , το νέο-σχηματιζόμενο ^{210}Po αυτό-εναποτίθεται τότε σε έναν ασημένιο δίσκο και μετριέται με φασματοσκοπία-α χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή ημιαγωγού. Λόγω του πολύ χαμηλού μετρούμενου υπόβαθρου και της υψηλής απόδοσης των καταμετρήσεων, έχουν αναφερθεί όρια ανίχνευσης 0,1-1mBq, ανάλογα με το χρόνο που διατέθηκε για τον σχηματισμό του ^{210}Po (Hou and Roos, 2008).
- Η φασματοσκοπία μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry, ICP-MS) έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του ^{210}Pb , αλλά το πρόβλημα της παρεμβολής μοριακών ιόντων καθώς και η δημιουργία ^{209}Bi ^{208}Pb καθιστούν την τεχνική αυτή λιγότερο ελκυστική σε σύγκριση με τις ραδιομετρικές μεθόδους, παρόλο η ανάλυση πραγματοποιείται πολύ γρήγορα.

➤ Το ανθρωπογενούς προέλευσης ραδιενεργό ισότοπο ^{137}Cs , ($T_{1/2}=30,2$ έτη), διασπάται σύμφωνα με το σχήμα:



Συνεπώς, ο προσδιορισμός του ^{137}Cs μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας φασματοσκοπία-γ και καταμέτρηση-β. Η πιο συνηθισμένη επιλογή είναι η χρήση της φασματοσκοπίας-γ ως συνέπεια της μεγάλης αφθονίας των ακτίνων-γ στα 661,7keV και της μικρής αυτοαπορρόφησης μέσα στα δείγματα λόγω της υψηλής ενέργειας. Αυτοί οι λόγοι, μαζί με την ευκολία της εφαρμογής της, καθιστούν τη φασματοσκοπία-γ μια εξαιρετική μέθοδο για τον προσδιορισμό του ^{137}Cs . Το όριο ανίχνευσης της μεθόδου για το ^{137}Cs μπορεί να είναι μικρότερο από 50mBq, το οποίο είναι μικρότερο από τα σημερινά περιβαλλοντικά επίπεδα στα περισσότερα δείγματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ: ^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , ^{210}Pb , ^{137}Cs ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Τα ραδιενεργά ισότοπα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτες ατμοσφαιρικών διεργασιών είναι: τα φυσικά κοσμικής προέλευσης ισότοπα ^7Be , ^{10}Be και ^{22}Na , το φυσικό γεωγενές ισότοπο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ καθώς και το τεχνολογικά επαγόμενο ^{137}Cs . Τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα αποτελούν *ιχνηλάτες* διαφόρων *ατμοσφαιρικών διεργασιών* διότι, αμέσως μετά την παραγωγή τους, έχουν την τάση να προσκολλώνται στα σωματίδια του ατμοσφαιρικού αεροζόλ, με αποτέλεσμα να παίρνουν μέρος στις ατμοσφαιρικές διεργασίες.

3.2 Διεργασίες υγρής και ξηρής απομάκρυνσης / εναπόθεσης και επαναιώρησης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισότοπων

Μετά τον σχηματισμό τους, τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα προσκολλώνται στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ⁽⁴⁾. Το 88% περίπου του ^7Be συνδέεται με σωματίδια ατμοσφαιρικών αιωρημάτων διαμέτρων μικρότερων από 1,1 μm , ενώ λιγότερο από 1% συνδέεται από σωματίδια διαμέτρων μεγαλύτερων από 7 μm (Young et al., 1975). Παρόμοια, η Ioannidou (2012) διαπίστωσε ότι πάνω από το 80% της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be σχετίζεται με σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου⁽⁵⁾ μικρότερης από 1,3 μm . Αυτό σημαίνει ότι τα αεροζόλ ^7Be ανήκουν στην περιοχή συσσώρευσης (accumulation mode)⁽⁶⁾. Επίσης, οι Papastefanou and Ioannidou (1995) εκτίμησαν ότι η μέση αεροδυναμική διάμετρος ραδιενέργειας (activity median aerodynamic diameter, AMAD) του ^7Be είναι 0,9 μm , με αποτέλεσμα ο μέσος χρόνος παραμονής⁽⁷⁾ του στην τροπόσφαιρα να είναι περίπου 8 ημέρες. Η τυπική κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be συναρτήσει της αεροδυναμικής διαμέτρου (D_p) των αεροζόλ ^7Be παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.1. Παρόμοια, ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ απορροφάται από σωματίδια αεροζόλ που ανήκουν στην περιοχή συσσώρευσης (διαμέτρου 0,07-2 μm) (Grundel and Postendorfen, 2004).

Τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα και στη συνέχεια εναποτίθενται στην επιφάνεια της γης με δύο διεργασίες⁽⁸⁾: **(i)** τη διεργασία της *ξηρής απομάκρυνσης* ή *ξηρής εναπόθεσης* (dry removal process ή dry deposition) και **(ii)** τη διεργασία της *υγρής απομάκρυνσης* ή *υγρής εναπόθεσης* (wet removal process ή wet deposition). Συνήθως, η απομάκρυνση από την ατμόσφαιρα και η επακόλουθη εναπόθεση στην επιφάνεια της γης γίνεται ταυτόχρονα και με τις δύο διεργασίες.

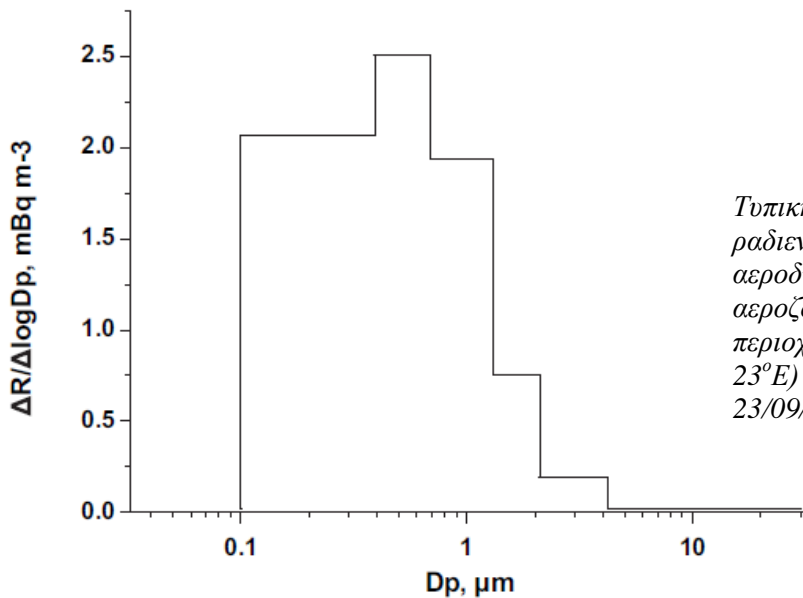
(4) Βλ. Παράρτημα Γ.1, Γ.2, Γ.3

(5) Βλ. Παράρτημα Γ.5

(6) Βλ. Παράρτημα Γ.4, Γ.6

(7) Βλ. Παράρτημα Γ.7

(8) Βλ. Παράρτημα Γ.8



Εικόνα 3.1

Τυπική κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be συναρτήσει της αεροδυναμικής διαμέτρου (D_p) των αεροζόλς ^7Be για δειγματοληψία στην περιοχή της Θεσσαλονίκης ($\sim 40^\circ\text{N}$, 23°E) κατά τη χρονική διάρκεια 22-23/09/09. (Ioannidou, 2012)

- (i) Η διεργασία της **ξηρής απομάκρυνσης** (dry removal process) ή **ξηρής εναπόθεσης** (dry deposition) γίνεται μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα. Συγκρινόμενη με τη διεργασία της υγρής απομάκρυνσης, είναι συνήθως λιγότερο σημαντική.
- (ii) Η διεργασία της **υγρής απομάκρυνσης** (wet removal process) ή **υγρής εναπόθεσης** (wet deposition) αποτελεί την κύρια διεργασία απομάκρυνσης των ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα και επιτυγχάνεται με τη *σάρωση μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων* (scavenging by precipitation).

Η διεργασία της υγρής απομάκρυνσης περιλαμβάνει δύο μηχανισμούς:

- (ii_a) τον μηχανισμό της **απόπλυσης (washout)**, ο οποίος λαμβάνει χώρα κάτω από τα σύννεφα και επιτυγχάνεται με τη σάρωση των ραδιενεργών αεροζόλς μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων.
- (ii_b) τον μηχανισμό της **βροχόπλυσης (rainout)**, ο οποίος λαμβάνει χώρα μέσα στα σύννεφα όταν τα ραδιενεργά αεροζόλς εισχωρούν σ' αυτά.

Τα ραδιενεργά ισότοπα, που εναποτίθενται μέσω υγρής και ξηρής εναπόθεσης στην επιφάνεια της γης, μπορεί να αποκολληθούν και να αιωρούνται ξανά στην ατμόσφαιρα. Η **επαναιώρηση (resuspension)** μπορεί να προκληθεί από διάφορες φυσικές διεργασίες, κυρίως λόγω της επίδρασης του ανέμου ή από ανθρωπογενείς διαταραχές (π.χ. γεωργικές καλλιέργειες, οχήματα κ.ά.). Η διεργασία αυτή εξαρτάται από τον τύπο της επιφάνειας (π.χ. χλωρίδα), τις μετεωρολογικές συνθήκες (π.χ. άνεμος, βροχή) και από τη φύση της ατμοσφαιρικής διαταραχής.

Στη βιβλιογραφία συχνά συναντάμε μελέτες για την επίδραση και τη σπουδαιότητα των παραπάνω διεργασιών στην απομάκρυνση ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα. Ενδεικτικά, αναφέρουμε ορισμένα σχετικά ευρήματα:

Η κυρίαρχη διεργασία απομάκρυνσης του ^7Be από την ατμόσφαιρα είναι η υγρή απομάκρυνση και μόνο το 10-38% απομακρύνεται μέσω της ξηρής εναπόθεσης (Fogh et al., 1999, McNeary and Baskaran, 2003, Ioannidou and Papstefanou, 2006). Παρόμοια με το ^7Be , η σάρωση από την κατακρήμνιση είναι ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Η ξηρή εναπόθεση για τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ κυμαίνεται από 4%-49% (McNeary and Baskaran, 2003). Επιπλέον, από τη μελέτη των Koch et al. (1996), η οποία αφορούσε σε μοντέλο της κατακόρυφης μεταφοράς του τροποσφαιρικού αεροζόλ, προέκυψε ότι το 88% του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ απομακρύνεται από τη βροχόπτωση και το 12% μέσω της ξηρής εναπόθεσης, ενώ το 68% του ^7Be απομακρύνεται από την κατακρήμνιση, το 3% μέσω της ξηρής εναπόθεσης και το υπόλοιπο 29% εξαιτίας της διάσπασής ως συνέπεια του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού του (~53 ημέρες). Σε αντίθεση με το ^7Be , το 90% της εναπόθεσης του ^{137}Cs αποτελεί την ξηρή εναπόθεση, με τον λόγο της ξηρής προς τη συνολική εναπόθεσής του να είναι μεγαλύτερος κατά έναν παράγοντα ~5 από ό,τι για το ^7Be (Rosner et al., 1996).

3.2.1 Μεγέθη που προσδιορίζουν τις διεργασίες εναπόθεσης και επαναιώρησης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων

Ο προσδιορισμός των διεργασιών εναπόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης γίνεται με τη βοήθεια διαφόρων μεγεθών, όπως είναι: η εναπόθεση F , ο ρυθμός καθαρισμού της ατμόσφαιρας (washout ratio ή precipitation scavenging ratio, W), η ταχύτητα εναπόθεσης (deposition velocity, V_d) (m s^{-1}) και ο παράγοντας επαναιώρησης (resuspension factor, k) (m^{-1}).

- Η εναπόθεση F ενός ραδιενεργού ισοτόπου στο νερό της βροχής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F = \frac{C \cdot V}{S} \quad (\text{Bq m}^{-2}) \quad (3.1)$$

όπου:

C : η συγκέντρωση ραδιενέργειας στο νερό της βροχής (Bq L^{-1}),

V : ο όγκος του δείγματος (L) και S : η ολική επιφάνεια συλλογής (m^2).

- Ο συντελεστής καθαρισμού της ατμόσφαιρας W (washout ratio ή precipitation scavenging ratio) ορίζεται από τη σχέση:

$$W = \rho \frac{C_{\text{rain}}}{C_{\text{air}}} \quad (3.2)$$

όπου:

$\rho = 1,2 \text{ kg m}^{-3}$ η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες (20°C και 760 mmHg),

C_{rain} : η συγκέντρωση του ραδιενεργού ισοτόπου (Bq kg^{-1}) στο νερό της βροχής και

C_{air} : η συγκέντρωση του ραδιενεργού ισοτόπου (Bq m^{-3}) στον αέρα.

Εικόνα 3.2

Πίνακας με τιμές του συντελεστή καθαρισμού της ατμόσφαιρας (*washout ratio*, *W*) για ατμοσφαιρικά σωματίδια ${}^7\text{Be}$, ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ${}^{137}\text{Cs}$. (Papastefanou, 2006 b)

${}^7\text{Be}$	${}^{210}\text{Pb}$	${}^{137}\text{Cs}$	Reference	Country
144 (103–175)	–	1295 (284–3810)	This work	Greece
–	–	560	Peirson & Keane, 1962 (7)	UK
–	–	680 (600–800)	Peirson & Cambray, 1965 (8)	UK
–	–	730	Cambray et al., 1970 (9)	UK
370 (370–375)	215 (203–228)	–	Todd et al., 1989 (17)	USA
948	637	–	McNeary & Baskaran, 2003 (19)	USA
–	–	230–6600	Garland & Playford, 1991 (20)	UK
–	430	230	Chamberlain, 1960 (23)	UK
–	530	–	Peirson et al., 1966 (24)	UK
–	–	700	Clark & Smith, 1988 (25)	UK

Typical range is given within brackets.

- Η **ταχύτητα εναπόθεσης V_d (deposition velocity)** περιγράφει τη μεταφορά των ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα προς την επιφάνεια της γης. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\text{όπου: } V_d = \frac{F}{C_{\text{air}}} \quad (\text{m s}^{-1}) \quad (3.3)$$

F : η συνολική ροή εναπόθεσης του ραδιενεργού ισοτόπου ($\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$),

C_{air} : η συγκέντρωση ραδιενέργειας του ραδιενεργού ισοτόπου στον επιφανειακό αέρα (Bq m^{-3}).

Ενδεικτικά, στους παρακάτω πίνακες των Εικόνων 3.3, 3.4 και 3.5 παραθέτουμε τιμές της ταχύτητας εναπόθεσης, που συναντάμε στη διεθνή βιβλιογραφία, για τα ραδιενεργά ισότοπα: ${}^7\text{Be}$, ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, και ${}^{137}\text{Cs}$, αντίστοιχα.

Εικόνα 3.3

Πίνακας με το εύρος τιμών των ταχυτήτων εναπόθεσης του ${}^7\text{Be}$ σε χώρες της Ευρώπης.

Ταχύτητα εναπόθεσης (m s^{-1})	Χώρα	Αναφορά
0,020 - 0,034	Monaco	Pham et al. (2011)
0,0005 - 0,022	Denmark	Fogh et al. (1999)
0,0007 - 0,0042	Germany	Rosner et al. (1996)
0.003 - 0,008	Greece	Ioannidou (2012)

Εικόνα 3.4

Πίνακας με το εύρος τιμών των ταχυτήτων εναπόθεσης του ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ παγκοσμίως.

Ταχύτητα εναπόθεσης (m s^{-1})	Χώρα	Αναφορά
0,019 - 0,047	Monaco	Pham et al. (2011)
0,0004 - 0,036	Detroit, Michigan	McNeary and Baskaran (2003)
0,01	Munich, Germany	Winkler and Rosner (2000)

Εικόνα 3.5

Πίνακας με το εύρος τιμών των ταχυτήτων εναπόθεσης του ^{137}Cs παγκοσμίως.

Ταχύτητα εναπόθεσης (m s^{-1})	Χώρα	Αναφορά
0,01 - 0,03	Monaco	Pham et al. (2011)
0,18 - 0,29	Denmark	Fogh et al. (1999)
0,05 - 0,15	Vietnam	Pham et al. (1994)
0,03 - 0,09	Canada	Smith and Ellis (1990)
0,0028 - 0,053	Germany	Rosner et al. (1996)

Η ταχύτητα εναπόθεσης έχει εφαρμογή στην εκτίμηση της μεταφοράς των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αεροζόλ στην επιφάνεια της γης. Η γνώση της ταχύτητας απόθεσης του ^7Be αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό της ταχύτητας απόθεσης διαφόρων στοιχείων. Έτσι, επειδή τα αεροζόλ στα οποία προσκολλάται το ^7Be έχουν παρόμοια ταχύτητα εναπόθεσης με ορισμένα μέταλλα, όπως Fe και Cu, είναι δυνατό να υπολογιστεί η ροή της ατμοσφαιρικής απόθεσης των μετάλλων αυτών στην επιφάνεια της γης. Επομένως, η μελέτη της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης του ^7Be θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ατμοσφαιρικής εισαγωγής μετάλλων και άλλων ρυπαντών στη θάλασσα (Ioannidou, 2011, 2012).

- Η διεργασία της επαναιώρησης εκφράζεται με τον **παράγοντα επαναιώρησης k (resuspension factor) (m^{-1})** δηλαδή το πηλίκο της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στον αέρα (Bq m^{-3}) προς τη συνολική εναπόθεση ανά μονάδα επιφάνειας (Bq m^{-2}):

$$k = \frac{\text{συγκέντρωση του αιωρούμενου υλικού στον αέρα} \quad (\text{Bq m}^{-3})}{\text{απόθεση στο έδαφος} \quad (\text{Bq m}^{-2})} \quad (3.4)$$

Εικόνα 3.6

Πίνακας με τιμές του παράγοντα επαναιώρησης (resuspension factor, k) για ατμοσφαιρικά σωματίδια ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{ex}$ και ^{137}Cs . (Papastefanou, 2006 b)

^7Be	^{137}Cs	Reference	Country
2.3 (1.6–4.2)	0.6 (0.1–1.2)	This work	Greece
–	10^{-3} –1	Stewart, 1966 (27)	UK
–	10^{-4}	Garland & Cambrey, 1988 (28)	UK

Typical range is given within brackets.

Σήμερα, η κυρίαρχη πηγή του ^{137}Cs στον αέρα είναι η επαναιώρηση του ήδη αποτιθέμενου ^{137}Cs στο έδαφος και η συνεπακόλουθη μεταφορά του από τους ανέμους (Matisoff et al., 2011). Οι Garland and Pomeroy (1994) έδειξαν ότι από έναν αρχικά μεγάλο παράγοντα επαναιώρησης $\sim 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, που παρατηρήθηκε μετά από την αρχική απελευθέρωση ^{137}Cs από το ατύχημα στο Chernobyl, αυτός μειώθηκε σε $\sim 10^{-9} \text{ m}^{-1}$. Παρόμοια, οι Fogh et al., (1999) βρήκαν για το ^{137}Cs έναν μέσο παράγοντα επαναιώρησης $3,6 \times 10^{-10} \text{ m}^{-1}$ και μικρή ή καμία

συσχέτιση με την κατακρήμιση. Επίσης, η εκτίμηση της επαναιώρησης του ^{137}Cs μπορεί να χρησιμεύσει για τη μελέτη της επίδρασης της σκόνης από την έρημο Σαχάρα στον επιφανειακό αέρα Ευρωπαϊκών Μεσογειακών χωρών (π.χ. Μονακό, Pham et al, 2005, 2016).

3.3 Δειγματοληψία, επεξεργασία και ανάλυση δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ και ατμοσφαιρικών κατακρημισμάτων

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται δειγματοληψίες:

(i) ατμοσφαιρικού αέρα χρησιμοποιώντας ειδικές αντλίες και (ii) υγρών κατακρημισμάτων (βροχή, χιόνι) χρησιμοποιώντας ειδικούς δειγματολήπτες.

3.3.1 Δειγματοληψία κι επεξεργασία δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ

Για την πραγματοποίηση δειγματοληψιών ατμοσφαιρικού αεροζόλ, χρησιμοποιούνται αντλίες αέρα στις οποίες τοποθετούνται συνήθως φίλτρα από ίνες γυαλιού (fiber-glass) ή φίλτρα κυτταρίνης (cellulose filters). Για την περίπτωση του ^7Be , λόγω της σχετικά μικρής συγκέντρωσής του στην ατμόσφαιρα (συνήθως $< 10\text{mBq m}^{-3}$), αλλά και των άλλων υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{137}Cs , ^{22}Na , η διάρκεια των δειγματοληψιών είναι συνήθως: **μηνιαία** [π.χ. Pham et al., 2011, 2013 (^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{137}Cs)], **εβδομαδιαία** [π.χ. Papastefanou and Ioannidou, 1995 (^7Be), Azahra et al., 2003 (^7Be), Duenas et al., 2003, 2009 (^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$), Leppanen et al., 2012 (^7Be , ^{22}Na), Chao et al., 2013, 2014 (^7Be), Steinmann et al., 2013 (^7Be , ^{22}Na), Blazej and Mietelski, 2014 (^7Be , ^{22}Na , ^{137}Cs), Bourcier et al., 2014 (^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{137}Cs)], **μερικών ημερών** [π.χ. 15 ημέρες: Hotzl and Winkler, 1987, 2-7 ημέρες: Aldahan et al., 2001 (^7Be), 3 ημέρες: Likuku, 2006 (^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)], **ημερήσια** [π.χ. 24ωρη, Ioannidou et al., 2005, 2014 (^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$), Ioannidou, 2011 (^7Be), Yu and Lee, 2002 (^7Be)] ή **πολλών ωρών** [π.χ. 14ωρη: Cannizzaro et al, 2004 (^7Be)].

Μετά το πέρας της δειγματοληψίας, τα φίλτρα, προκειμένου να υποβληθούν σε ανάλυση, συνήθως συμπιέζονται (π.χ. Hotzl and Winkler, 1987, Likuku, 2006, Ioannidou et al., 2005, Ioannidou, 2011, 2014, Pham et al., 2011, Leppanen et al., 2012, Steinmann et al., 2013, Blazej and Mietelski, 2014), ή διπλώνονται και σταθεροποιούνται με κατάλληλο σπρέι (π.χ. Cannizzaro et al, 2004), ή διπλώνονται και τυλίγονται γύρω από την εσωτερική κάθετη επιφάνεια δοχείων Marinelli (Yu and Lee, 2002) ή τοποθετούνται σε petri dishes (π.χ. Azahra et al., 2003).

Για το διαχωρισμό του ατμοσφαιρικού αεροζόλ σε διαφορετικά μεγέθη, δηλαδή για δειγματοληψία της συγκέντρωσης σωματιδίων συγκεκριμένης διαμέτρου, χρησιμοποιούνται οι αδρανειακοί συλλέκτες διαδοχικών σταδίων (cascade impactors), οι οποίοι διαχωρίζουν τα σωματίδια που βρίσκονται μέσα στο αεροζόλ συναρτήσει του μεγέθους τους [Yu and Lee, 2002, Papastefanou and Ioannidou, 1995, Ioannidou, 2011, 2012, Ζαχιώτης, 2013 (Δ.Ε., ΕΠΤ-ΕΜΠ)].

- **Δειγματοληψία κι επεξεργασία δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ στο ΕΠΤ-ΕΜΠ**

Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ στοχεύουν στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ^7Be σε μικρότερα χρονικά διαστήματα (~4h) από αυτά που συνήθως απαντώνται στη βιβλιογραφία, όπου προβλέπονται δειγματοληψίες πολλών ωρών ή και ημερών, ενώ οι συσχετίσεις που υπολογίζονται αφορούν στις μέσες εβδομαδιαίες ή και μηνιαίες τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών. Αντίθετα, οι ολιγόωρες δειγματοληψίες καθιστούν εφικτή τη μελέτη της μεταβολής της συγκέντρωσης του ^7Be στον αέρα σε μικρή κλίμακα χρόνου, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, ή κατά τη διάρκεια της παρουσίας κάποιου μετεωρολογικού φαινομένου, όπως για παράδειγμα ενός περιστατικού βροχόπτωσης.

Για την πραγματοποίηση δειγματοληψιών αέρα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιείται αντλία αέρα υψηλής παροχής (~80m³/h) (Εικόνα 3.7), η οποία είναι μόνιμα εγκαταστημένη στην ταράτσα (~10m πάνω από το έδαφος) του κτιρίου Κ του ΕΠΤ στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (~38°N, 23°E, 95m asl). Η αντλία είναι εξοπλισμένη με αισθητήρες που καταγράφουν τη ροή του αέρα, την ατμοσφαιρική πίεση και τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια κάθε δειγματοληψίας. Στην αντλία αυτή τοποθετούνται φίλτρα από ίνες γυαλιού (glass-fiber) τυποποιημένων διαστάσεων 8''x 10''. Μετά το πέρας τεσσάρων ωρών, το φίλτρο απομακρύνεται από την αντλία.



Εικόνα 3.7

Η αντλία αέρα τύπου DH-50810E της εταιρείας F & J Specialty Products Inc, που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

(Σάββα, 2009)

Μετά τη δειγματοληψία, το φίλτρο των παραπάνω διαστάσεων διπλώνεται στα μέσα των πλευρών του, ώστε να έχει τελικές **διαστάσεις 4'' x 5''** (12,70 x 10,16 cm) και στη συνέχεια τοποθετείται σε πλαστική σακούλα και σφραγίζεται αεροστεγώς για να ακολουθήσει η γ-φασματοσκοπική ανάλυσή του. Η γεωμετρία φίλτρου, με τις τελευταίες διαστάσεις, αποτελεί μία από τις τυποποιημένες γεωμετρίες που έχουν χρησιμοποιηθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και χαρακτηρίζεται ως «**γεωμετρία 12**» (Ρούνη, 2008) (Εικόνα 3.8.a). Όμως, διαπιστώθηκε ότι ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του ^7Be σε φίλτρα αέρα «γεωμετρίας 12» οδηγούσε σε συστηματικά σφάλματα και υπερεκτιμημένες τιμές της συγκέντρωσής του, αλλά και σε αυξημένα τυχαία σφάλματα (Σάββα, 2009). Συγκεκριμένα, η διάμετρος του ανιχνευτή XtRa

(80mm), ο οποίος χρησιμοποιείται για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων ατμοσφαιρικού αέρα σε φίλτρα, είναι μικρότερη από την ακμή του διπλωμένου σε «γεωμετρία 12» φίλτρου 8' x 10', με αποτέλεσμα ένα μέρος του φίλτρου να βρίσκεται εκτός των ορίων του παραθύρου του ανιχνευτή. Επιπλέον, επειδή το ραδιενεργό ισότοπο ^7Be βρίσκεται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα (λίγα mBq m^{-3}), με τον συνδυασμό δειγματοληψίας και ανάλυσης στον ανιχνευτή XtRa στην ήδη υπάρχουσα γεωμετρία φίλτρου («γεωμετρία 12») απαιτείται μέτρηση διάρκειας 18 ωρών, προκειμένου να προσδιορισθεί το ^7Be με αβεβαιότητα της τάξης του 10% , ενώ αν η συγκέντρωσή του είναι χαμηλή απαιτείται πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Δημιουργήθηκε λοιπόν, η ανάγκη για την εύρεση μιας **νέας γεωμετρίας** ανάλυσης φίλτρου, η οποία να προβλέπει το δίπλωμα του φίλτρου με τέτοιο τρόπο ώστε η ακμή του να είναι μικρότερη ή τουλάχιστον ίση με τη διάμετρο του ανιχνευτή στο παράθυρο μέτρησης. Με τον τρόπο αυτό η απόδοση αναμένεται να είναι υψηλότερη καθώς δεν θα υπάρχει μέρος του φίλτρου το οποίο να είναι εκτός του ανιχνευτή. Επίσης, το δίπλωμα θα πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε να ισοκατανέμεται όσο γίνεται το στρώμα από σωματίδια που έχουν συσσωρευτεί στο φίλτρο με τη δειγματοληψία αέρα, έτσι ώστε η «πηγή» να είναι πιο ομοιόμορφη (Εικόνα 3.8.c). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία πηγή όγκου, με διαστάσεις: **67,7 x 63,5 mm** (μικρότερες από τη διάμετρο ~80mm του ανιχνευτή XtRa). Το διπλωμένο στη νέα γεωμετρία φίλτρο εισάγεται σε πλαστικό φάκελο και σφραγίζεται αεροστεγώς (Εικόνα 3.8.b).

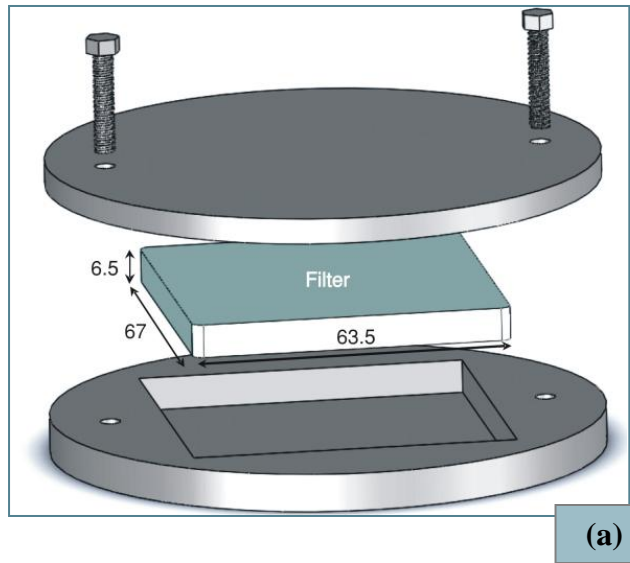
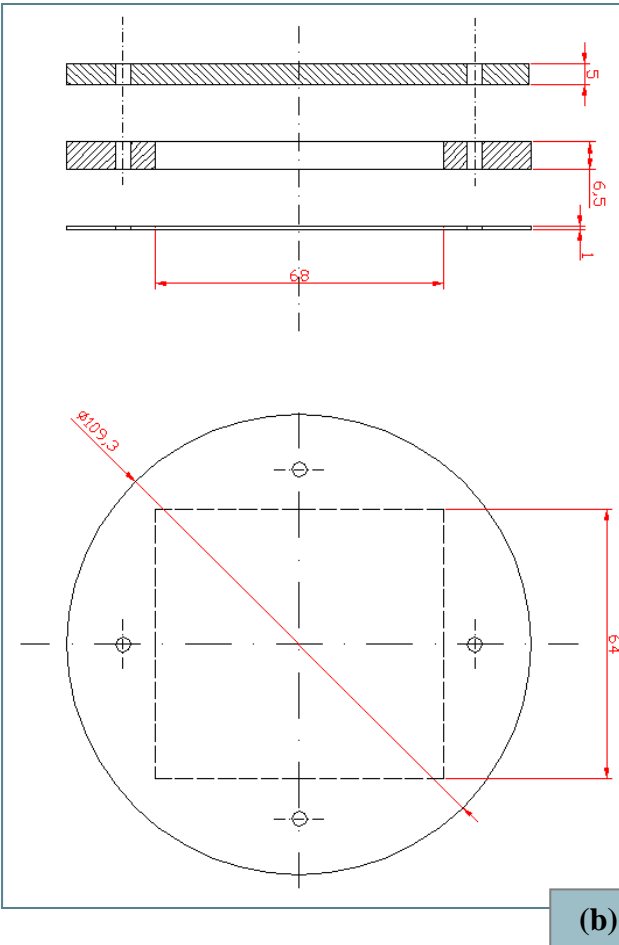
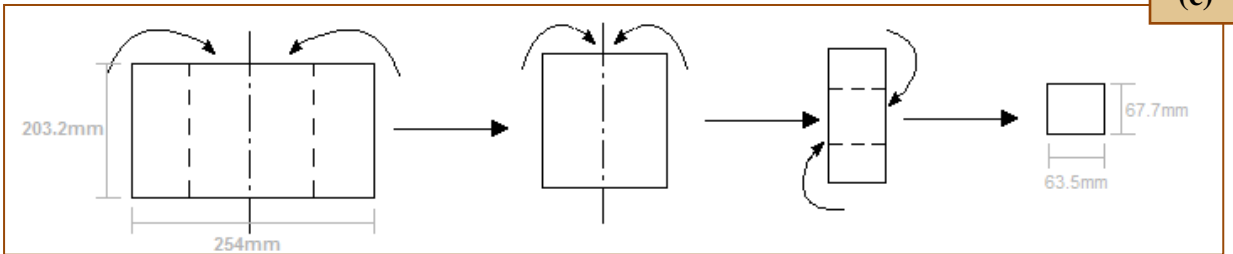
Επίσης, επειδή παρατηρείται εξάρτηση της απόδοσης του ανιχνευτή από το πάχος του φίλτρου κι επιπλέον εισάγεται μία ακόμη αβεβαιότητα από ένα διπλωμένο φίλτρο που δεν παρουσιάζει το ίδιο πάχος σε όλα τα σημεία του, δημιουργήθηκε η ανάγκη εύρεσης ενός τρόπου τυποποίησης του πάχους του φίλτρου, ώστε να υπάρχει μία σταθερή τιμή για αυτό. Έτσι, κατασκευάστηκε μία **θήκη από Plexiglas** στην οποία εισάγεται το προς ανάλυση φίλτρο (Σάββα, 2009). Πρόκειται για μια κυλινδρική κατασκευή η οποία στο εσωτερικό της έχει μια υποδοχή ορθογώνιας διατομής. Στην ορθογώνια υποδοχή της κατασκευής τοποθετείται το φίλτρο διπλωμένο στη νέα γεωμετρία (Εικόνα 3.9.a).

Η χρήση της νέας γεωμετρίας φίλτρων αέρα, παρέχει τη δυνατότητα αποδοτικότερης ανίχνευσης των φωτονίων ενέργειας 477.6 keV του ^7Be από τον ανιχνευτή XtRa. Διαπιστώθηκε ότι, για τον ίδιο χρόνο ανάλυσης των φίλτρων, επιτυγχάνεται μικρότερη τυχαία αβεβαιότητα στη συγκέντρωση του ^7Be στον αέρα καθώς επίσης και μείωση στο συστηματικό σφάλμα. Επιπλέον, η θήκη από Plexiglas επιτρέπει τη μεγαλύτερη επαναληψιμότητα κατά την τοποθέτηση του φίλτρου για ανάλυση, γεγονός που επιτρέπει την παρακολούθηση της κύμανσης της συγκέντρωσης του ^7Be στον αέρα με μεγαλύτερη ευκολία και ασφάλεια, παρέχοντας μεγαλύτερες δυνατότητες για τη μελέτη των παραμέτρων που επιδρούν στην κύμανση αυτή. Επίσης, κατά τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις στον ανιχνευτή XtRa φίλτρων αέρα με τη νέα γεωμετρία παρατηρήθηκε ότι για την επίτευξη στατιστικής της τάξης του 10% απαιτείται αισθητά μικρότερος χρόνος ανάλυσης (6-8ώρες) για συγκέντρωση του ^7Be περί τα 10mBq m^{-3} (Σάββα, 2009).

Η νέα γεωμετρία φίλτρων αέρα χρησιμοποιήθηκε για «ημερήσιο κύκλο δειγματοληψιών φίλτρων», δηλαδή για διαδοχική δειγματοληψία φίλτρων αέρα, κάθε 4 ώρες, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στη μελέτη της ημερήσιας κύμανσης του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα (Papandreou et al., 2011). Κύκλοι φίλτρων πραγματοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ σε τακτά χρονικά διαστήματα τα τελευταία χρόνια.



Εικόνα 3.8
 (a) Φίλτρο γεωμετρίας 12.
 (b) Φίλτρο νέας γεωμετρίας.
 (c) Τρόπος διπλώματος φίλτρου στη νέα γεωμετρία.
 (Σάββα, 2009)



Εικόνα 3.9
 (a) Η θήκη από Plexiglas και το φίλτρο της νέας γεωμετρίας. (Papandreou et al., 2011)
 (b) Το σχέδιο της θήκης από Plexiglas. (Σάββα, 2009)
 Όλες οι διαστάσεις δίνονται σε mm.

3.3.2 Δειγματοληψία κι επεξεργασία δειγμάτων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων

• Προετοιμασία και προσυμπύκνωση δειγμάτων νερού

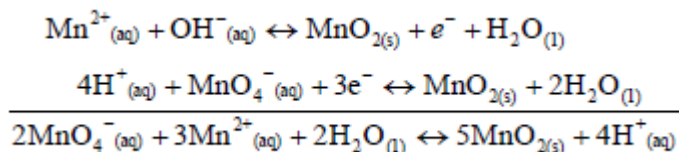
Τα δείγματα νερού συνήθως φιλτράρονται αμέσως μετά τη συλλογή τους με φίλτρα με μέγεθος πόρων 0,45μm. Στη συνέχεια προστίθεται οξύ (HNO₃ ή HCl) ώστε το pH ≤ 2 για να εξασφαλισθεί ότι όλα τα στοιχεία και τα ιχνοστοιχεία, που περιέχονται στο δείγμα του νερού, παραμένουν διαλυμένα, τα ραδιενεργά ισότοπα δεν επικάθονται στα τοιχώματα του δοχείου και αποτρέπεται η βιολογική ανάπτυξη.

• Εξάτμιση

Για δείγματα νερού που περιέχουν λίγα διαλυμένα στερεά συστατικά, τα ραδιενεργά ισότοπα μπορούν να προσυμπυκνωθούν με εξάτμιση. Η εξάτμιση είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος προετοιμασίας για τον προσδιορισμό ραδιενεργών ισωτόπων με γ-φασματοσκοπία. Για δείγματα όγκων από < 0,1 L έως 20 L, η διαδικασία διεξάγεται στους 70 - 100 °C σε ατμοσφαιρική πίεση ή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες κάτω από συνθήκες κενού. Η διαδικασία διαρκεί από < 1 ώρα έως 2-3 ημέρες. Το μειονέκτημα είναι ότι πρόκειται για μια χρονοβόρα μέθοδο με φτωχή ή και ανύπαρκτη επιλεκτικότητα.

• Συγκαθίζηση

Για τη μέτρηση του ⁷Be στο νερό της βροχής συνιστάται η εξαγωγή του ⁷Be από το διάλυμα με συγκαθίζηση με τη μέθοδο του MnO₂, που περιγράφουν οι Short et al. (2007), την οποία συναντάμε και αλλού στη βιβλιογραφία (π.χ. Wallbring and Murray, 1994 Taylor et al., 2016). Όταν μίγμα δύο αλάτων του μαγγανίου (KMnO₄ και MnCl₂) προστίθεται σε ένα υγρό δείγμα, τότε παράγεται MnO₂. Κάτω από κατάλληλες συνθήκες pH, το MnO₂ απορροφά ιόντα μετάλλων που υπάρχουν στο διάλυμα. Οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής που λαμβάνουν χώρα είναι (Short et al., 2007):



Τα δείγματα του βρόχινου νερού προετοιμάζονται και αναλύονται ως εξής:

- Προστίθεται 1ml διαλύματος KMnO₄ 0,2M σε κάθε λίτρο δείγματος.
- Το pH ρυθμίζεται στο 8-10 με προσθήκη πυκνού NH₄OH (απαιτούνται συνήθως 10ml πυκνού NH₄OH για κάθε λίτρο δείγματος).
- Προστίθεται αργά 1ml διαλύματος MnCl₂ 0,3M, ενώ το δείγμα ανακατεύεται ή ανακινείται για λίγα λεπτά προκειμένου να διατηρηθεί το ίζημα MnO₂ σε αιώρηση.
- Το ίζημα αφήνεται να κατακαθίσει.
- Το ίζημα διαχωρίζεται με διήθηση με χρήση διηθητικού χαρτιού 0,45μm.
- Το διηθητικό χαρτί ξηραίνεται, τυλίγεται με σελοφάν και τοποθετείται σε κατάλληλο δοχείο προκειμένου να υποβληθεί σε γ-φασματοσκοπική ανάλυση.

Όλα τα γυάλινα σκεύη και τα δοχεία πλένονται πρώτα με ισχυρά απορρυπαντικά και στη συνέχεια με διάλυμα HNO₃ 2M (2 ώρες) και τελικά με απιονισμένο νερό (Short et al., 2007).

- **Διαδικασία συλλογής ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο ΕΠΤ-ΕΜΠ**

Τα τελευταία χρόνια στο ΕΠΤ-ΕΜΠ γίνεται προσπάθεια ώστε η δειγματοληψία υγρών κατακρημνίσεων (βροχή, χιόνι) να πραγματοποιείται με πιο συστηματικό τρόπο και ταυτόχρονα επιχειρείται η βελτίωση της διαδικασίας προετοιμασίας των δειγμάτων αυτών με στόχο την επίτευξη ακριβέστερου προσδιορισμού της συγκέντρωσης ραδιενεργών ισοτόπων (ιδιαίτερα του ^7Be) σε αυτά. Η μέθοδος ανάλυσης των δειγμάτων και των δύο τύπων κατακρημνίσεων είναι η ίδια, αφού το χιόνι λιώνει και στη συνέχεια η επεξεργασία του γίνεται με τρόπο όμοιο με αυτόν της επεξεργασίας βρόχινου νερού. Ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση της εξέλιξης τέτοιων προσπαθειών στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Για τη μελέτη των υγρών κατακρημνίσεων είναι τοποθετημένα, στην ταράτσα του κτιρίου Κ του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ορθογώνια δοχεία συλλογής. Τα δοχεία έχουν διαστάσεις 55 x 30 x 20 cm και η συνολική επιφάνεια συλλογής είναι 0,66 m². Πριν από κάθε γεγονός κατακρήμνισης που πρόκειται να μελετηθεί, οι λεκάνες ξεπλένονται με νερό της βρύσης, αραιό HNO₃ (1%) και τέλος με αποσταγμένο νερό. Στόχος είναι η απομάκρυνση σωματιδίων που έχουν κατακαθίσει στα τοιχώματα ή στον πυθμένα των δοχείων. Μετά τον καθαρισμό των συλλεκτών, αυτοί τοποθετούνται στην ταράτσα, σε σημείο μακριά από εμπόδια, τα οποία θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποσότητα ή και την ποιότητα του νερού που συλλέγεται.

Μετά το πέρας της δειγματοληψίας το νερό συσκευάζεται σε ειδικά πλαστικά ή γυάλινα δοχεία χωρητικότητας ενός λίτρου και σφραγίζεται μέχρι την ανάλυσή του, η οποία θα πρέπει να πραγματοποιηθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα. Οι λεκάνες συλλογής ξεπλένονται με αποσταγμένο νερό και το ξέπλυμα προστίθεται στο δείγμα προκειμένου να ληφθούν από τις λεκάνες συλλογής ιζήματα που μπορεί να έχουν επικαθίσει στα τοιχώματα και τα οποία προέρχονται από τις υγρές κατακρημνίσεις. Η ποσότητα του αποσταγμένου νερού που χρησιμοποιείται καταμετράται, ώστε να ληφθεί υπ' όψιν κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

- **Διαδικασίες επεξεργασίας των δειγμάτων των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο ΕΠΤ-ΕΜΠ**

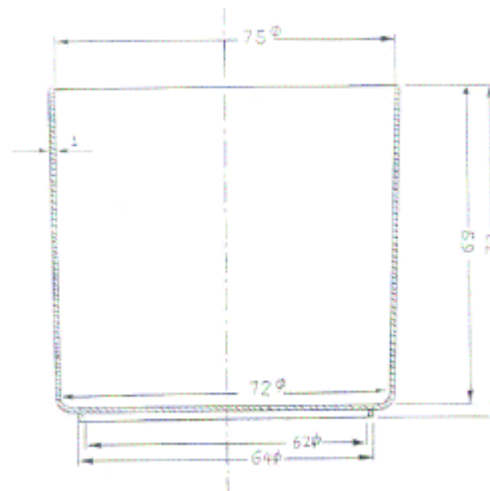
- **Καμία επεξεργασία**

Η πιο απλή μέθοδος επεξεργασίας ενός δείγματος υγρών κατακρημνίσεων με σκοπό τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ^7Be είναι η συσκευασία του δείγματος σε ένα πλαστικό δοχείο χωρίς καμία επεξεργασία. Το δοχείο που χρησιμοποιείται ευρέως στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τη συσκευασία των δειγμάτων είναι κυλινδρικό συνολικού όγκου 282 cm³. Το δοχείο μπορεί να πληρωθεί είτε πλήρως είτε μερικώς. Πλήρης πλήρωση οδηγεί σε δείγμα με την κωδική ονομασία «γεωμετρία 2» (Εικόνα 3.10), ενώ μερική πλήρωση οδηγεί σε γεωμετρίες με την κωδική ονομασία «γεωμετρία 5», όταν πληρώνεται μέχρι ύψος 22 mm, και «γεωμετρία 8» όταν η πλήρωση είναι μέχρι το 10 mm. Η πλήρωση γίνεται ανάλογα με τον διαθέσιμο όγκο του νερού.

Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αμεσότητα της, καθώς τα δείγματα των κατακρημνίσεων μπορούν να συσκευαστούν και να τοποθετηθούν για ανάλυση εντός λίγων λεπτών μετά το πέρας της δειγματοληψίας. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι αναμενόμενες συγκεντρώσεις ^7Be στις κατακρημνίσεις είναι χαμηλές (της τάξης των 1-2 Bq/L), η έλλειψη επεξεργασίας των δειγμάτων οδηγεί σε υψηλές αβεβαιότητες όσον αφορά στον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ^7Be σε αυτά.

Εικόνα 3.10

Δοχείο που χρησιμοποιείται στη «γεωμετρία 2» (πλήρης πλήρωση)



ο Φιλτράρισμα και μερική εξάτμιση

Η μέθοδος περιλαμβάνει το φιλτράρισμα των δειγμάτων των υγρών κατακρημνίσεων μέσα από κατάλληλα φίλτρα με σκοπό την κατακράτηση των σωματιδίων που υπάρχουν στο νερό (Σάββα, 2009) (Εικόνα 3.11). Μετά την κατακράτηση των σωματιδίων του νερού από τα φίλτρα, αυτά αφήνονται να στεγνώσουν στον αέρα για μία ημέρα. Στη συνέχεια, συσκευάζονται με χρήση μεμβράνης (κοινή μεμβράνη τροφίμων) για να αναλυθούν (Εικόνα 3.12).

Μετά την κατακράτηση των σωματιδίων στα φίλτρα, το νερό τοποθετείται σε ειδικό υδατόλουτρο αποσταγμένου νερού (Εικόνα 3.13) ώστε να υποστεί ελαφρά εξάτμιση (στους $\sim 80^\circ\text{C}$). Η διάρκεια της εξάτμισης ποικίλει, ανάλογα με τον όγκο του νερού. Σκοπός της εξάτμισης είναι η μείωση του όγκου του νερού ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί σε τυποποιημένα δοχεία «γεωμετρίας 2» (όγκου $\sim 280\text{ml}$) για να αναλυθεί.

Τέλος, μετά την ανάλυση και του φιλτραρισμένου νερού, υπολογίζεται η συγκέντρωση του αρχικού δείγματος, ως το άθροισμα των ανηγμένων συγκεντρώσεων ^7Be που υπολογίστηκαν για το φίλτρο και το φιλτραρισμένο νερό. Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία για την επεξεργασία και ανάλυση των δειγμάτων βρόχινου νερού προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα (Σάββα, 2009):

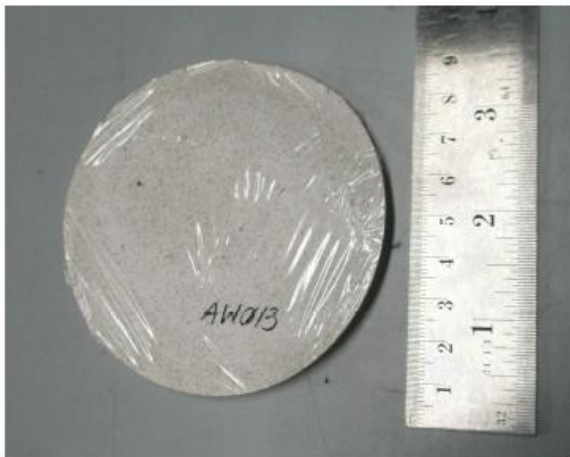
- Η ανάλυση των φίλτρων, μέσα από τα οποία έχει φιλτραριστεί το νερό της βροχής, οδηγεί σε μάλλον χαμηλές τιμές της ραδιενέργειας του ^7Be ($\sim 0,13 \text{ Bq L}^{-1}$) και μέτρια στατιστική.
- Η εκτίμηση του κατώτερου επιπέδου ανίχνευσης του ^7Be στο νερό της βροχής ($\sim 0,84 \text{ Bq L}^{-1}$), μέσω της γ -φασματοσκοπικής ανάλυσης του σε «γεωμετρία 2», έδειξε ότι στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν να υπάρχει αξιόλογη ποσότητα ^7Be στο νερό, η οποία όμως δεν μπορεί να ανιχνευθεί.



Εικόνα 3.11

Η διάταξη φιλτραρίσματος που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

(Σάββα, 2009)



Εικόνα 3.12

Χρησιμοποιημένο και συσκευασμένο φίλτρο βρόχινου νερού, που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

(Σάββα, 2009)



ο Πλήρης εξάτμιση

Με στόχο τη βελτίωση της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας επεξεργασίας των δειγμάτων υγρών κατακρημνίσεων, δοκιμάστηκε η πλήρης εξάτμιση ενός δείγματος υγρών κατακρημνίσεων μέχρι το σχηματισμό επιφανειακής πηγής (Μπασιάς, 2013). Στόχος ήταν η συμπύκνωση του ^7Be και η απόθεσή του ως επιφανειακή πηγή, η οποία αναμένεται να έχει μεγαλύτερη απόδοση ανίχνευσης. Το σκεπτικό ήταν ότι, εξατμίζοντας πλήρως το νερό, η ίδια ποσότητα ^7Be κατανέμεται σε λιγότερο όγκο, και η ανάλυση του δείγματος αναμένεται να γίνει πιο αποδοτική και με καλύτερη στατιστική.

Έτσι, ένα δείγμα (576,8g) τοποθετήθηκε σε γυάλινο δοχείο αυξημένης επιφάνειας εξάτμισης και στη συνέχεια σε λουτρό αποσταγμένου ύδατος μεγάλης χωρητικότητας (Εικόνα 3.14). Η θερμοκρασία του ύδατος επιλέχθηκε έτσι ώστε η θερμοκρασία στο δείγμα να είναι περί τους 80 °C. Η συγκεκριμένη θερμοκρασία σε συνδυασμό με την αυξημένη επιφάνεια εξάτμισης του δοχείου επέτρεψε την εξάτμιση του νερού σε διάρκεια περίπου 8 ωρών. Μετά την πλήρη εξάτμιση, τα τοιχώματα του δοχείου ξηπλώθηκαν σχολαστικά με αραιό HNO_3 (1%) και το δείγμα μεταφέρθηκε σε μικρότερο γυάλινο δοχείο.



Εικόνα 3.14

*Το λουτρό αποσταγμένου
ύδατος μεγάλης χωρητικότητας
του ΕΠΤ-ΕΜΠ.*

(Μπασιάς, 2013)

Το μικρότερο γυάλινο δοχείο με τη σειρά του τοποθετήθηκε στο μικρότερο λουτρό αποσταγμένου ύδατος (Εικόνα 3.13), ώστε να εξατμιστεί το οξύ που χρησιμοποιήθηκε για το ξέπλυμα. Το δοχείο αφέθηκε στον αέρα για να στεγνώσει πλήρως και στη συνέχεια ακολούθησε η ανάλυσή του.

Η αβεβαιότητα της μέτρησης με αυτή τη μέθοδο επεξεργασίας ήταν αρκετά μικρότερη σε σχέση με την προηγούμενη (φιλτράρισμα και μερική εξάτμιση), αλλά συνέχισε να παραμένει μεγάλη. Έτσι, παρόλη τη βελτίωση στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ^7Be , η μέθοδος της πλήρους εξάτμισης δεν επέφερε τα επιθυμητά αποτελέσματα, αφού η αβεβαιότητα εξακολούθησε να είναι μεγαλύτερη από 10%.

ο Χρήση ρητίνης ανταλλαγής ιόντων

Πρόκειται για μια μεθοδολογία που απαντάται στη βιβλιογραφία (Komura et al., 2006, Jungck et al., 2009) και περιλαμβάνει τη χρήση ρητίνης κατιόντων με στόχο την «παγίδευση» των κατιόντων ${}^7\text{Be}$ στα μόρια της ρητίνης και τον εν συνεχεία προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ${}^7\text{Be}$ μέσω γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης της ρητίνης.

Η μέθοδος δοκιμάστηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Μπασιάς, 2013) για δείγμα μεγάλης ποσότητα (~3L) βρόχινου νερού και διαπιστώθηκε ότι η επεξεργασία και ανάλυση δείγματος υγρών κατακρημνίσεων γίνεται σε εύλογο χρονικό διάστημα και με την επιθυμητή ακρίβεια. Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι τα εξής:

- δειγματοληψία βρόχινου νερού ή χιονιού, όπως περιγράφηκε παραπάνω,
- προσθήκη ρητίνης κατιόντων, αφού πρώτα το δείγμα αποκτήσει $\text{pH} \approx 5$ για να αποφεύγεται η υδρόλυση των κατιόντων μετάλλων,
- ανάδευση του δείγματος με τη ρητίνη, με στόχο την ανταλλαγή ιόντων σε ολόκληρη την ποσότητα του δείγματος,
- φιλτράρισμα του διαλύματος δείγματος - ρητίνης με σκοπό την κατακράτηση της ρητίνης,
- ξήρανση της ρητίνης και
- γ-φασματοσκοπική ανάλυση της ρητίνης με σκοπό τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ${}^7\text{Be}$ σε αυτή.

Μετά την ξήρανση της ρητίνης δοκιμάστηκαν διαφορετικά δοχεία πλήρωσης και υιοθετήθηκε η γεωμετρία τριβλίου (Εικόνα 3.15) διότι έδωσε τη μεγαλύτερη απόδοση κι επίσης με τη χρήση του εξασφαλίζεται η ομοιομορφία του δείγματος, αφού το δοχείο γεμίζεται πλήρως με ρητίνη και η συμπίεση γίνεται από το ίδιο το καπάκι του.



Εικόνα 3.15

*Ρητίνη ανταλλαγής κατιόντων
σε πλαστικό τριβλίο.*

(Μπασιάς, 2013)

Επίσης, για να διαπιστωθεί κατά πόσο δεν διαρρέει ποσότητα ${}^7\text{Be}$ στο φιλτραρισμένο νερό, το σύνολο του φιλτραρισμένου νερού ετοιμάστηκε για ανάλυση. Από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δεν προέκυψε φωτοκορυφή στην περιοχή του ${}^7\text{Be}$. Επιπλέον, αναλύθηκε και το χρησιμοποιημένο φίλτρο ώστε να διαπιστωθεί εάν ποσότητα ${}^7\text{Be}$ παρέμενε στο φίλτρο. Από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δεν προέκυψε φωτοκορυφή ${}^7\text{Be}$.

Η υπεροχή της μεθόδου είναι εμφανής αφού απαιτεί πολύ μικρότερη προετοιμασία σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους, δεν υπάρχουν αμφιβολίες για την ομοιομορφία του δείγματος, είναι αποτελεσματική στη συγκράτηση του ${}^7\text{Be}$ και δίνει πολύ καλύτερα επίπεδα

αβεβαιότητας κατά τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ενδιαφέροντος, τα οποία βρίσκονται και εντός των επιθυμητών ορίων (<10%).

Συμπερασματικά, η μεθοδολογία της χρήσης ρητίνης ανταλλαγής ιόντων αυξάνει την ποιότητα των μετρήσεων σε δείγματα βροχής ή χιονιού και οδηγεί σε επίπεδα ακρίβειας αντίστοιχα των μετρήσεων στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η μεθοδολογία αυτή είναι η καταλληλότερη για να υιοθετηθεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση των νόμων που επηρεάζουν τη συγκέντρωση του ισοτόπου ^7Be στις υγρές κατακρημνίσεις, καθώς και της πολυπλοκότητας των φαινομένων που εμπλέκονται στο ρυθμό απόθεσής του.

3.3.3 Μέτρηση της συγκέντρωσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων σε ατμοσφαιρικά δείγματα - Δυνατότητες και περιορισμοί

Όπως διαπιστώνουμε από τη βιβλιογραφία, οι μετρήσεις ραδιενέργειας των ^7Be και ^{137}Cs σε δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ και ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων λαμβάνονται συνήθως με φασματοσκοπία- γ , χρησιμοποιώντας έναν κλασσικό κυλινδρικό ομοαξονικό ανιχνευτή γερμανίου «τύπου P», με εύρος ενεργειών από 40 keV έως 10 MeV και τα ραδιενεργά ισότοπα ^7Be και ^{137}Cs να ανιχνεύονται στα **477,6 keV** και **661,7 keV**, αντίστοιχα. Η διάρκεια της γ -φασματοσκοπικής ανάλυσης διαφοροποιείται από εργαστήριο σε εργαστήριο. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, για την ανίχνευση του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ καθώς και σε ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα χρησιμοποιείται ο ανιχνευτής XtRa διότι έχει καλύτερη απόδοση συγκριτικά με τους άλλους ανιχνευτές γερμανίου του Εργαστηρίου καθώς επίσης και καλή διακριτική ικανότητα, παρά τον μεγάλο όγκο του κρυστάλλου του (Σάββα, 2009).

Ο προσδιορισμός του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ και ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων πραγματοποιείται συνήθως με φασματοσκοπία- γ στα **46,5 keV** (π.χ. Hotzl and Winkler, 1987, Cannizzaro et al., 1999, Winkler and Rosner, 2000, Azahra et al., 2004b, McNeary and Baskaran, 2003, Duenas et al., 2003, 2005, 2009, Ioannidou et al., 2005, Papastefanou, 2006b, Yoshimori, 2005a, Likuku, 2006, Short et al., 2007, Pham et al., 2005, 2011, 2013, 2016, Bourcier et al., 2014, Gourdin et al., 2014). Επίσης, ο προσδιορισμός του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ έχει πραγματοποιηθεί με φασματοσκοπία- α (βλ. §2.4.2) (π.χ. Carvalho, 1995, Vecchi et al., 2005), φασματοσκοπία- α και καταμέτρηση- β (βλ. §2.4.3) (π.χ. Todd and Wong, 1989, Paatero et al., 1998, 2003), καταμέτρηση- β και φασματοσκοπία- γ (π.χ. Papastefanou, 2006a), ενώ σε δείγματα ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων έχει χρησιμοποιηθεί φασματοσκοπία- γ και φασματοσκοπία μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος, ICP-MS, (βλ. §2.4.5) (π.χ. Caillet et al., 2001).

Η ανίχνευση του ^{22}Na μπορεί να πραγματοποιηθεί με φασματοσκοπία- γ στα **1275 keV**, αλλά σε περιβαλλοντικά δείγματα παρουσιάζει δυσκολίες εξαιτίας της πολύ μικρής συγκέντρωσής του. Διαπιστώνουμε ότι σε παλαιότερες βιβλιογραφικές αναφορές, η ανίχνευση του ^{22}Na πραγματοποιείται σε δείγματα βρόχινου νερού, ενώ σε πιο πρόσφατες επιχειρείται η ανίχνευσή του στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα, χρησιμοποιώντας ανιχνευτικές διατάξεις ακτινοβολίας- γ πολύ χαμηλού υπόβαθρου καθώς και τεχνικές φασματοσκοπικής ανάλυσης γ - γ σύμπτωσης / αντισύμπτωσης, οι οποίες διαρκώς

βελτιώνονται (βλ. §2.4.1). Παραδείγματα ερευνητικών μελετών, που περιλαμβάνουν την ανίχνευση του ^{22}Na σε δείγματα ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και ατμοσφαιρικού αεροζόλ, αναφέρουν τα εξής:

- Ανάλυση δείγματος βρόχινου νερού με χρήση ομοαξονικού ανιχνευτή HPGe, διορθώσεις για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, χρόνους ανάλυσης $(3 - 8) \times 10^5 \text{ s}$ (δηλαδή, περίπου 4-9 ημέρες) και ελάχιστο όριο ανίχνευσης $0,28 \text{ mBq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Tokuyama and Igarashi, 1998).
- Ανάλυση φίλτρων ατμοσφαιρικού αεροζόλ με χρήση ανιχνευτή HPGe well-type, καλή θωράκιση και σχετική απόδοση 8,1% για τα 1275keV (Jasiulionis and Wershofen, 2005).
- Ανάλυση φίλτρων ατμοσφαιρικού αεροζόλ με χρήση ανιχνευτή HPGe, με καλή θωράκιση για να μειώνεται η ακτινοβολία του υπόβαθρου, χρόνους ανάλυσης 65-70 ώρες και με σχετική (1σ) στατιστική αβεβαιότητα να κυμαίνεται μεταξύ 5-20% για δείγματα υψηλών συγκεντρώσεων και 20-50% για δείγματα χαμηλών συγκεντρώσεων (Leppanen et al., 2012).
- Ανάλυση φίλτρων ατμοσφαιρικού αεροζόλ με χρήση ανιχνευτή HPGe σε εργαστήριο χαμηλού υπόβαθρου και χρόνους ανάλυσης 1-2 ημέρες χωρίς διορθώσεις για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης με αποτέλεσμα οι μετρούμενες ραδιενέργειες του ^{22}Na να θεωρηθούν υπερεκτιμημένες κατά 10% περίπου (Steinmann et al., 2013).
- Ανάλυση φίλτρων ατμοσφαιρικού αεροζόλ με χρήση ανιχνευτή HPGe και την αυτοσχέδια θωράκιση των Blazej and Mietelski (2014) (βλ. §2.4.1, Εικόνα 2.20). Η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια $0,7\mu\text{Bq m}^{-3}$, που λαμβάνεται για το ^{22}Na σε ένα συνηθισμένο καθεστώς μετρήσεων (δηλ ένα μονό φίλτρο, χρόνο ανάλυσης 1 ημέρα, έναν τυπικό ανιχνευτή χαμηλού υπόβαθρου), μειώθηκε σχεδόν κατά μία τάξη μεγέθους, πέφτοντας στα $0,1 \mu\text{Bq m}^{-3}$, για το δικό τους πρωτόκολλο (διπλό φίλτρο, ανιχνευτή πολύ χαμηλού υπόβαθρου και χρόνο ανάλυσης 7 ημέρες).
- Ανάλυση φίλτρων ατμοσφαιρικού αεροζόλ με χρήση του φασματομέτρου γ - γ σύμπτωσης/αντισύμπτωσης, που προτείνουν οι Zhang et al. (2014) (βλ. §2.4.1, Εικόνα 2.21), ανιχνεύοντας πολύ μικρές ποσότητες ^{22}Na με κρίσιμο όριο τα 3 mBq σε 20 ώρες χρόνο ανάλυσης.

Τέλος, για τον προσδιορισμό του ^{10}Be έχει χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά η φασματοσκοπία μάζας με επιταχυντή, AMS, (βλ. §2.4.5) (π.χ. Aldahan et al., 2001, Jordan et al., 2003, Zanis et al., 2003, Heikkil et al., 2008).

3.4 Συγκέντρωση των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στα νέφη και στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

3.4.1 Συγκέντρωση των ραδιενεργών ισοτόπων: ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^{137}Cs στα νέφη και απόδοση σάρωσης του ατμοσφαιρικού αεροζόλ από τα σταγονίδια των νεφών

Πολύ λίγες βιβλιογραφικές αναφορές σχετικές με τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στο νερό των νεφών είναι διαθέσιμες, ενώ τα επίπεδα ραδιενέργειας του ^{137}Cs στο νερό των νεφών δεν είχαν εκτιμηθεί πριν τη μελέτη των Bourcier

et al. (2014), η οποία πραγματοποιήθηκε στο Puy de Dome (~ 45° N, 3° E) της Γαλλίας, σε υψόμετρο 1465 m asl για χρονική περίοδο 8 μηνών (2008-2009). Εκτός από τη μέτρηση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας, είναι χρήσιμη και η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των σταγονιδίων των νεφών να σαρώνουν τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα.

Η απόδοση σάρωσης F (scavenging efficiency) του ατμοσφαιρικού αεροζόλ από τα σταγονίδια των νεφών μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση (Bourcier et al., 2014):

$$\text{όπου: } F = \frac{[C]_{cloud} \times LWC}{[C]_{aerosol}} \quad (3.5)$$

$[C]_{cloud}$: η συγκέντρωση ραδιενέργειας του ραδιενεργού ισότοπου στα σταγονίδια των νεφών ($\mu\text{Bq L}^{-1}$),

$[C]_{aerosol}$: η συγκέντρωση ραδιενέργειας του ραδιενεργού ισότοπου στα σωματίδια αεροζόλ ($\mu\text{Bq m}^{-3}$) για την αντίστοιχη χρονική περίοδο και

LWC : η περιεκτικότητα (g m^{-3}) σε νερό υγρής μορφής (Liquid Water Content).

Θεωρώντας ότι το νερό των νεφών έχει πυκνότητα 1000 kg m^{-3} , η απόδοση σάρωσης F είναι ίση με $(\mu\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1})(\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) / (\mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$ και είναι αδιάστατο μέγεθος.

Οι θεωρητικές τιμές του F κυμαίνονται από 0 (κανένα σωματίδιο αεροζόλ στα σταγονίδια των νεφών) έως 1 (όλα τα σωματίδια αεροζόλ έχουν σαρωθεί από τα σταγονίδια των νεφών).

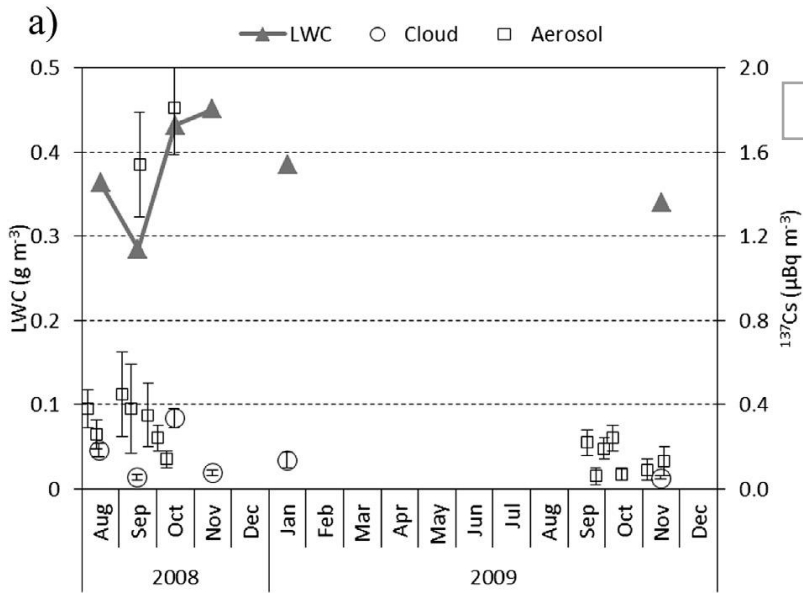
Εικόνα 3.16

Πίνακας με τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων που προέκυψαν από τη μελέτη των Bourcier et al., (2014).

Μέσες τιμές	^7Be	^{210}Pb	^{137}Cs
$[C]_{cloud}$	$(4,5 \pm 0,3) \text{ Bq L}^{-1}$	$(320 \pm 0,20) \text{ mBq L}^{-1}$	$(320 \pm 57) \mu\text{Bq L}^{-1}$
$[C]_{aerosol}$	$(6,8 \pm 0,67) \text{ mBq m}^{-3}$	$(940 \pm 90) \mu\text{Bq m}^{-3}$	$(0,23 \pm 0,09) \mu\text{Bq m}^{-3}$
LWC	$(0,36 \pm 0,06) \text{ g m}^{-3}$		
F	$0,24 \pm 0,10$	$0,13 \pm 0,09$	$0,40 \pm 0,22$

Από τις τιμές του παραπάνω πίνακα, διαπιστώνεται ότι το ^{137}Cs ενσωματώνεται πιο αποτελεσματικά συγκριτικά με το ^7Be και τον ^{210}Pb , γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στη μεγαλύτερη διαλυτότητα του ^{137}Cs .

Παρόλο που οι προκύπτουσες μετρήσεις συγκέντρωσης ραδιενέργειας των υπό μελέτη ραδιενεργών ισότοπων και ο υπολογισμός της απόδοσης σάρωσής τους από τα σταγονίδια των νεφών (πίνακας Εικόνας 3.16) αποτελούν μόνο εκτιμήσεις και χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση και επιβεβαίωση, εντούτοις παρέχουν κάποια ενδεικτικά στοιχεία για τον μηχανισμό που σχετίζεται με τη σάρωση των ραδιενεργών ισότοπων μέσα στα σύννεφα. Τέτοιου είδους γνώσεις μπορούν να αποβούν πολύ χρήσιμες σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος καθώς επίσης και σε περιοχές όπου επικρατούν συνθήκες ομίχλης (Bourcier et al., 2014).

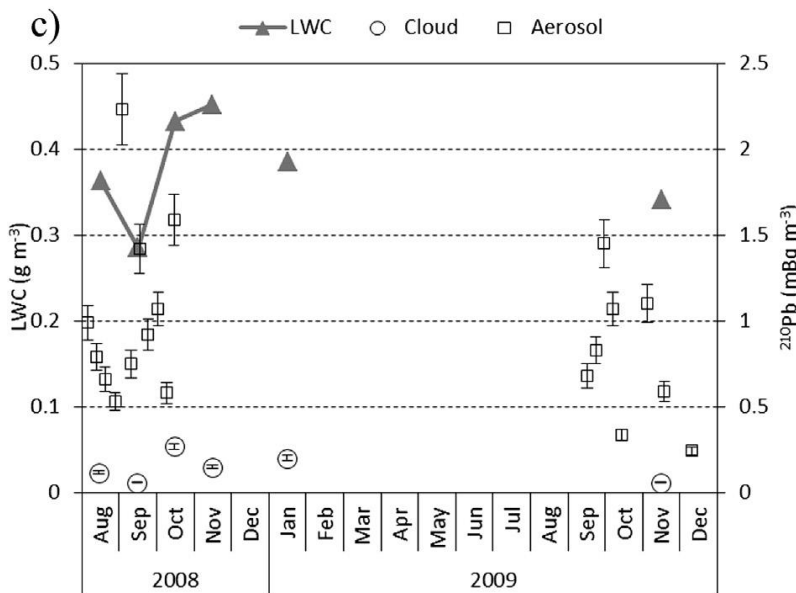
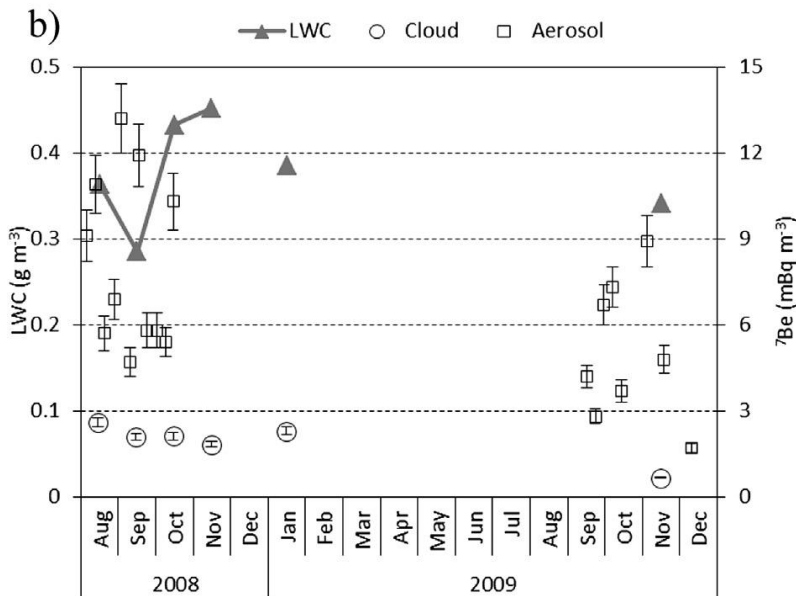


LWC: Liquid Water Content of the cloud

Εικόνα 3.17

Μηνιαία συγκέντρωση νερού στα νέφη και εβδομαδιαία συγκέντρωση σωματιδίων αεροζόλ (δεξιάς άξονας) και μηνιαία περιεκτικότητα υγρού νερού (LWC) (αριστερός άξονας) για τα ισότοπα:

- a) ^{137}Cs ,
- b) ^7Be ,
- c) ^{210}Pb .



● Η δειγματοληψία του νερού των νεφών πραγματοποιήθηκε στο ryu de Dome (~ 45° N, 3° E) της Γαλλίας, σε υψόμετρο 1465 m asl για τη χρονική περίοδο 8 μηνών (2008-2009).

● Οι πολύ μικρές συγκεντρώσεις ^{137}Cs είναι αντιπροσωπευτικές του μεγάλου χρονικού διαστήματος (~23 έτη) που μεσολάβησε από την απελευθέρωση ^{137}Cs λόγω του πυρηνικού ατυχήματος στο Chernobyl (Απρίλιος 1986) και της δειγματοληψίας.

➤ Μια παρατηρούμενη μεγαλύτερη διαφορά στη συγκέντρωση ραδιενέργειας των ^{137}Cs , ^7Be και ^{210}Pb στο αεροζόλ, σε σχέση με αυτή στο νερό των νεφών, μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι έλαβε χώρα άφιξη αερίων μαζών με υψηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας. Πράγματι, στο ryu de Dome, Γαλλία, συνέβη άφιξη: ηπειρωτικών αερίων μαζών (17/09/08) και σκόνης από την έρημο (18/10/08)

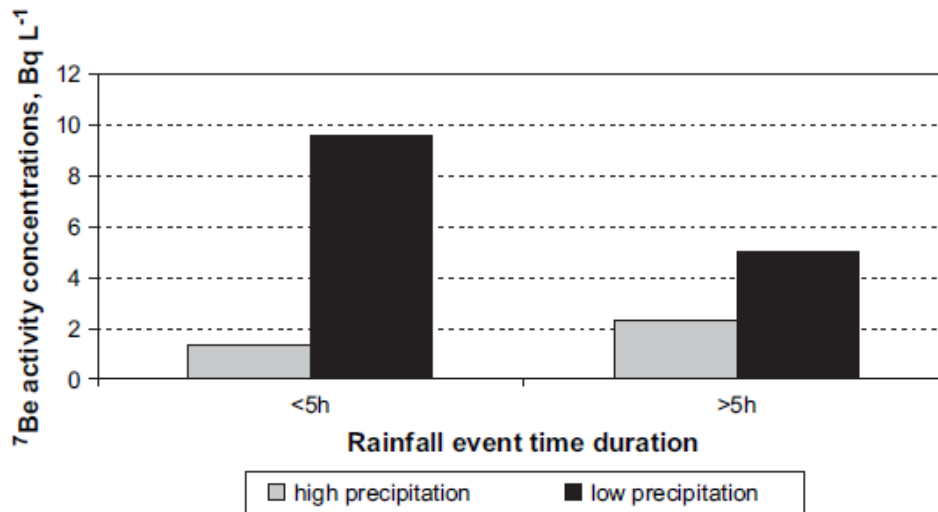
Bourcier et al. (2014)

3.4.2 Παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η συγκέντρωση ραδιενέργειας των ισοτόπων: ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^{137}Cs στο νερό της βροχής

Η συγκέντρωση ραδιενέργειας (Bq L^{-1}) των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στο νερό της βροχής εξαρτάται από (i) τη **χρονική διάρκεια της βροχόπτωσης** και (ii) τον **ρυθμό κατακρήμνισης** (mm h^{-1}). Έχει βρεθεί ότι οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ελάχιστα σχετίζονται με τον όγκο των βροχοπτώσεων και φαίνεται να είναι ανεξάρτητες από την έντασή τους (Wallbring and Murray, 1994, Ayub et al., 2009). Εντούτοις, περιστατικά χαμηλών βροχοπτώσεων επιδεικνύουν υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας (Caillet et al., 2001). Γενικά, το νερό της βροχής που προέρχεται από περιστατικά βροχοπτώσεων *μικρής χρονικής διάρκειας* και *χαμηλού ρυθμού κατακρήμνισης* παρουσιάζει τις *υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας*. Αυτή η διαπίστωση επισημαίνεται σε αρκετές μελέτες που έχουν ασχοληθεί με τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του μηχανισμού της σάρωσης από την κατακρήμνιση (scavenging by precipitation) ραδιενεργών ισοτόπων.

- Ένα παράδειγμα αποτελεί η μελέτη που διεξήχθη στη Θεσσαλονίκη ($\sim 40^\circ\text{N}$, 23°E) καλύπτοντας μια δετή χρονική περίοδο (1987-1992) (Ioannidou and Papastefanou, 2006), η οποία κατέδειξε ότι όταν ο ρυθμός κατακρήμνισης μειώνεται, οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ^7Be και ^{137}Cs αυξάνονται. Επιπλέον, από την ταξινόμηση των δειγμάτων του βρόχινου νερού σε δύο ομάδες: δείγματα προερχόμενα από βροχοπτώσεις μικρής χρονικής διάρκειας ($<5\text{h}$) και δείγματα προερχόμενα από βροχοπτώσεις μεγάλης διάρκειας ($>5\text{h}$), προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα (Εικόνα 3.18):

- Για περιστατικά βροχοπτώσεων *ίδιας χρονικής διάρκειας*, τα δείγματα του βρόχινου νερού των ηπιότερων βροχοπτώσεων παρουσιάζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be και ^{137}Cs σε αντίθεση με τα δείγματα των έντονων βροχοπτώσεων.
- Για περιστατικά βροχοπτώσεων *μικρής χρονικής διάρκειας* ($<5\text{h}$) και ήπιας έντασης, τα δείγματα του βρόχινου νερού χαρακτηρίζονται από σχεδόν 5 φορές υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be σε αντίθεση με τα δείγματα βροχοπτώσεων ίδιας διάρκειας, αλλά έντονης βροχόπτωσης. Για το ^{137}Cs , ο παράγοντας αυτός είναι ακόμη μεγαλύτερος.
- Για περιστατικά βροχοπτώσεων *μεγάλης χρονικής διάρκειας* ($>5\text{h}$) και ήπιας έντασης, τα δείγματα του βρόχινου νερού χαρακτηρίζονται από σχεδόν 2 φορές υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be σε αντίθεση με τα δείγματα βροχοπτώσεων ίδιας διάρκειας, αλλά έντονης βροχόπτωσης. Για το ^{137}Cs , ο παράγοντας αυτός είναι ακόμη μεγαλύτερος.
- Για περιστατικά ήπιων βροχοπτώσεων, η συγκέντρωση ραδιενέργειας του ^7Be μειώνεται σημαντικά (σχεδόν στη μισή τιμή) όταν η διάρκεια αυξάνεται.
- Για περιστατικά έντονων βροχοπτώσεων, η συγκέντρωση ραδιενέργειας του ^7Be αυξάνεται ελαφρώς όταν η διάρκεια αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι ένα περιστατικό βροχόπτωσης υψηλού ρυθμού κατακρήμνισης δεν «καθαρίζει» την ατμόσφαιρα αποτελεσματικά και υπάρχει αρκετό ^7Be για να απομακρυνθεί στις επόμενες ώρες του περιστατικού βροχόπτωσης.



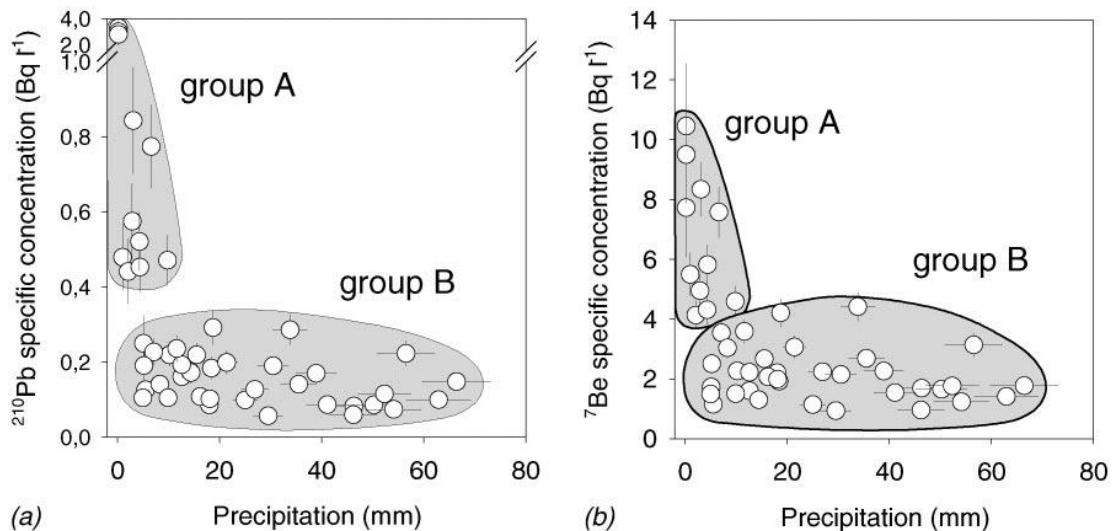
Εικόνα 3.18

Συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ⁷Be στο νερό της βροχής για περιστατικά βροχοπτώσεων διαφορετικών υψών και χρονικών διαρκειών. Οι μετρήσεις αφορούν στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (~ 40°N, 23°E) για την δετή χρονική περίοδο 1987-1992. (Ioannidou and Papastefanou, 2006)

Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να ερμηνευθούν ως εξής:

- ✓ Οι χαμηλοί ρυθμοί κατακρήμνισης (ψιγάλες) συνοδεύονται από πολύ μικρές σταγόνες βροχής, οι οποίες έχουν πολύ μεγαλύτερο εμβαδό επιφάνειας, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη απομάκρυνση και των ⁷Be και ¹³⁷Cs από την ατμόσφαιρα.
- ✓ Οι μεγάλες σταγόνες βροχής δεν είναι πυκνά συγκεντρωμένες, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις των ⁷Be και ¹³⁷Cs στο νερό της βροχής να είναι σχετικά χαμηλές.
- ✓ Επιπλέον, μικρές ποσότητες βροχής συνοδεύονται από υψηλούς ρυθμούς εξάτμισης των σταγόνων, λόγω της χαμηλής υγρασίας κάτω από τη νεφοκάλυψη, με αποτέλεσμα αυτές οι σταγόνες της βροχής να είναι εμπλουτισμένες με ραδιενεργά ισότοπα.

- Παρόμοιες διαπιστώσεις προέκυψαν και από μελέτη που διεξήχθη στην περιοχή Versoix (~46°N, 6°E) ανατολικά της Γενεύης, Ελβετία, καλύπτοντας χρονική διάρκεια ενός έτους (3/11/1997 - 2/11/1998) (Caillet et al., 2001). Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ⁷Be και ²¹⁰Pb_{ex} παρατηρήθηκαν για χαμηλότερη βροχόπτωση (Εικόνα 3.19, group A), ενώ με την αύξηση της βροχόπτωσης, οι συγκεντρώσεις μειώνονταν γρήγορα (Εικόνα 3.19, group B). Οι υψηλές συγκεντρώσεις, που παρατηρήθηκαν σε χαμηλή βροχόπτωση (group A), δείχνουν την υπεροχή του μηχανισμού απόπλυσης (washout). Με εντονότερες βροχοπτώσεις, η χαμηλότερη ατμόσφαιρα έχει αποπλυθεί γρήγορα και η σημαντικότητα του μηχανισμού απόπλυσης (washout) έναντι του μηχανισμού βροχόπλυσης (rainout) γίνεται αμελητέα (group B). Παρατηρείται, τότε, ότι το εύρος των συγκεντρώσεων των ²¹⁰Pb_{ex} και ⁷Be γίνεται στενότερο.



Εικόνα 3.19

(a) Συγκέντρωση ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ συναρτήσει του μεγέθους της βροχόπτωσης.

(b) Συγκέντρωση ραδιενέργειας του ^7Be συναρτήσει του μεγέθους της βροχόπτωσης.

Παρατηρούνται υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας για χαμηλές βροχοπτώσεις (**group A**), ενώ με την αύξηση της βροχόπτωσης οι συγκεντρώσεις μειώνονται γρήγορα (**group B**).

Οι μετρήσεις αφορούν στην περιοχή Versoix (~ 46°N, 6°E) ανατολικά της Γενεύης, Ελβετία, για τη χρονική περίοδο ενός έτους (3/11/1997 - 2/11/1998). (Cailliet et al., 2001)

3.4.3 Μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^{137}Cs κατά τη διάρκεια ενός περιστατικού βροχόπτωσης

Οι Ishikawa et al. (1995) αναφέρουν μια εκθετική μείωση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας $C(t)$ των ραδιενεργών ισοτόπων στο νερό της βροχής κατά τη διάρκεια ενός περιστατικού βροχόπτωσης:

$$C(t) = \alpha \cdot e^{-k \cdot t} + b \quad (3.6)$$

όπου α , k και b είναι σταθερές και t είναι ο χρόνος από την έναρξη της βροχόπτωσης.

Η παραπάνω σχέση καταδεικνύει τους δύο μηχανισμούς, τους οποίους περιλαμβάνει η διεργασία της υγρής εναπόθεσης (*wet deposition*):

- (i) Ο εκθετικός όρος της (3.6) είναι ο επικρατέστερος όταν ο χρόνος είναι μικρός, δηλαδή στην όταν αρχίζει η βροχόπτωση. Εκφράζει τη διεργασία της απόπλυσης (*washout*), η οποία, όπως αναφέρθηκε, επιτυγχάνεται μέσω της σάρωσης από την κατακρήμνιση (*scavenging by precipitation*) των προσκολλημένων στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ ραδιενεργών ισοτόπων που απαντώνται κάτω από τα σύννεφα.
- (ii) Ο σταθερός όρος της (3.6) γίνεται κυρίαρχος όταν ο χρόνος αυξάνεται, δηλαδή κατά την εξέλιξη της βροχόπτωσης, μέσω του μηχανισμού της βροχόπλυσης (*rainout*) από την συμπύκνωση, που έχει συμβεί μέσα στα σύννεφα δημιουργώντας σταγόνες βροχής.

Από πειραματικά δεδομένα σχετικών μελετών, έχει διαπιστωθεί ότι η βροχή απομακρύνει προοδευτικά τα ραδιενεργά ισότοπα από την ατμόσφαιρα και/ή τα σύννεφα και ότι η απόδοση του μηχανισμού της σάρωσης από την κατακρήμνιση (*scavenging by precipitation*) μειώνεται κατά τη διάρκεια ενός περιστατικού βροχόπτωσης. Το ίδιο ισχύει και για τα περιστατικά χιονόπτωσης (Ishikawa et al., 1995). Σε σχετικές μελέτες, η εκθετική μείωση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας ορισμένων ραδιενεργών ισωτόπων (όπως των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) παρουσιάζεται είτε συναρτήσει του χρόνου (σχέση 3.7, Εικόνα 3.20, Ioannidou and Papastefanou, 2006) είτε συναρτήσει του αθροιστικού ύψους βροχόπτωσης (σχέση 3.8, Εικόνα 3.21.a, Gourdin et al., 2014):

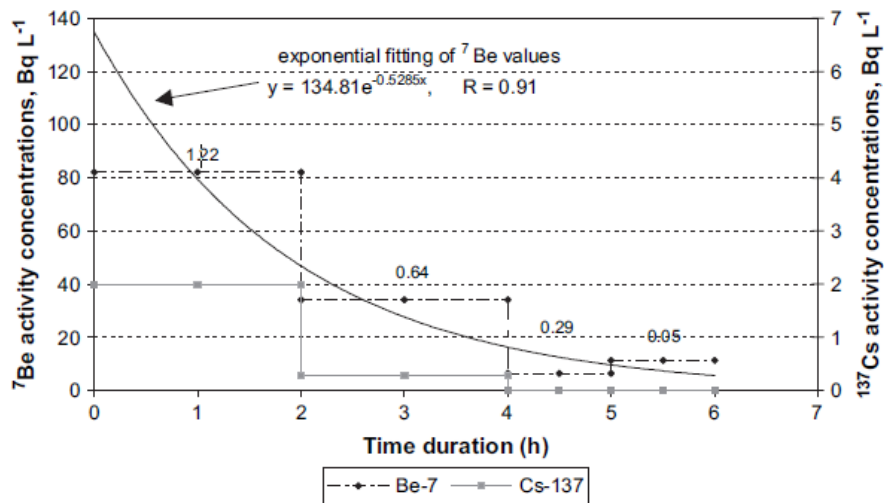
$$C_t = C_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad (3.7)$$

όπου:

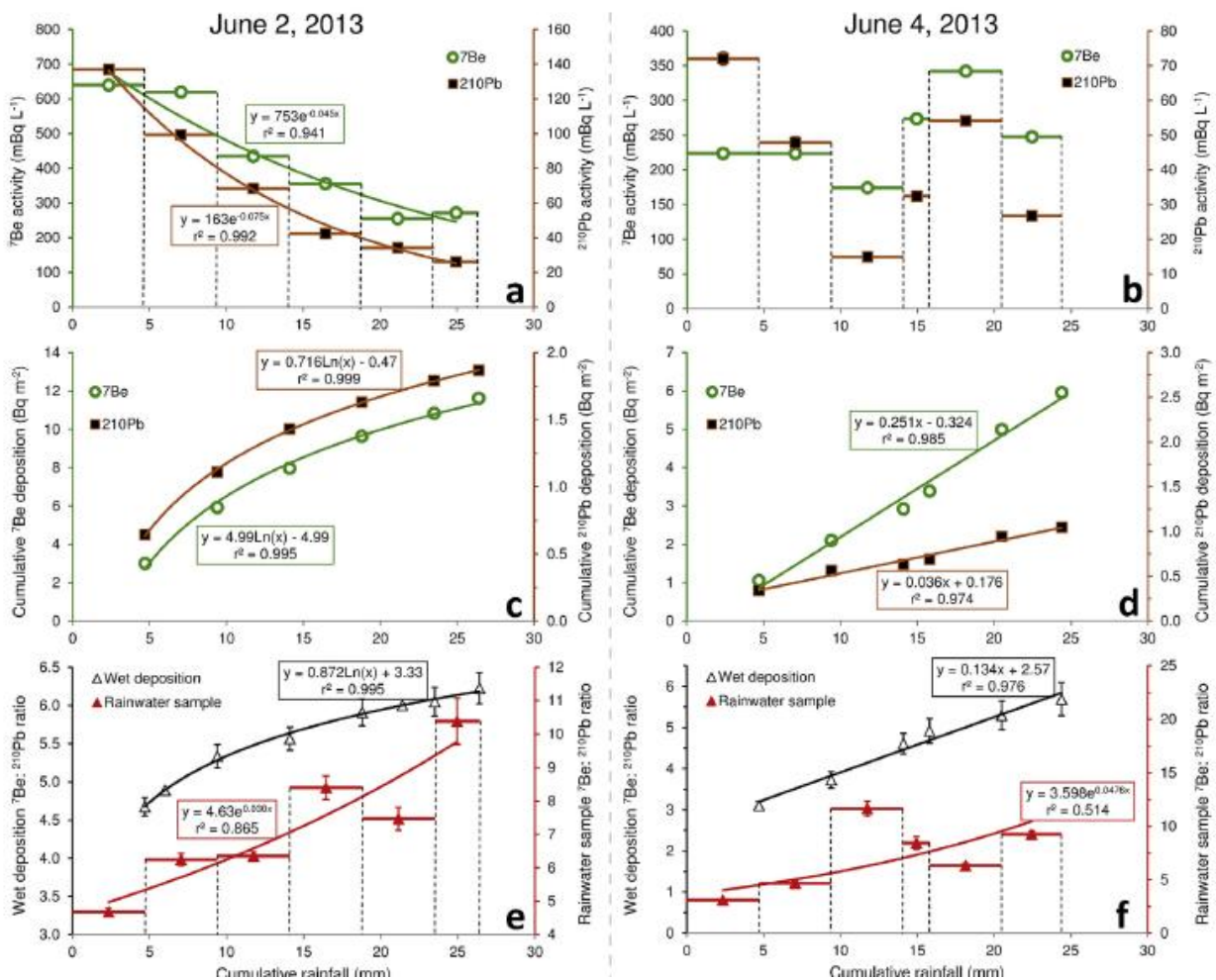
$$C_x = C_0 \cdot e^{-k \cdot x} \quad (3.8)$$

- $C_{t,x}$: η συγκέντρωση ραδιενέργειας του υπό μελέτη ραδιενεργού ισωτόπου στο νερό της βροχής (Bq L^{-1} ή mBq L^{-1}),
- C_0 : η αρχική συγκέντρωση ραδιενέργειας του υπό μελέτη ραδιενεργού ισωτόπου στο νερό της βροχής (Bq L^{-1} ή mBq L^{-1}),
- k : η σταθερά απομάκρυνσης του υπό μελέτη ραδιενεργού ισωτόπου λόγω της βροχόπτωσης (h^{-1}),
- t : η χρονική διάρκεια από την έναρξη του περιστατικού βροχόπτωσης (h),
- x : το αθροιστικό ύψος βροχόπτωσης (mm).

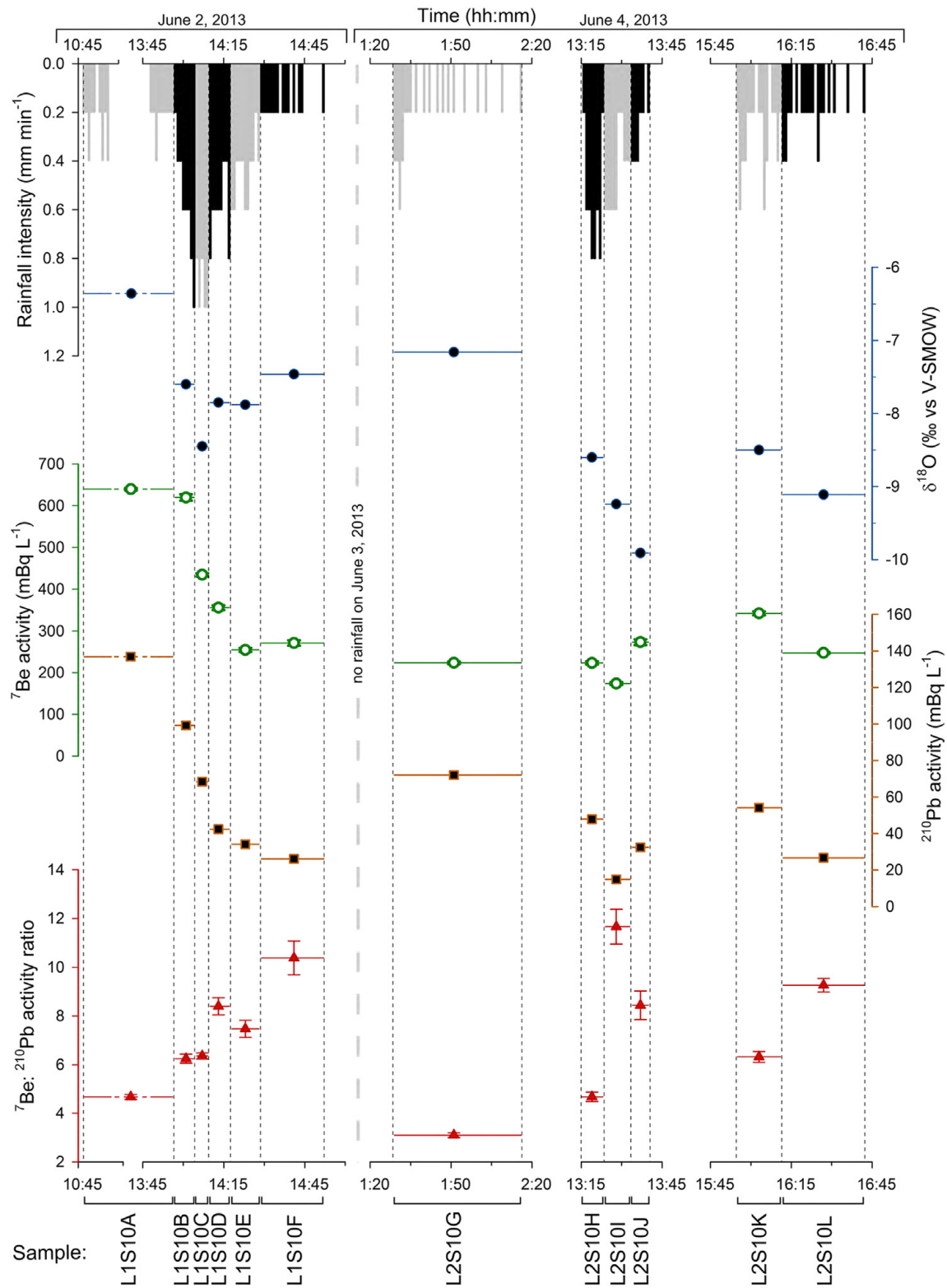
- Από σχετική μελέτη (Ioannidou and Papastefanou, 2006), η οποία διεξήχθη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (περιοχή με σχετικά ξηρό, χωρίς πολλές βροχοπτώσεις, κλίμα) κατά την περίοδο 1987-1992, διαπιστώθηκε ότι οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ^7Be για ένα μεμονωμένο περιστατικό βροχόπτωσης μειώθηκαν κατά 2,5-3 φορές μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου τμήματος της χρονικής διάρκειας του περιστατικού και, αντίστοιχα, οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ^{137}Cs μειώθηκαν κατά 3-7 φορές (Εικόνα 3.20). Οι διαπιστώσεις αυτές υποδηλώνουν ότι οι σταγόνες της βροχής απομακρύνουν τη μεγαλύτερη ποσότητα ^7Be και ^{137}Cs κατά το πρώτο τμήμα της χρονικής διάρκειας (π.χ. κατά τις δύο πρώτες ώρες) του περιστατικού βροχόπτωσης, και κάθε επιπρόσθετη αύξηση του ύψους βροχόπτωσης δεν επιφέρει περαιτέρω αύξηση στις συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ραδιενεργών ισωτόπων στο νερό της βροχής.
- Μια πιο πρόσφατη μελέτη (Gourdin et al., 2014), η οποία διεξήχθη στην ορεινή περιοχή Houay Xon στο βόρειο Λάος (περιοχή που χαρακτηρίζεται από κλίμα καλοκαιρινών μουσώνων, με πάνω από το 80% των βροχοπτώσεων να λαμβάνει χώρα μεταξύ των μηνών Μάιο έως Οκτώβριο), συμφωνεί με τις παραπάνω διαπιστώσεις. Πράγματι, από τα δείγματα βρόχινου νερού, που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια μεμονωμένων καταιγίδων στις αρχές των μουσώνων (Ιούνιος 2013), διαπιστώθηκε ότι τα πρώτα mm της βροχόπτωσης ήταν εκείνα που παρουσίασαν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, οι οποίες σταδιακά μειώνονταν καθώς τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα απομακρύνονταν από την ατμόσφαιρα λόγω της σάρωσης από τη βροχή (Εικόνες 3.21 a,b και 3.22).



Εικόνα 3.20 Κόμανση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των ^7Be και ^{137}Cs κατά τη διάρκεια ενός περιστατικού βροχόπτωσης στην περιοχή της Θεσσαλονίκης ($\sim 40^\circ\text{N}$, 23°E). Οι αριθμοί δηλώνουν τον ρυθμό κατακρήμνισης (mm h^{-1}). (Ioannidou and Papastefanou, 2006)



Εικόνα 3.21 Πειραματικά δεδομένα για το ^7Be και τον $^{210}\text{Pb}_{ex}$, τα οποία προέκυψαν από δείγματα βρόχινου νερού που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια μεμονωμένων καταιγίδων στο χρονικό διάστημα από 2-4 Ιουνίου 2013, στο βόρειο Λάος. (Gourdin et al., 2014)



Εικόνα 3.22

Πειραματικά δεδομένα για το ${}^7\text{Be}$ και τον ${}^{210}\text{Pb}_{ex}$, τα οποία προέκυψαν από τα δείγματα βρόχινου νερού που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια μεμονωμένων καταιγίδων στο χρονικό διάστημα από 2-4 Ιουνίου 2013, στο βόρειο Λάος. (Gourdin et al., 2014)

3.4.4 Επίδραση του είδους κατακρήμνισης στην απόδοση του μηχανισμού σάρωσης από την ατμόσφαιρα των ραδιενεργών ισοτόπων ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{137}Cs

Ο μηχανισμός της σάρωσης από την κατακρήμνιση (scavenging by precipitation) των ^7Be και ^{137}Cs εξαρτάται από τον τύπο της κατακρήμνισης, δηλαδή εάν πρόκειται για βροχόπτωση ή για χιονόπτωση. Τα περιστατικά χιονόπτωσης είναι πιο αποδοτικά ως προς τη σάρωση των ^7Be και ^{137}Cs σε σχέση με περιστατικά βροχόπτωσης του ίδιου ρυθμού κατακρήμνισης (Ioannidou and Papastefanou, 2006). Αυτό συμβαίνει διότι στις χιονονιφάδες παρατηρούνται μεγάλες συγκεντρώσεις σωματιδίων Aitken⁽⁹⁾ (διαμέτρων $< 0,02\mu\text{m}$), οπότε το εμβαδό της επιφάνειάς τους είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό των σταγόνων βροχής ίδιας μάζας. Έτσι, οι χιονονιφάδες αποτελούν πιο αποδοτικούς σαρωτές των σωματιδίων που σχετίζονται με ραδιενεργά ισότοπα. Επιπλέον, λόγω της μικρής τους πυκνότητας ($0,1\text{g cm}^{-3}$), οι χιονονιφάδες περιφέρονται από τον αέρα με αποτέλεσμα να σαρώνουν περισσότερα σωματίδια σε σχέση με τις σταγόνες της βροχής.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η αποτελεσματικότητα του μηχανισμού της σάρωσης από την κατακρήμνιση δεν είναι ίδια για όλα τα ραδιενεργά ισότοπα (Ioannidou and Papastefanou, 2006). Τα περιστατικά χιονόπτωσης ήταν σχεδόν 3 φορές πιο αποδοτικά ως προς την εναπόθεση του ^{137}Cs σε σχέση με το ^7Be . Παρόμοια ήταν και η διαπίστωση για τα περιστατικά βροχόπτωσης. Οι βροχοπτώσεις «καθάρισαν» την ατμόσφαιρα από το ^{137}Cs πιο αποτελεσματικά (1,3-2,4 φορές περισσότερο) σε σχέση με το ^7Be . Οι παραπάνω διαπιστώσεις ερμηνεύονται από το γεγονός ότι το ^{137}Cs σχετίζεται με μεγαλύτερα ατμοσφαιρικά σωματίδια σε σχέση με το ^7Be (Papastefanou et al., 1995).

Τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα του χιονιού, σε σχέση με τη βροχή, να απομακρύνει τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ από την ατμόσφαιρα διαπίστωσαν οι McNeary and Baskaran (2003).

3.5 Συγκεντρώσεις των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Σε διαφορετικές τοποθεσίες, για κάθε ραδιενεργό ισότοπο παρατηρούνται διαφορές στις τιμές των συγκεντρώσεων του στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα, οι οποίες συνήθως οφείλονται σε συνδυασμό πολλών παραγόντων. Σε γενικές γραμμές, για να ερμηνεύσουμε τις μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές των συγκεντρώσεων ενός ραδιενεργού ισοτόπου σε διαφορετικούς τόπους, θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη κυρίως:

- το γεωγραφικό πλάτος του κάθε τόπου, όταν πρόκειται για τα ραδιενεργά ισότοπα κοσμικής προέλευσης ^7Be , ^{10}Be και ^{22}Na ,
- τη γεωγραφική θέση του κάθε τόπου (δηλ., αν είναι ηπειρωτική ή θαλάσσια περιοχή) και αντίστοιχα την προέλευση των αερίων μαζών (χερσαίες ή θαλάσσιες), όταν πρόκειται για το ραδιενεργό γεωγενές ισότοπο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$,
- τη διεργασία της επαναιώρησης, όταν πρόκειται για το ραδιενεργό ισότοπο ανθρωπογενούς προέλευσης ^{137}Cs , του οποίου η παραγωγή έχει πλέον σταματήσει.

⁽⁹⁾ Βλ. Παράρτημα Γ.6

3.5.1 Εύρος τιμών των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

- Οι τιμές των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be που μετριοούνται στον επιφανειακό αέρα είναι της τάξεως των λίγων mBq m^{-3} , όπως έχει διαπιστωθεί από μετρήσεις σε διάφορες περιοχές παγκοσμίως (πίνακας Εικόνας 3.23).

Εικόνα 3.23

Πίνακας με το εύρος τιμών των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be που έχουν μετρηθεί στον επιφανειακό αέρα διαφόρων περιοχών παγκοσμίως.

Συγκέντρωση ραδιενέργειας ^7Be (mBq m^{-3})	Περιοχή	Γεωγραφικές συντεταγμένες	Αναφορές
0,2 - 14,9	Kuwait	~ 29°N, 47°E	Al-Azmi et al., 2001
2,5 - 14,9	Malaga, Spain	~ 36°N, 4°W	Duenas et al., 2009
0,47 - 12,7	Thessaloniki, Greece	~ 40°N, 23°E	Ioannidou et al., 2005
2,4 - 4,7	Barcelona, Spain	~ 41°N, 2°E	Valles et al., 2009
1,5 - 9,8	Detroit, Michigan	~ 42°N, 83°W	McNeary and Baskaran, 2003
0,93 - 13,1	Monaco	~ 44°N, 7°E	Pham et al., 2011
0,6 - 18,3	Belgrade, Serbia	~ 44°N, 20°E	Todorovic et al., 1999, 2005
1,27 - 8,47	Krakow, Poland	~ 50°N, 20°E	Blazej and Mietelski, 2014
0,63 - 6,54	Edinburgh, UK	~ 56°N, 3°W	Likuku, 2006
0,5 - 9,0	Uppsala, Sweden	~ 60°N, 17°E	Aldahan et al., 2001
4,7 - 27,0	south-eastern Australia	~ 35°S, 149°E	Wallbrink and Murray, 1994

Η συγκέντρωση ^7Be στον αέρα στην Πολυτεχνειούπολη (~38°N, 23°E) Ζωγράφου κυμαίνεται περί τα **4-9 mBq m^{-3}** (Αναγνωστάκης Μ.Ι., διαφάνειες μαθήματος: «Ραδιοπεριβαλλοντική Ανάλυση και Προστασία»).

- Καθώς η συγκέντρωση του ^{22}Na στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα είναι πολύ μικρή, οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειάς του είναι πολύ χαμηλές, περίπου τέσσερις τάξεις μεγέθους μικρότερες από αυτές του ^7Be (πίνακας Εικόνας 3.24). Έτσι, οι βιβλιογραφικές αναφορές των τιμών των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^{22}Na στον αέρα είναι πολύ λιγότερες από αυτές του ^7Be εξαιτίας των περιορισμών που παρουσιάζει η ανίχνευσή του (§2.4.1)

Εικόνα 3.24

Πίνακας με το εύρος τιμών των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^{22}Na που έχουν μετρηθεί στον επιφανειακό αέρα διαφόρων περιοχών της Ευρώπης.

Συγκέντρωση ραδιενέργειας ^{22}Na ($\mu\text{Bq m}^{-3}$)	Περιοχή	Γεωγραφικές Συντεταγμένες	Αναφορές
0,2 - 0,5	5 locations, Switzerland	~ 46-48°N, 6-9°E	Steinmann et al., 1013
0,1 - 0,75	Krakow, Poland	~ 50°N, 20°E	Blazej and Mietelski, 2014
0,28 - 0,35	4 stations, Finland	~ 65-68°N, 26-28°E	Leppanen et al., 2012

3.5.2 Εύρος τιμών των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^{137}Cs στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Οι τιμές της συγκέντρωσης ^{137}Cs στον επιφανειακό αέρα επηρεάζονται κυρίως από την **επαναιώρηση** σωματιδίων από το έδαφος. Παραθέτουμε ενδεικτικά μερικές τιμές των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^{137}Cs σε χώρες της Ευρώπης, όπως έχουν καταγραφεί σε σχετικές μελέτες (πίνακας Εικόνας 3.25),

Εικόνα 3.25

Πίνακας με το εύρος τιμών των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^{137}Cs που έχουν μετρηθεί στον επιφανειακό αέρα διαφόρων περιοχών της Ευρώπης.

Συγκέντρωση ραδιενέργειας ^{137}Cs ($\mu\text{Bq m}^{-3}$)	Χώρα	Αναφορές
1,2 - 9,2	Poland	Blazej and Mietelski, 2014
0,1 - 7,4	Monaco	Pham et al., 2011
0,36 - 2,2	Denmark	Fogh et al., 1999
5,0 - 85	Serbia	Todorovic et al., 1999
2,8 - 133	Germany	Rosner et al., 1996

3.5.3 Εύρος τιμών των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

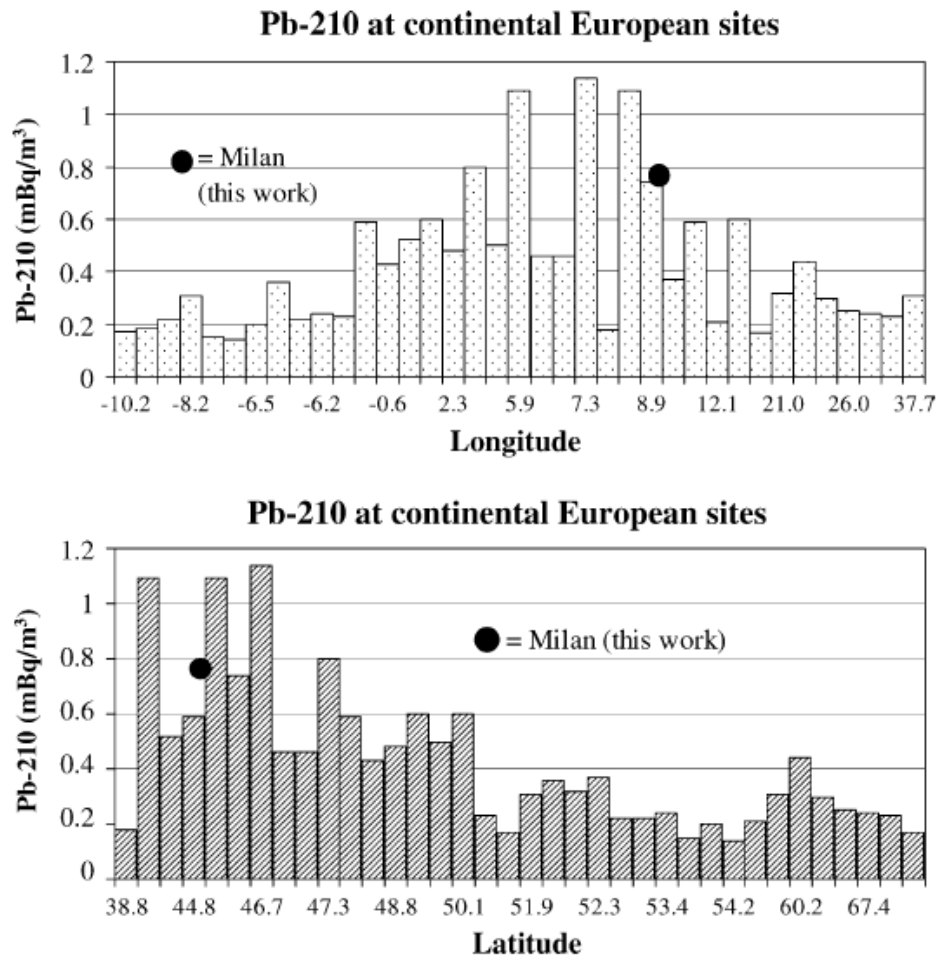
Οι τιμές των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, που μετριοούνται στον επιφανειακό αέρα, είναι συνήθως μικρότερες από 1 mBq m^{-3} , όπως έχει διαπιστωθεί από μετρήσεις σε διάφορες περιοχές παγκοσμίως (πίνακας Εικόνας 3.26). Η χωρική κύμανση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή ηπείρων - ωκεανών (βλ. § 3.7.5).

Εικόνα 3.26

Πίνακας με το εύρος τιμών των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ που έχουν μετρηθεί στον επιφανειακό αέρα διαφόρων περιοχών παγκοσμίως.

Συγκέντρωση ραδιενέργειας $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (mBq m^{-3})	Περιοχή	Γεωγραφική θέση	Αναφορές
0,01 - 0,74	Edinburgh, UK	παραθαλάσσια	Likuku, 2006
0,036 - 0,524	Lisbon, Portugal	παραθαλάσσια	Carvalho, 1995
0,15 - 0,70	Barcelona, Spain	παραθαλάσσια	Valles et al., 2009
0,24 - 1,44	Malaga, Spain	παραθαλάσσια	Duenas et al., 2009
0,11 - 1,98	Thessaloniki, Greece	παραθαλάσσια	Ioannidou et al., 2005
0,22 - 2,82	Monaco	παραθαλάσσια	Pham et al., 2011
0,17 - 1,85	Lodz, Poland	ηπειρωτική	Dlugosz et al., 2010
0,17 - 2,20	Milan, Italy	ηπειρωτική	Vecchi et al., 2005
0,11 - 3,09	Belgrade, Serbia	ηπειρωτική	Todorovic et al., 2000, 2005
0,30 - 4,22	Detroit, Michigan	ηπειρωτική	McNeary and Baskaran, 2003

Επίσης, οι μετρούμενες τιμές της συγκέντρωσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ για τα διάφορα γεωγραφικά μήκη και πλάτη φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 3.27

Ετήσιες μέσες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε ηπειρωτικές τοποθεσίες της Ευρώπης σύμφωνα με το γεωγραφικό (α) μήκος και (β) πλάτος [τα δεδομένα είναι από: http://www-lgge.obs.ujf-grenoble.fr/axes/radioactivite/Pb210_database/]. (Vecchi et al., 2005)

3.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Η συγκέντρωση των ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης εξαρτάται από την ηλιακή δραστηριότητα, το ύψος της τροπόπαυσης, την αναδίπλωση της τροπόπαυσης, το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο. Στη συνέχεια, θα μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο καθένας από τους παράγοντες αυτούς επιδρά στις συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ^7Be , καθώς οι σχετικές ερευνητικές μελέτες, που απαντώνται στη βιβλιογραφία, αναφέρονται σ' αυτό.

3.6.1 Εξάρτηση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα από την ηλιακή δραστηριότητα

Οι ρυθμοί παραγωγής των ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης εξαρτώνται από την ηλιακή δραστηριότητα⁽¹⁰⁾. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μέγεθος της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ισοτόπων αυτών στον επιφανειακό αέρα να εξαρτάται από τον 11ετή ηλιακό κύκλο. Η συσχέτιση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be στον επιφανειακό αέρα και της ηλιακής δραστηριότητας έχει μελετηθεί εκτενώς και γίνεται εμφανής στις πολυετείς χρονικές μεταβολές του. Ακολούθως, παραθέτουμε μερικά από τα αποτελέσματα σχετικών μελετών.

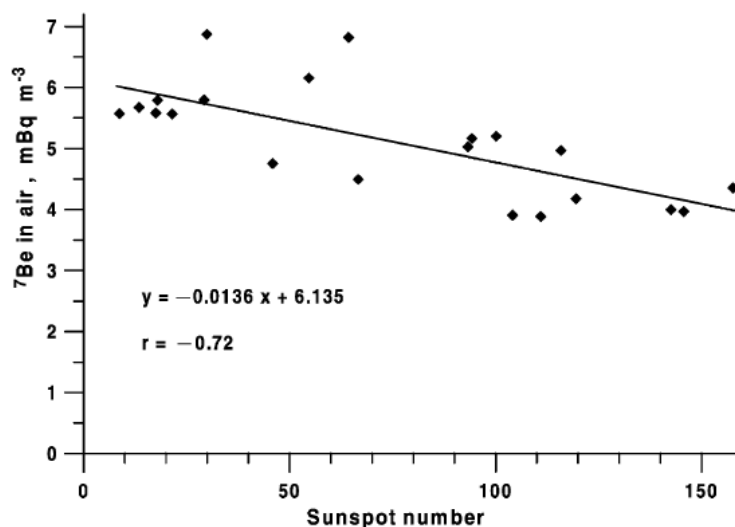
Οι Cannizzaro et al. (2004) βρήκαν αρνητική συσχέτιση ($r = -0,72$) μεταξύ της συγκέντρωσης του ^7Be και τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων στο Παλέρμο της Ιταλίας ($\sim 38^\circ\text{N}$) για χρονική διάρκεια 21 ετών (1982-2002) (Εικόνα 3.28), η οποία συμπεριελάμβανε τον Ηλιακό κύκλο 22 και ένα μέρος του κύκλου 23 (Εικόνες 3.29 και 3.30). Επίσης, οι Ioannidou et al. (2005) βρήκαν αντίστοιχο εύρος 4,2 - 6,1 mBq m^{-3} και $r = -0,81$ για μέσα γεωγραφικά πλάτη ($\sim 40^\circ\text{N}$) στην περιοχή της Θεσσαλονίκης κατά τη διάρκεια των ετών 1987-2001. Η Εικόνα 3.31 παρουσιάζει σχετικά αποτελέσματα για την ίδια περιοχή και για τη χρονική περίοδο 1987-2003 (Papastefanou and Ioannidou, 2004).

Παρόμοια, η Εικόνα 3.32 παρουσιάζει τη μεταβολή της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης ^7Be στον αέρα του Μονακό ($\sim 44^\circ\text{N}$) για τα έτη 1998-2010 (Pham et al., 2011) σε συνδυασμό με τον ετήσιο αριθμό κηλίδων για έναν πλήρη 11ετή κύκλο, και συγκεκριμένα τον Ηλιακό κύκλο 23, με ελάχιστη ηλιακή δραστηριότητα το έτος 2000 και μέγιστη το 2009. Πράγματι, η μέγιστη συγκέντρωση ^7Be το έτος 2009 συμπίπτει με τον ελάχιστο αριθμό κηλίδων ή, αντιστρόφως, η ελάχιστη συγκέντρωση ^7Be το έτος 2000 συμπίπτει με τον μέγιστο αριθμό κηλίδων. Η μέση ετήσια συγκέντρωση του ^7Be κυμάνθηκε από 4,25 έως 8,77 mBq m^{-3} με μια αρνητική συσχέτιση ($r = -0,78$) μεταξύ της συγκέντρωσης του ^7Be και τον αριθμό των κηλίδων. Αντίστοιχη είναι και η Εικόνα 3.33, στην οποία παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης ^7Be στον αέρα 5 τοποθεσιών δειγματοληψίας στην Ελβετία ($46^\circ - 47^\circ\text{N}$) (Steinmann et al., 2013) σε συνδυασμό με τον ετήσιο αριθμό κηλίδων για τη χρονική περίοδο 1994-2011.

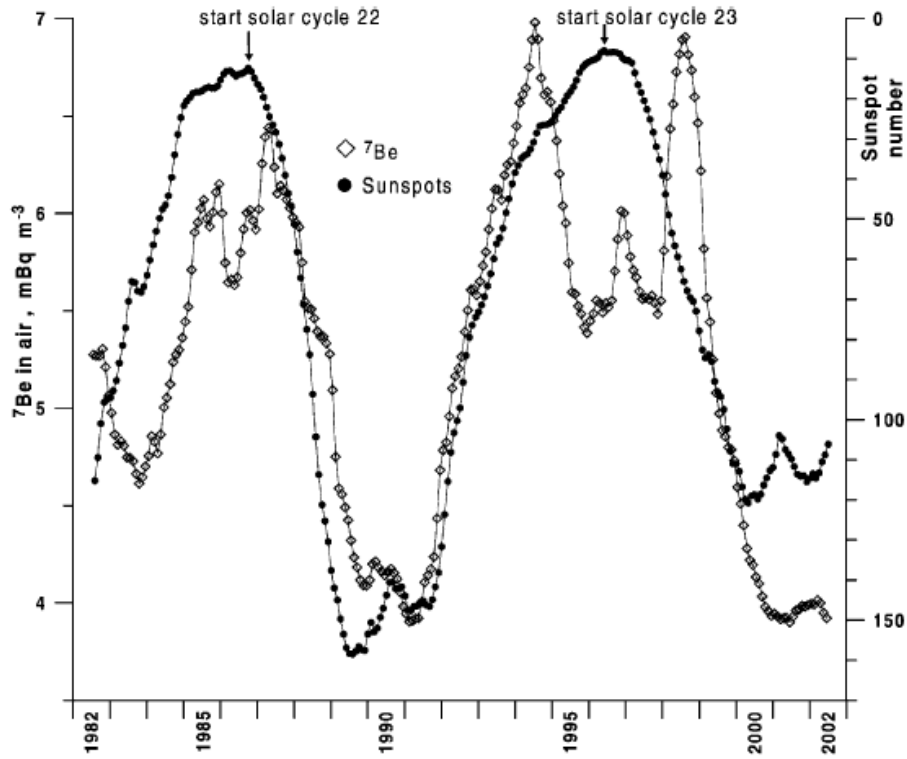
Εικόνα 3.28

Συσχέτιση μεταξύ των μέσων ετησίων συγκεντρώσεων ραδιενέργειας ^7Be στον επιφανειακό αέρα στο Παλέρμο, Ιταλία ($\sim 38^\circ\text{N}$) και του αριθμού των ηλιακών κηλίδων για χρονική διάρκεια 21 ετών (1982-2002).

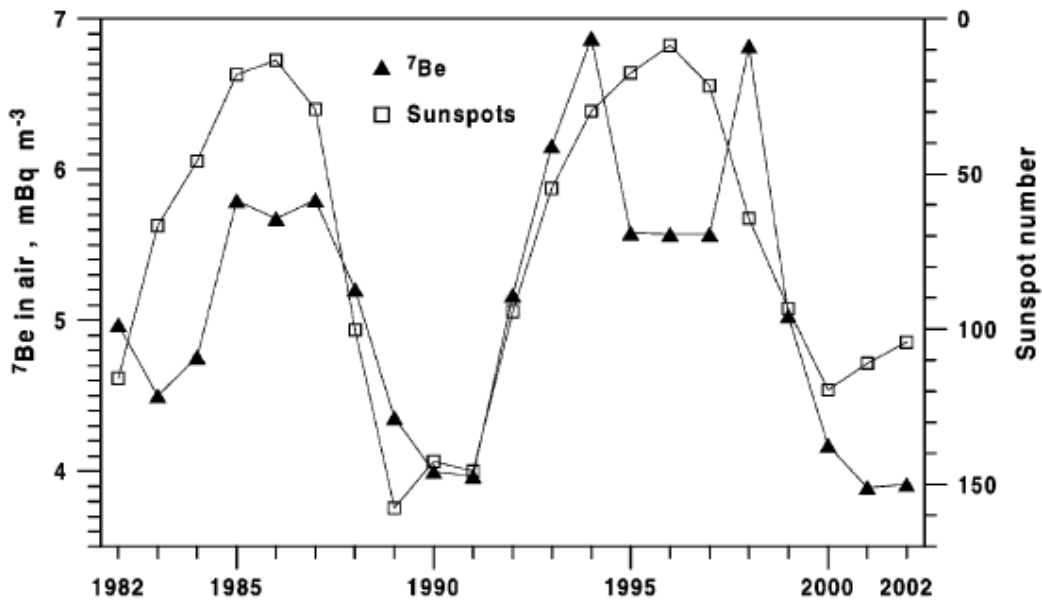
(Cannizzaro et al., 2004)



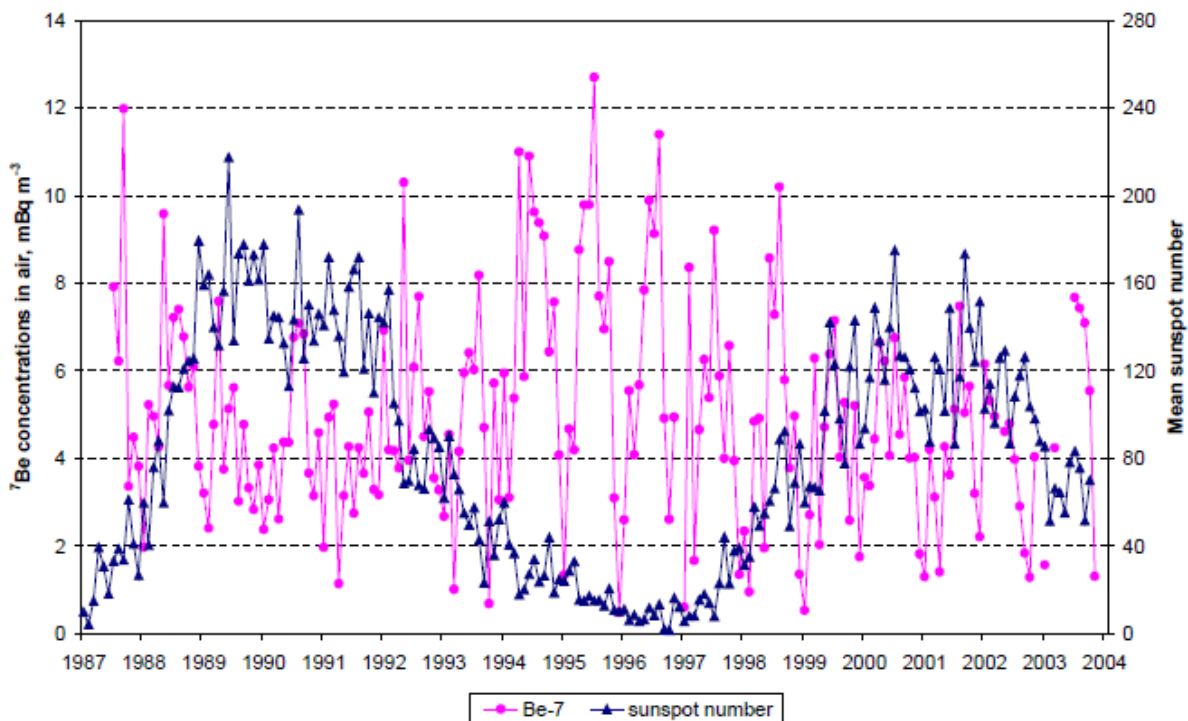
⁽¹⁰⁾ Βλ. Παράρτημα Α και § 2.2.1



Εικόνα 3.29 Μεταβολή των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων ραδιενέργειας ^7Be στον επιφανειακό αέρα στο Παλέρμο, Ιταλία ($\sim 38^\circ\text{N}$) και του αριθμού των ηλιακών κηλίδων (αντίστροφη κλίμακα) για τη χρονική διάρκεια 21 ετών (1982-2002). (Cannizzaro et al., 2004)

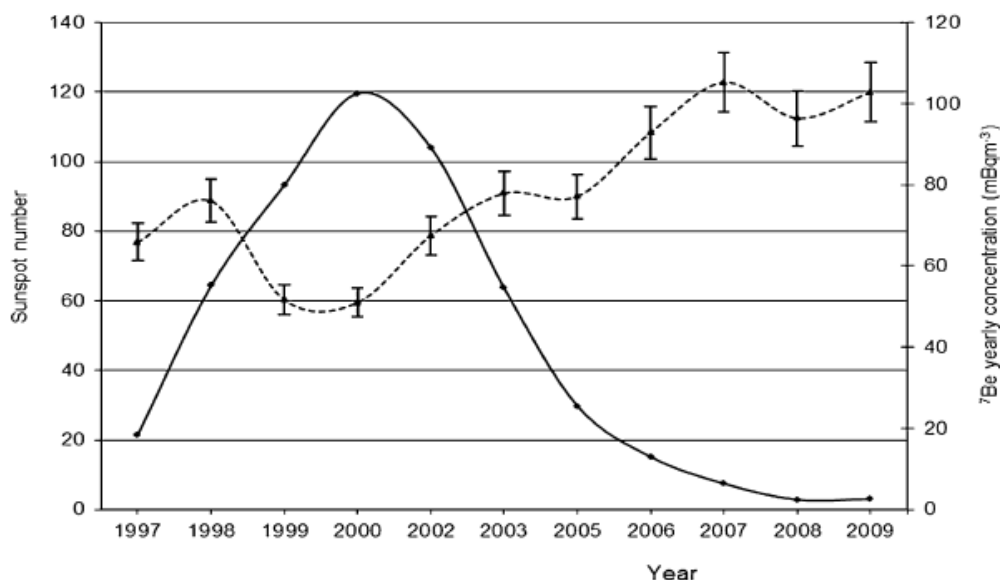


Εικόνα 3.30 Μεταβολή των μέσων ετησίων συγκεντρώσεων ραδιενέργειας ^7Be στον επιφανειακό αέρα του Παλέρμο, Ιταλία ($\sim 38^\circ\text{N}$) και του αριθμού των ηλιακών κηλίδων (αντίστροφη κλίμακα) για τη χρονική διάρκεια 21 ετών (1982-2002). (Cannizzaro et al., 2004)



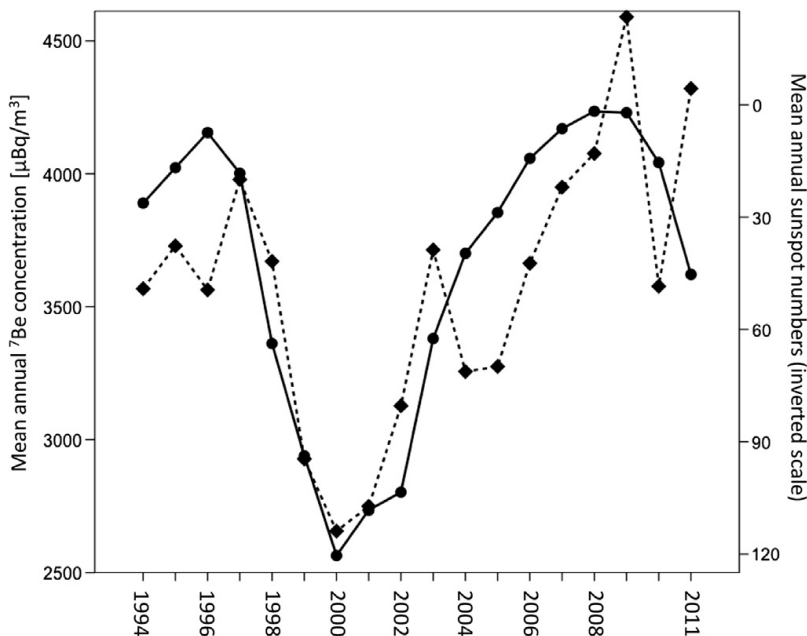
Εικόνα 3.31

Αριθμός ηλιακών κηλίδων και ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ^7Be στη Θεσσαλονίκη ($\sim 40^\circ \text{N}$) για χρονική διάρκεια 17 ετών (1987-2003). (Papastefanou and Ioannidou, 2004)



Εικόνα 3.32

Μεταβολή της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης ^7Be στον επιφανειακό αέρα στο Μονακό ($\sim 44^\circ \text{N}$) (διακεκομμένη γραμμή) με τον αριθμό των κηλίδων (συνεχής γραμμή) για τη χρονική διάρκεια 13 ετών (1998-2010). Να σημειωθεί ότι κάποιες διακομάνσεις που παρατηρούνται στις συγκεντρώσεις του ^7Be οφείλονται ενδεχομένως στον συνδυασμό των εποχιακών και των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών [τα δεδομένα έχουν εξαχθεί από τη βάση δεδομένων SIDC <http://www.sidc.be>]. (Pham et al., 2011)

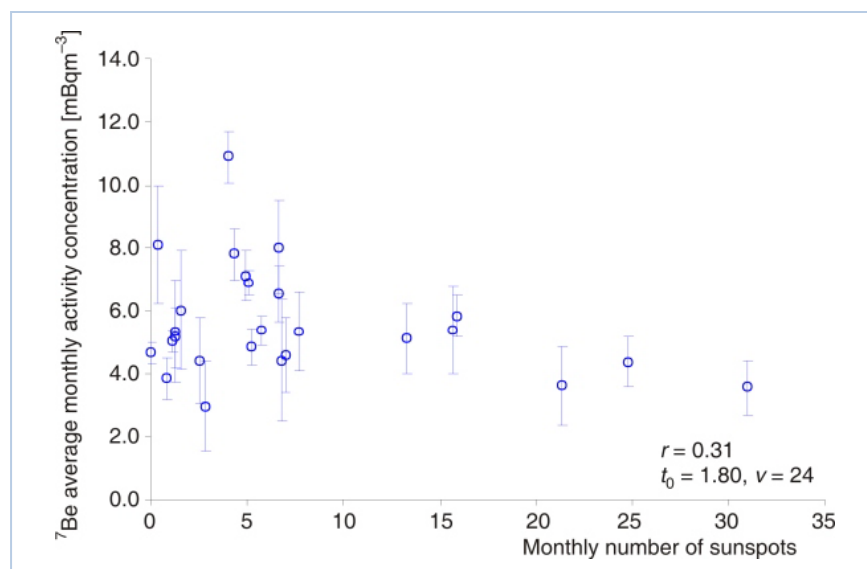


Εικόνα 3.33

Μεταβολή της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης ${}^7\text{Be}$ στον επιφανειακό αέρα στην Ελβετία ($46^\circ - 47^\circ \text{N}$) (διακεκομμένη γραμμή) με τον αριθμό των κηλίδων (συνεχής γραμμή – αντίστροφη κλίμακα) για χρονική διάρκεια **18 ετών** (1994-2011) [τα δεδομένα έχουν εξαχθεί από τη βάση δεδομένων Sunspot Index Data Center, SIDC].

(Steinmann et al., 2013)

Για μικρότερες χρονικές κλίμακες, π.χ. 2 ετών: 3/2008-4/2010 (Papandreou et al., 2011), δεν φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση της μέσης μηνιαίας συγκέντρωσης ${}^7\text{Be}$ και του μηνιαίου αριθμού κηλίδων (Εικόνα 3.34), καθώς οι παρατηρήσεις μιας μικρής χρονικής διάρκειας αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό μέρος του 11ετούς ηλιακού κύκλου.

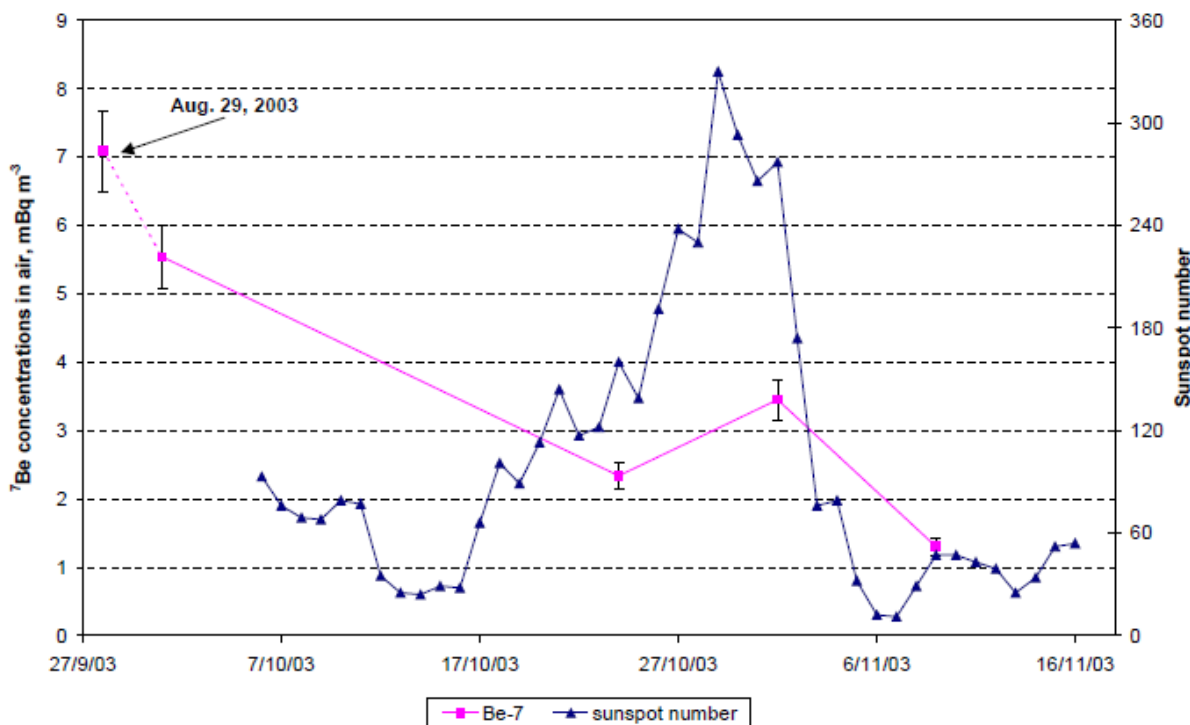


Εικόνα 3.34

Συσχέτιση της μέσης μηνιαίας συγκέντρωσης ${}^7\text{Be}$ στην Πολυτεχνειούπολη ($\sim 38^\circ \text{N}$), Ζωγράφου, και του μηνιαίου αριθμού κηλίδων για μικρή χρονική διάρκεια **2 ετών** (3/2008-4/2010), η οποία αντιστοιχούσε στην αρχή του ηλιακού κύκλου ακολουθώντας το ελάχιστο του αριθμού κηλίδων κατά το 2008, όταν η συγκέντρωση του ${}^7\text{Be}$ στην ατμόσφαιρα ήταν μέγιστη [τα δεδομένα έχουν ανακτηθεί από τον δικτυακό τόπο Space Weather Prediction Center, Boulder, CO, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Dept. of Commerce: <http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices.html>].

(Papandreou et al., 2011)

Εντούτοις, μετά από έντονα περιστατικά ηλιακού ανέμου, που συμβαίνουν σε πολύ μικρή κλίμακα χρόνου, είναι δυνατό να παρατηρηθούν πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα (Εικόνα 3.35) (Papastefanou and Ioannidou, 2004).



Εικόνα 3.35

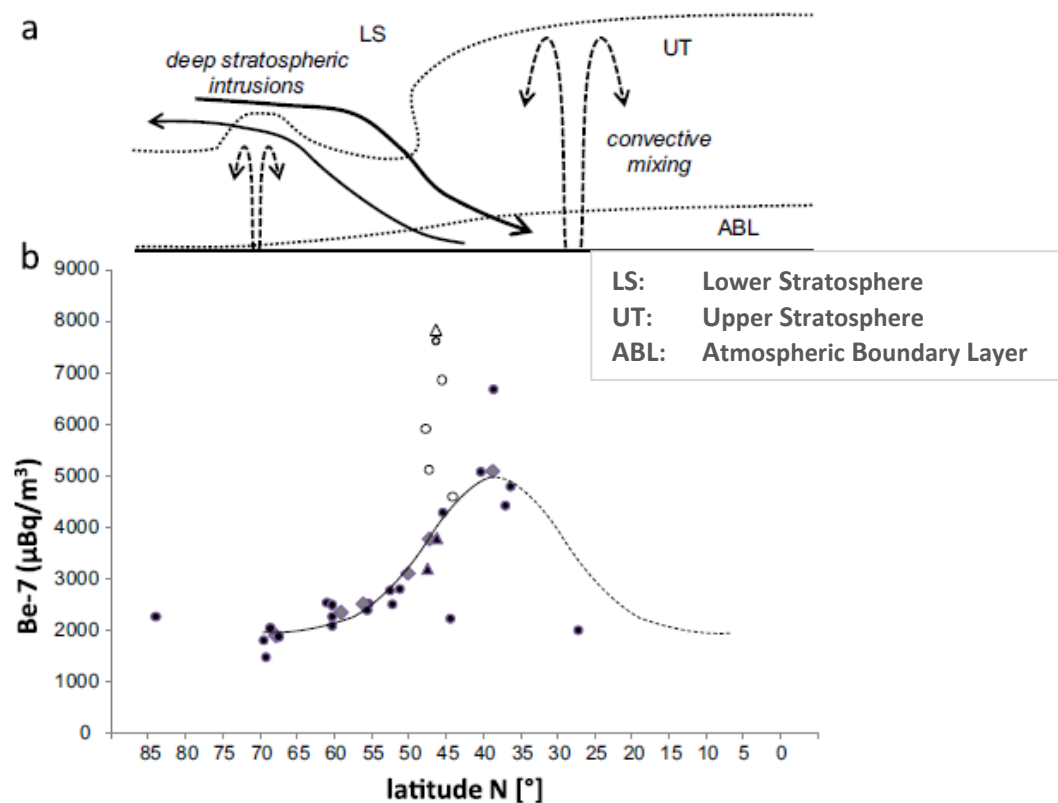
Συγκέντρωση ραδιενέργειας ^7Be στο επιφανειακό αέρα και αριθμός κηλίδων για την περίοδο Οκτώβριο-Νοέμβριο 2003. Στις 24/10/03 συνέβη ένα περιστατικό έντονου ηλιακού ανέμου συνοδευόμενο από αύξηση του αριθμού των ηλιακών κηλίδων και ακολούθησε ένα ακόμη περιστατικό στις 29/10/03, που ήταν το δυνατότερο (αριθμός κηλίδας 330). Αυτό επηρέασε την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας προκαλώντας μεγάλη μείωση στους ρυθμούς παραγωγής των προϊόντων της, οδηγώντας σε πολύ χαμηλό επίπεδο συγκέντρωσης ^7Be στον επιφανειακό αέρα: $(1,30 \pm 0,12) \text{ mBq m}^{-3}$, το οποίο καταγράφηκε στις 9/11/03. Να σημειωθεί ότι, κατά την υπό μελέτη περίοδο, ο 11ετής ηλιακός κύκλος βρισκόταν σε χαμηλό αριθμό κηλίδων και αντίστοιχα σε υψηλές συγκεντρώσεις ^7Be .

(Papastefanou and Ioannidou, 2004)

3.6.2 Εξάρτηση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα από το γεωμαγνητικό πλάτος και το ύψος της τροπόπαυσης – Στρατοσφαιρικές εισβολές αερίων μαζών

Ο ρυθμός παραγωγής ^7Be στην στρατόσφαιρα είναι μεγαλύτερος στα μεγάλα γεωμαγνητικά πλάτη. Όμως, η ανάμειξη των αερίων μαζών της κατώτερης στρατόσφαιρας με αυτές της ανώτερης τροπόσφαιρας γίνεται κατά μήκος της αναδίπλωσης της τροπόπαυσης

(tropopause folding)⁽¹¹⁾ σε περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών. Ακολούθως, η κατακόρυφη μεταφορά αερίων μαζών (convective mixing)⁽¹¹⁾ μέσα στην τροπόσφαιρα έχει ως αποτέλεσμα την εισβολή ⁷Be από την ανώτερη τροπόσφαιρα ή τη χαμηλότερη στρατόσφαιρα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (atmospheric boundary layer, ABL)⁽¹¹⁾ και στην επιφάνεια της γης (Εικόνα 3.36.a). Έτσι, η ατμοσφαιρική συγκέντρωση ⁷Be στον επιφανειακό αέρα παρουσιάζει υψηλότερες τιμές στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη (20-50°N) και χαμηλότερες τιμές προς τους πόλους και προς τον ισημερινό (Εικόνα 3.36.b). Ένας προτιμώμενος προορισμός τέτοιων εισβολών είναι η περιοχή της Μεσογείου, γεγονός που ερμηνεύει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις ⁷Be στον επιφανειακό αέρα σε γεωγραφικά πλάτη 35-40°N (Steinmann et al., 2013).



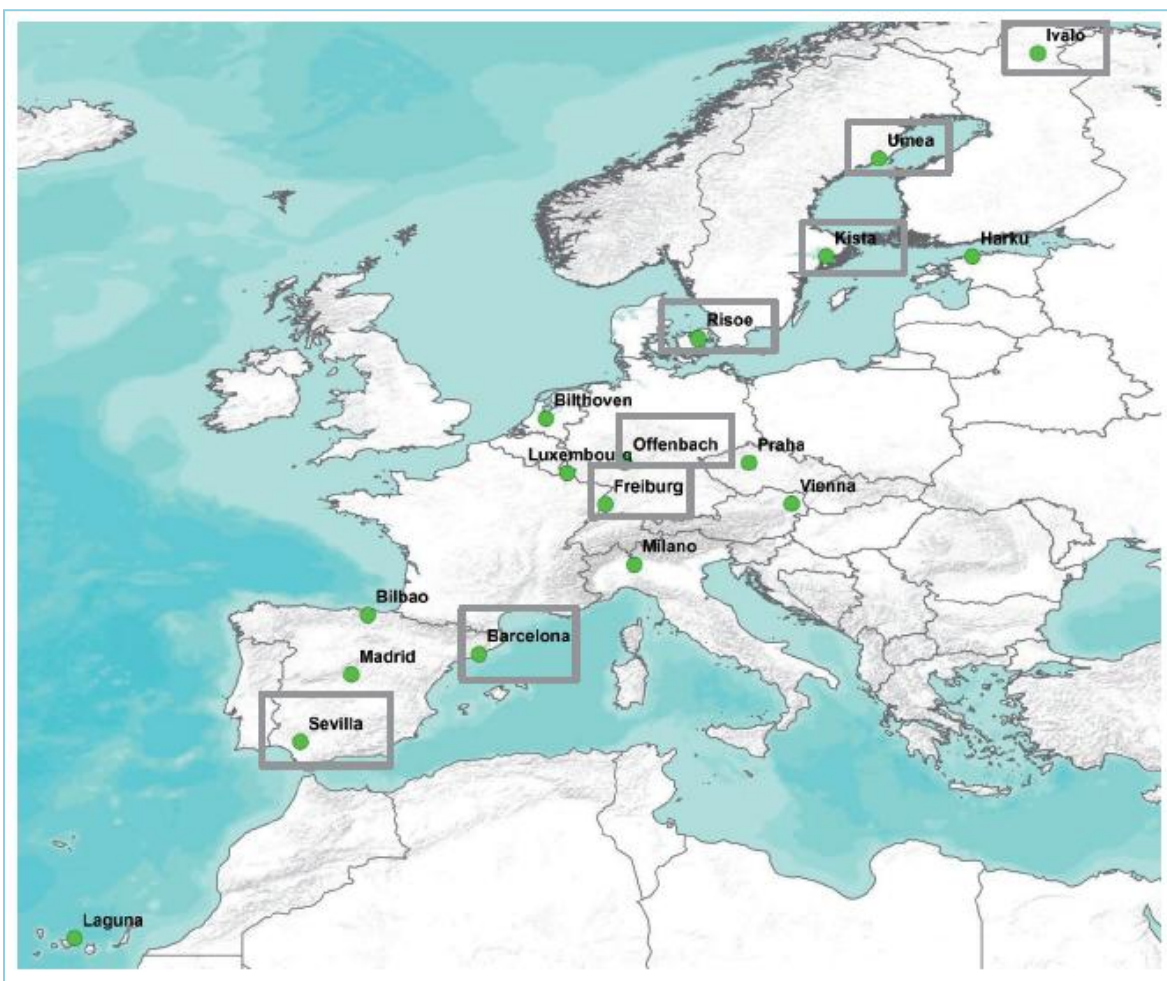
Εικόνα 3.36

(a) Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση των στρατοσφαιρικών εισβολών. (b) Μακροπρόθεσμες μέσες συγκεντρώσεις ⁷Be στον επιφανειακό αέρα για το βόρειο ημισφαίριο μεταξύ των γεωγραφικών μηκών 17°W και 30°E. (Steinmann et al., 2013)

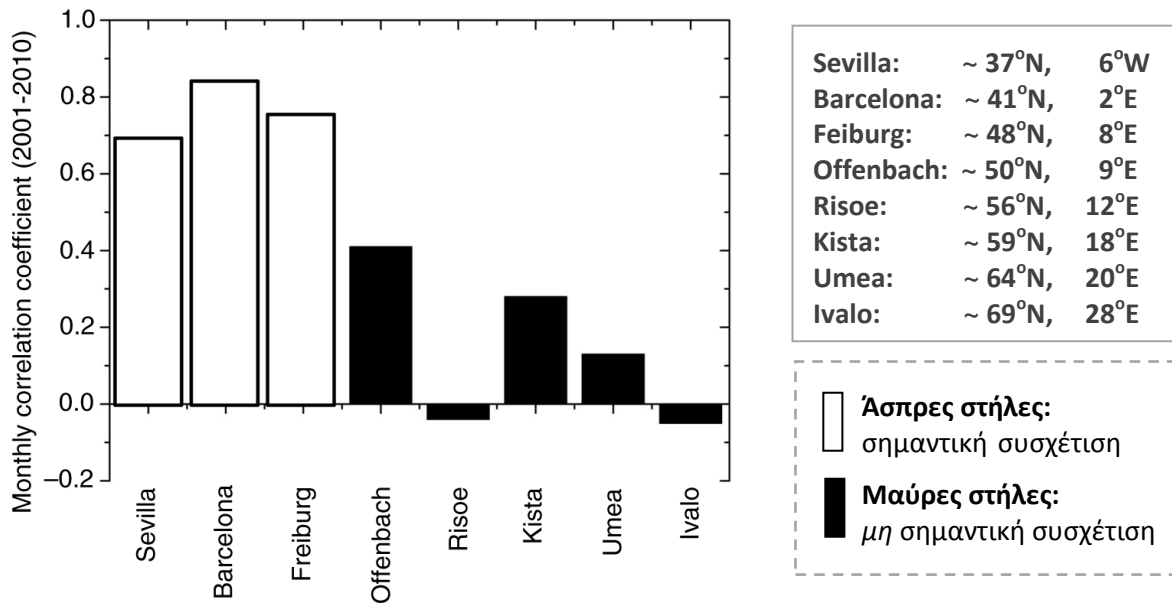
Το ύψος της τροπόπαυσης παρουσιάζει εποχιακές όπως επίσης και ημερήσιες μεταβολές⁽¹¹⁾. Η ανύψωση της τροπόπαυσης συμπίπτει με μεγαλύτερες παρατηρούμενες συγκεντρώσεις ⁷Be στον επιφανειακό αέρα, ενώ όταν το ύψος της τροπόπαυσης είναι μικρότερο παρατηρούνται και μικρότερες συγκεντρώσεις ⁷Be.

⁽¹¹⁾ Βλ. Παράρτημα Β (B.2, B.3, B.4)

Η επίδραση του ύψους της τροπόπαυσης στη συγκέντρωση ραδιενέργειας ^7Be στον επιφανειακό αέρα, όπως προέκυψε από δεδομένα 10 ετών (2001-2010) της βάσης δεδομένων REM για 8 επιλεγμένους σταθμούς δειγματοληψίας στην Ευρώπη, φαίνεται στην Εικόνα 3.38 (Hernandez-Ceballos et al, 2016). Οι σταθμοί που βρίσκονται στη νοτιο-κεντρική Ευρώπη (νοτιότερα των 50°N) παρουσιάζουν εντονότερη θετική συσχέτιση. Παρόμοια οι Ioannidou et al. (2014) βρήκαν για τη Θεσσαλονίκη ($\sim 40^\circ\text{N}$) έναν μεγάλο θετικό συντελεστή συσχέτισης μεταξύ της συγκέντρωσης ^7Be στον επιφανειακό αέρα και του ύψους της τροπόπαυσης (Εικόνα 3.39). Εντούτοις, Ευρωπαϊκοί σταθμοί βορειότερα των 50°N παρουσιάζουν διαφορετικά αποτελέσματα ως προς την τιμή του συντελεστή συσχέτισης. Μάλιστα σε δύο από αυτούς (Rinsøe και Ivalo), που βρίσκονται προς την πλευρά του Ατλαντικού ωκεανού, ο συντελεστής συσχέτισης βρέθηκε αρνητικός διότι αυτές οι τοποθεσίες επηρεάζονται έντονα από τις θαλάσσιες αέριες μάζες που μεταφέρονται από τους δυτικούς ανέμους (westerlies) (βλ. Παράρτημα B.5, B.8), οι οποίες περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών αερολυμάτων κι επομένως χαμηλές συγκεντρώσεις ^7Be .

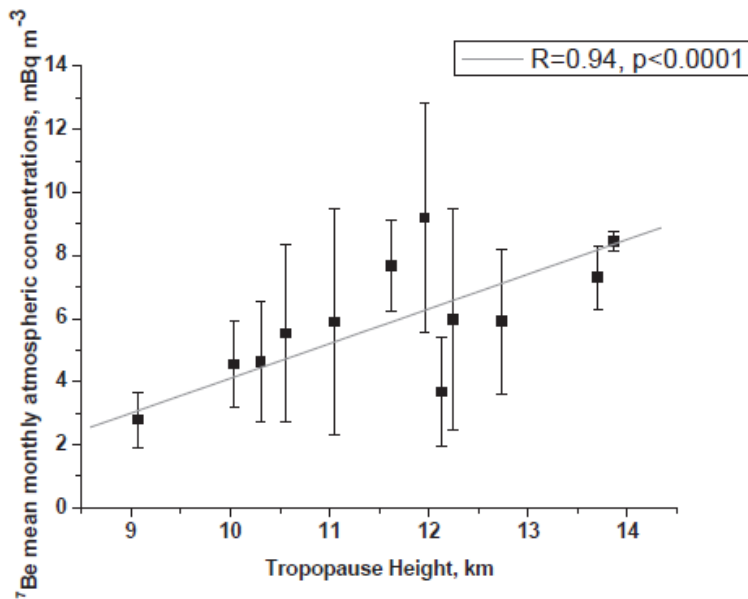


Εικόνα 3.37 Χάρτης με 16 από τις 34 τοποθεσίες δειγματοληψιών (ημερήσιων έως μηνιαίων) που παρέχουν δεδομένα της συγκέντρωσης ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα (σε υψόμετρα μέσα στο οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα) για τη βάση δεδομένων REM (Radioactivity Environmental Monitoring), η οποία καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Ευρωπαϊκής Ένωσης (από 35° - 72°N και 20°W - 40°E). Σημειώνονται οι 8 επιλεγμένοι δειγματοληπτικοί σταθμοί που αναφέρονται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.38. (Hernandez-Ceballos et al., 2015, 2016)



Εικόνα 3.38

Συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων ^7Be (από τη βάση δεδομένων REM) στον επιφανειακό αέρα και του ύψους της τροπόπαυσης για τη χρονική περίοδο 2001-2010 σε 8 επιλεγμένους σταθμούς δειγματοληψίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (Hernandez-Ceballos et al., 2016)



Εικόνα 3.39

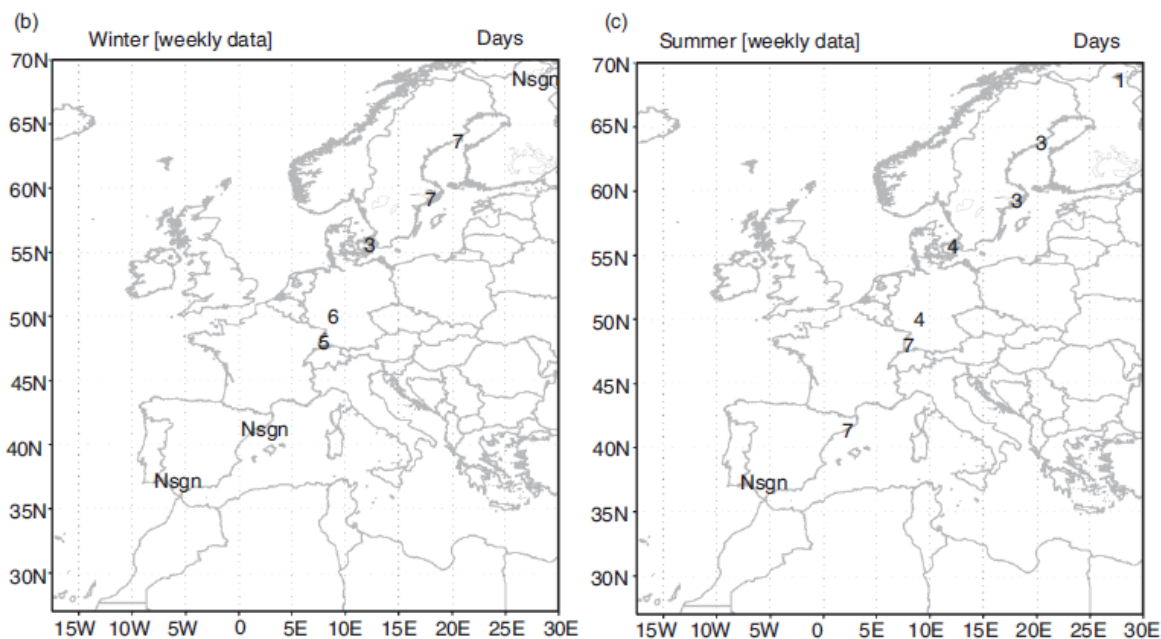
Μέση μηνιαία συγκέντρωση ^7Be (mBq m^{-3}) συναρτίζεται του ύψους της τροπόπαυσης (km) για τη Θεσσαλονίκη (~ 40°N, 23°E)

[εβδομαδιαίες δειγματοληψίες (μία 24ωρη δειγματοληψία κάθε 7 ημέρες) για το έτος 2009].

(Ioannidou et al., 2014)

Επειδή η ατμόσφαιρα δεν ανταποκρίνεται αμέσως σε αλλαγές μετεωρολογικών παραγόντων, υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση από τη στιγμή που θα συμβεί μια μεταβολή στο ύψος της τροπόπαυσης μέχρι αυτή να επηρεάσει τη συγκέντρωση ραδιενέργειας του ^7Be στον επιφανειακό αέρα. Η χρονική καθυστέρηση μπορεί να κυμαίνεται από ώρες έως μέρες ή εβδομάδες. Οι Ioannidou et al., (2014) υπολόγισαν ότι, μετά από αλλαγές του ύψους της τροπόπαυσης, η συγκέντρωση ^7Be στον επιφανειακό αέρα της Θεσσαλονίκης (~ 40°N, 23°E) ανταποκρίνεται μέσα σε 3 ημέρες.

Επιπλέον, στους χάρτες της Εικόνας 3.40, αναγράφεται η αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση (αριθμός ημερών) για το χειμώνα και το καλοκαίρι, η οποία υπολογίστηκε για τους 8 επιλεγμένους σταθμούς δειγματοληψίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (βλ. χάρτη εικόνας 3.37) που εξετάσαμε παραπάνω (Hernandez-Ceballos et al., 2016).



Εικόνα 3.40

Χάρτες στους οποίους αναγράφεται η χρονική καθυστέρηση (αριθμός ημερών) που μεσολαβεί μεταξύ μιας αλλαγής του ύψους της τροπόπαυσης και της ανταπόκρισης στη μετρούμενη συγκέντρωση του ^7Be στον επιφανειακό αέρα κατά τη διάρκεια (b) του χειμώνα και (c) του καλοκαιριού για 8 επιλεγμένους σταθμούς δειγματοληψίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (βλ. χάρτη Εικόνας 3.37).

(Hernandez-Ceballos et al., 2016)

3.7 Συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων

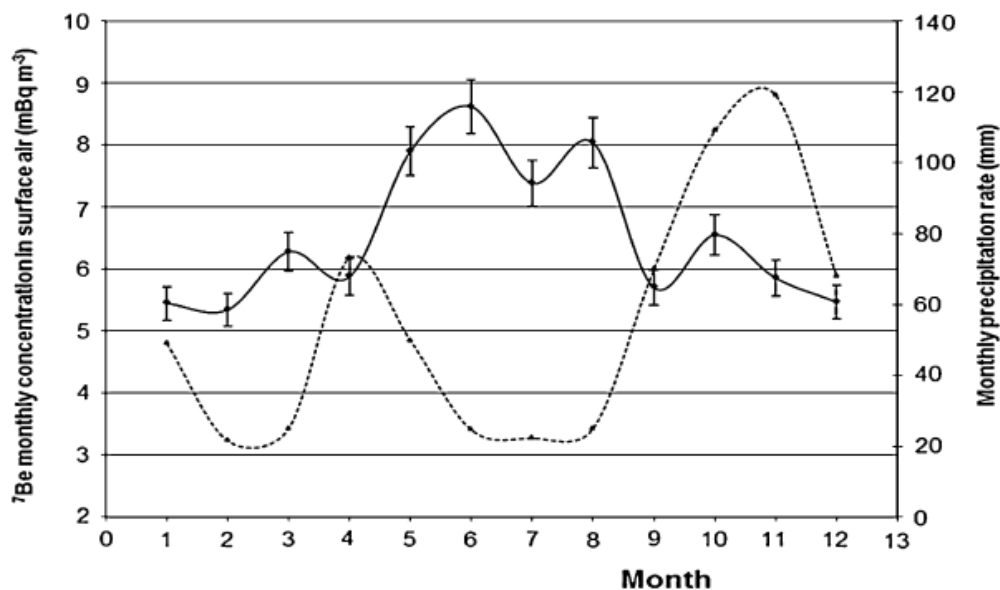
3.7.1 Εισαγωγή

Για την κατανόηση των μεταβολών (πολυετών, εποχιακών, ημερησίων), τις οποίες θα εξετάσουμε παρακάτω (§3.8), είναι προηγουμένως απαραίτητο να εξετασθεί και να ερμηνευτεί η συσχέτιση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων με διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως είναι η βροχή, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η ατμοσφαιρική πίεση και η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου. Να σημειώσουμε ότι δεν φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^{137}Cs , το οποίο κυβερνάται από τη διεργασία της επαναιώρησης, και των μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση, εκτός από μια ασθενή συσχέτιση με την κατακρήμνιση ($r=0,51$) (Pham et al., 2011).

3.7.2 Συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και της κατακρήμνισης

Η βροχή είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τα επίπεδα των συγκεντρώσεων ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό αέρα, αφού αποτελεί τον καθοριστικότερο παράγοντα σάρωσης από την ατμόσφαιρα των ατμοσφαιρικών σωματιδίων, στα οποία προσκολλώνται ραδιενεργά ισότοπα. Επομένως, είναι αναμενόμενη μια αρνητική συσχέτιση μεταξύ των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισοτόπων στον επιφανειακό ατμοσφαιρικό αέρα και της μέσης μηνιαίας κατακρήμνισης, με τις χαμηλότερες τιμές συγκέντρωσης ραδιενέργειας να απαντώνται κατά τη διάρκεια των βροχερών περιόδων και τις υψηλότερες τιμές κατά τη διάρκεια των ξηρών εποχών. Πράγματι, αυτή η αναμενόμενη αρνητική συσχέτιση έχει διαπιστωθεί σε διάφορες μελέτες. Οι Hotzl and Winkler (1987) ανέφεραν αξιοσημείωτη μείωση της συγκέντρωσης των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα στο Μόναχο, Γερμανία, να συμβαίνει σε περιόδους εντονότερων βροχοπτώσεων. Επίσης, ο Monaghan (1989) ανέφερε μια δραματική μείωση της συγκέντρωσης $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα στην Καλιφόρνια, USA, αμέσως μετά από περιστατικά βροχοπτώσεων και μετωπικά συστήματα κυκλωνικών καταιγίδων.

Το διάγραμμα της Εικόνας 3.41 (Pham et al., 2011) αποτελεί παράδειγμα μιας τέτοιας αρνητικής συσχέτισης για την περίπτωση του ^7Be . Μάλιστα, οι μετρήσεις μικρής κλίμακας είναι οι πλέον κατάλληλες για να καταδείξουν την παραπάνω επίδραση (Papandreou et al., 2011, Εικόνα 3.42). Επίσης, τα διαγράμματα της Εικόνας 3.43.a, b (Likuku, 2006) δείχνουν ότι υπάρχει μια σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον αέρα με την αύξηση της βροχόπτωσης. Εντούτοις, η ασθενής συσχέτιση ($r^2=0,07$ και $r^2=0,10$) υποδηλώνει ότι η βροχόπτωση δεν αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα που ελέγχει τις συγκεντρώσεις των δύο αυτών ραδιενεργών ισοτόπων στο επιφανειακό αέρα.

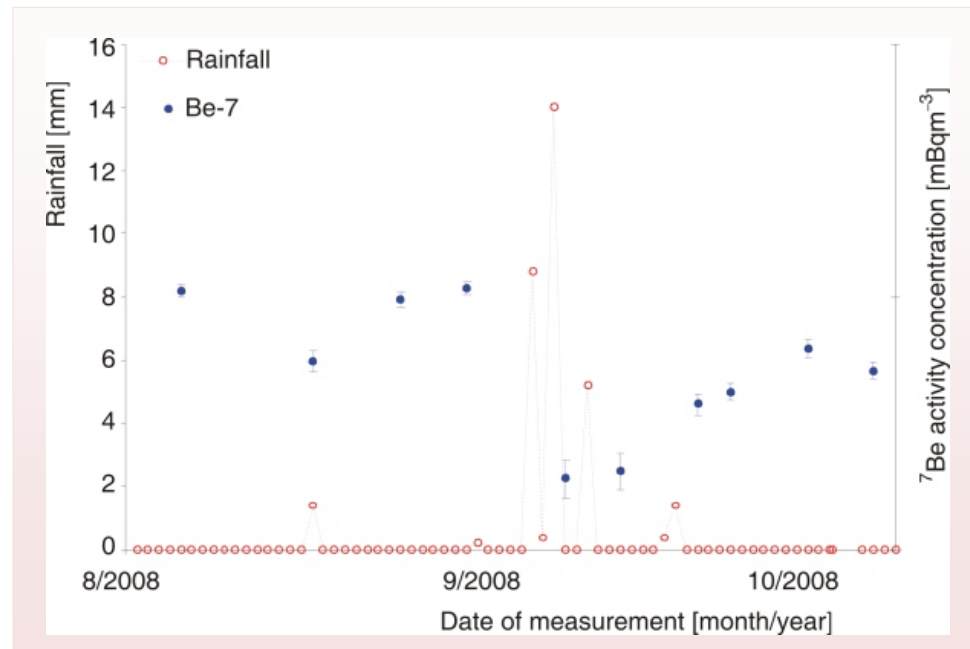


Εικόνα 3.41

Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be (συνεχής γραμμή) και ρυθμός κατακρήμνισης (διακεκομμένη γραμμή) στον αέρα στο Μόναχο (~ 44°N) για τη χρονική περίοδο 1998-2010.

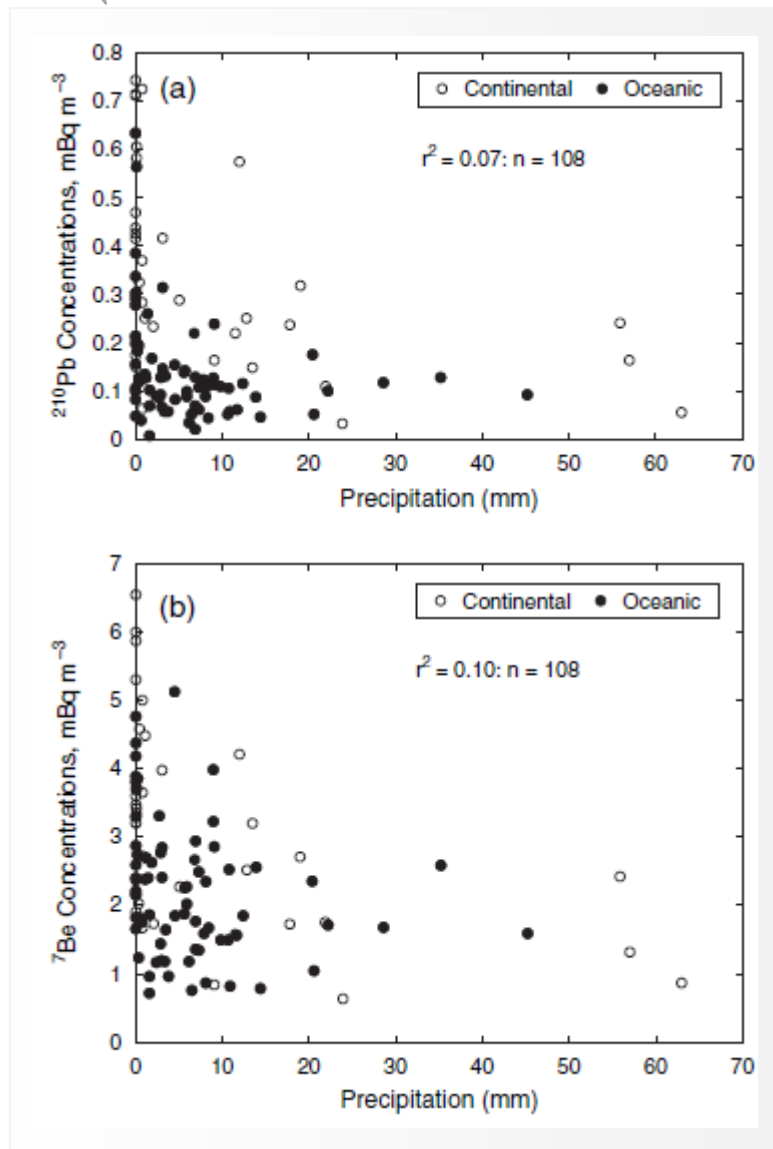
(Pham et al., 2011)

Η προέλευση των αερίων μαζών προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας ανάλυση τροχιάς (trajectory analysis) και πεδία ανέμων από το μοντέλο πρόβλεψης ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts).



Εικόνα 3.42

Η επίδραση της διεργασίας της σάρωσης μέσω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (scavenging by precipitation) στη συγκέντρωση ραδιενέργειας του ^7Be στον επιφανειακό αέρα, όπως καταδεικνύεται από μετρήσεις μικρής χρονικής κλίμακας στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου ($\sim 38^\circ\text{N}$, 23°E) (Papandreou et al., 2011)



Εικόνα 3.43

Μεταβολές των συγκεντρώσεων:

(a) $^{210}\text{Pb}_{ex}$

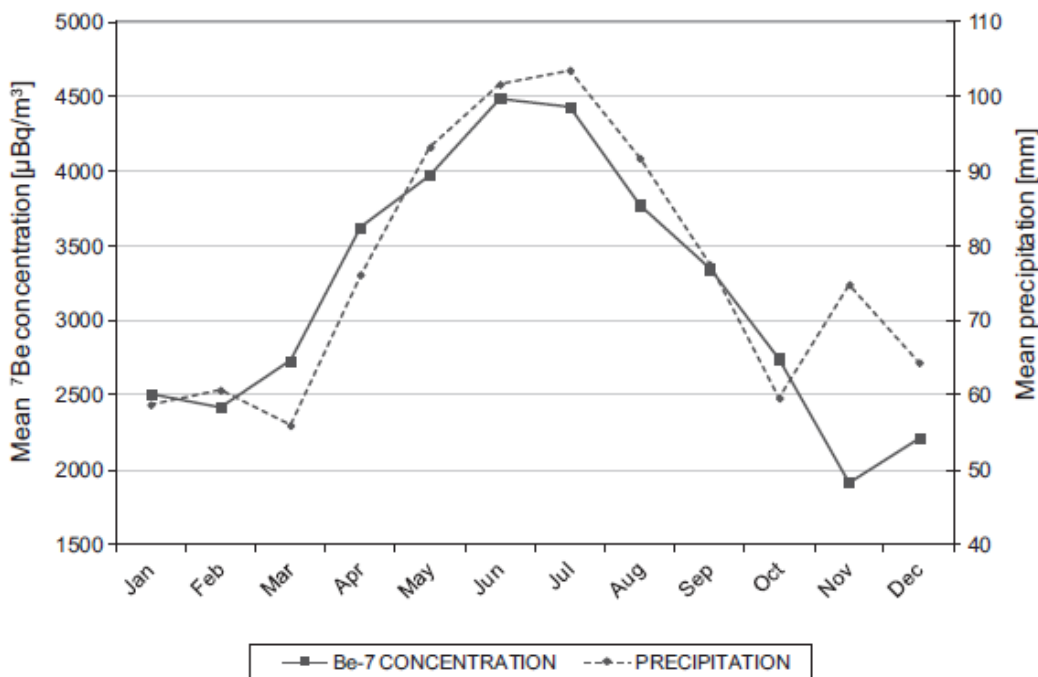
(b) ^7Be

στον επιφανειακό αέρα στο Εδιμβούργο ($\sim 56^\circ\text{N}$, 3°E), UK, συναρτήσει της κατακρήμνισης.

Παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση του $^{210}\text{Pb}_{ex}$ στον αέρα ωκεάνιας προέλευσης (μαύροι κύκλοι) είναι σχετικά χαμηλή συγκρινόμενη με αυτή στον αέρα ηπειρωτικής προέλευσης (άσπροι κύκλοι) (βλ. §3.7.6).

(Likuku, 2006)

Από την άλλη, μια παρατηρούμενη μη αναμενόμενη θετική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ^7Be στον επιφανειακό αέρα και της κατακρήμνισης, δηλαδή υψηλότερη συγκέντρωση ^7Be κατά τη διάρκεια βροχερών περιόδων, θα μπορούσε να αποδοθεί σε επιπρόσθετη εισαγωγή ^7Be λόγω ανάμειξης του επιφανειακού αέρα με αέρα από την υψηλότερη τροπόσφαιρα (Εικόνα 3.44, Steinmann et al., 2013).



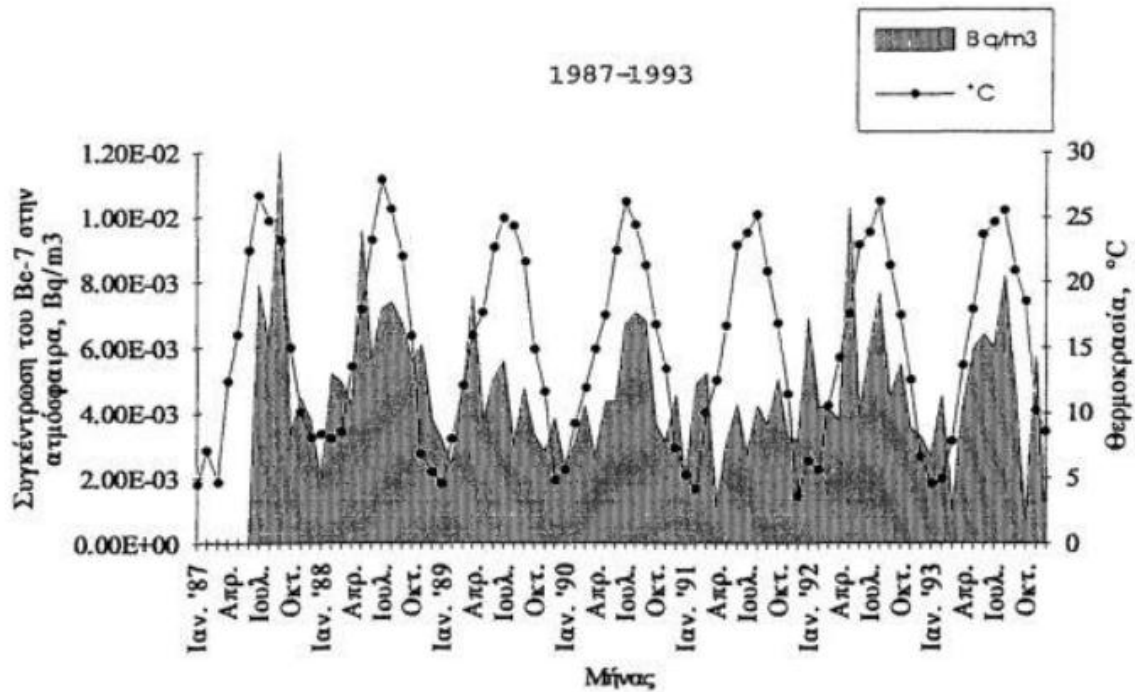
Εικόνα 3.44

Μέση μηνιαία συγκέντρωση ραδιενέργειας ^7Be στον αέρα και μέση μηνιαία κατακρήμνιση στην περιοχή Guttingen ($\sim 48^\circ\text{N}$), Ελβετία, για τη χρονική περίοδο 2001-2010. (Steinmann et al., 2013)

3.7.3 Συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και της θερμοκρασίας

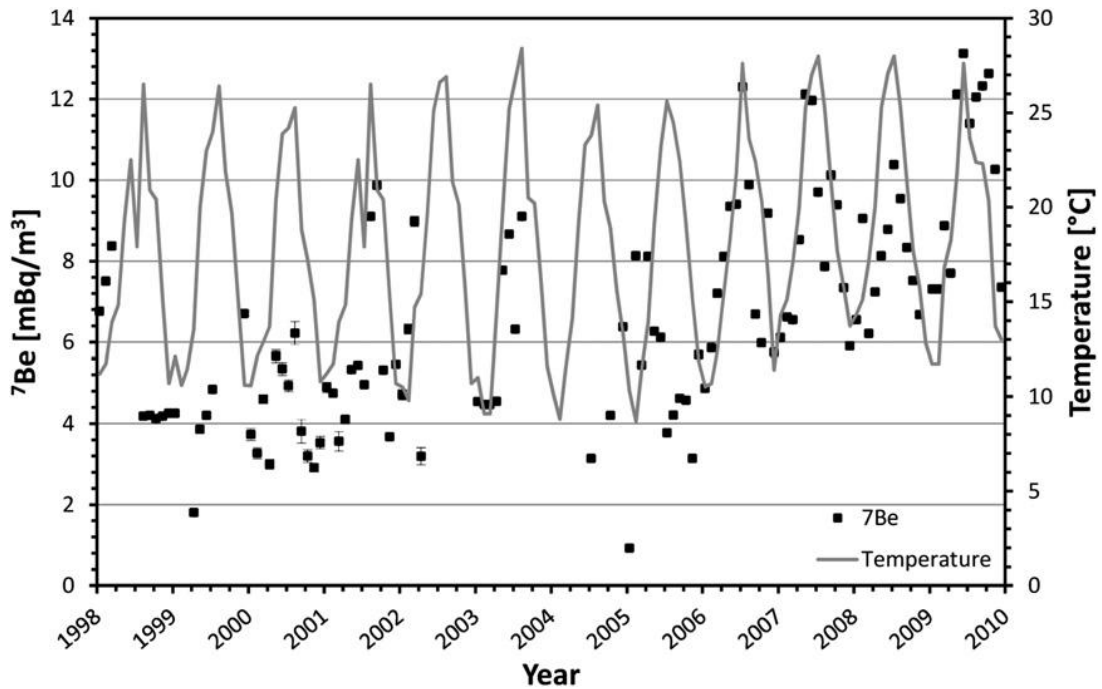
Οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ^7Be στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μάλιστα υπάρχει μια θετική συσχέτιση μεταξύ τους, με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ^7Be να συμπίπτουν με τις θερμότερες περιόδους και τις μικρότερες με τις ψυχρότερες (Εικόνες 3.45 και 3.46).

Στη βιβλιογραφία, παρουσιάζεται συχνά η θετική συσχέτιση της συγκέντρωσης ^7Be στον αέρα και της θερμοκρασίας, η οποία σε κάποιες περιπτώσεις είναι ισχυρή ($r = 0,95$, Ioannidou et al., 2005, Θεσσαλονίκη, Εικόνα 3.47), ενώ σε άλλες είναι πιο ασθενής ($r = 0,57$, Papandreou et al., 2011, Αθήνα, Εικόνα 3.48, $r=0,463$, Azahra et al., 2003, Ισπανία, $r = 0,43$, Pham et al., 2011, Μονακό).



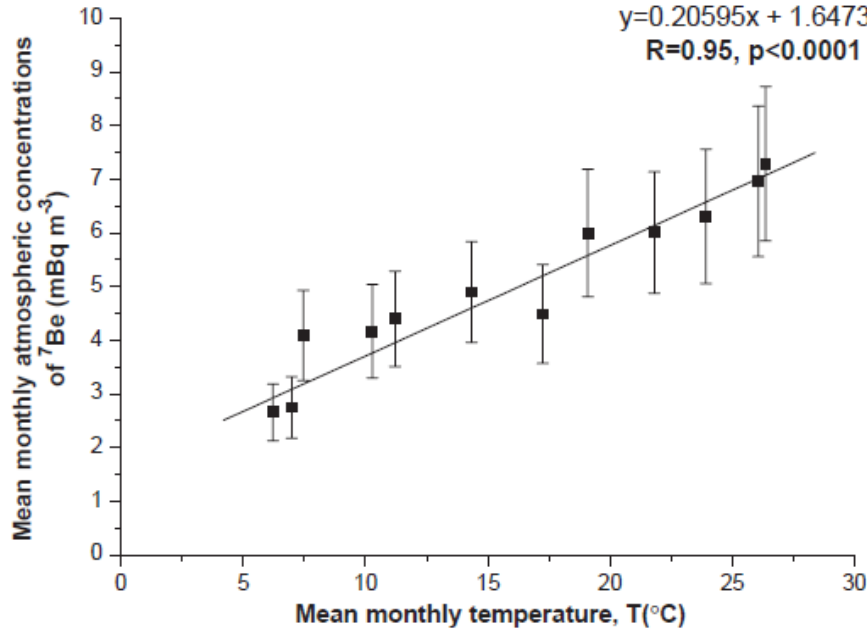
Εικόνα 3.45

Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας και της μηνιαίας συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα στην περιοχή της Θεσσαλονίκης ($\sim 40^\circ \text{N}$) για τη χρονική περίοδο 1987-1993. (Ιωαννίδου, 1995)



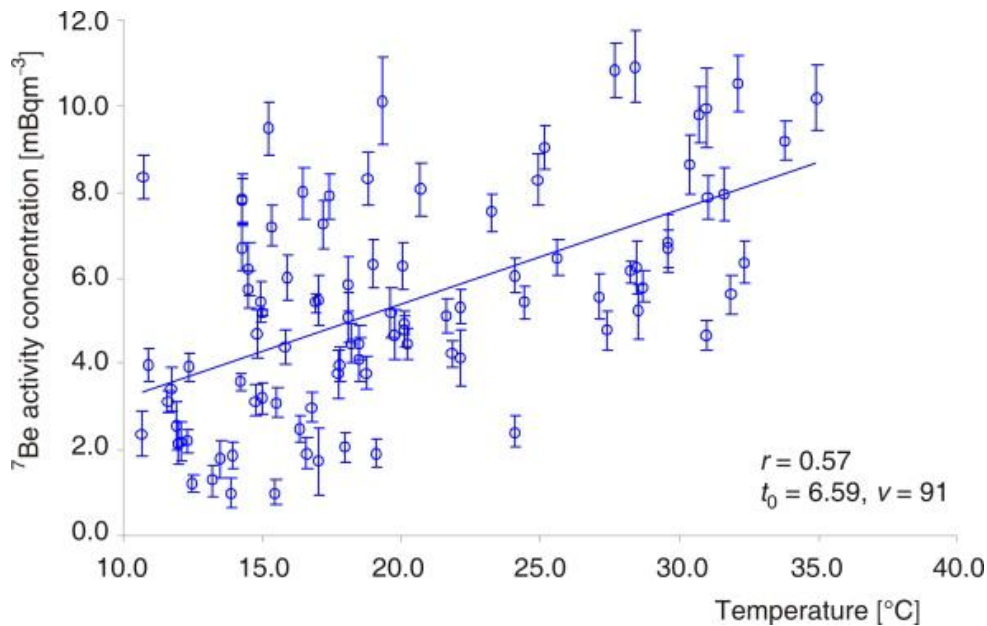
Εικόνα 3.46

Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be με τη θερμοκρασία στον αέρα στο Μονακό ($\sim 44^\circ \text{N}$) για τη χρονική περίοδο 1998-2010. (Pham et al., 2011)



Εικόνα 3.47

Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be συναρτήσει της θερμοκρασίας στην περιοχή της Θεσσαλονίκης ($\sim 40^{\circ}\text{N}$) για τη 15ετή χρονική περίοδο 1987 - 2001. (Ioannidou et al., 2005)



Εικόνα 3.48

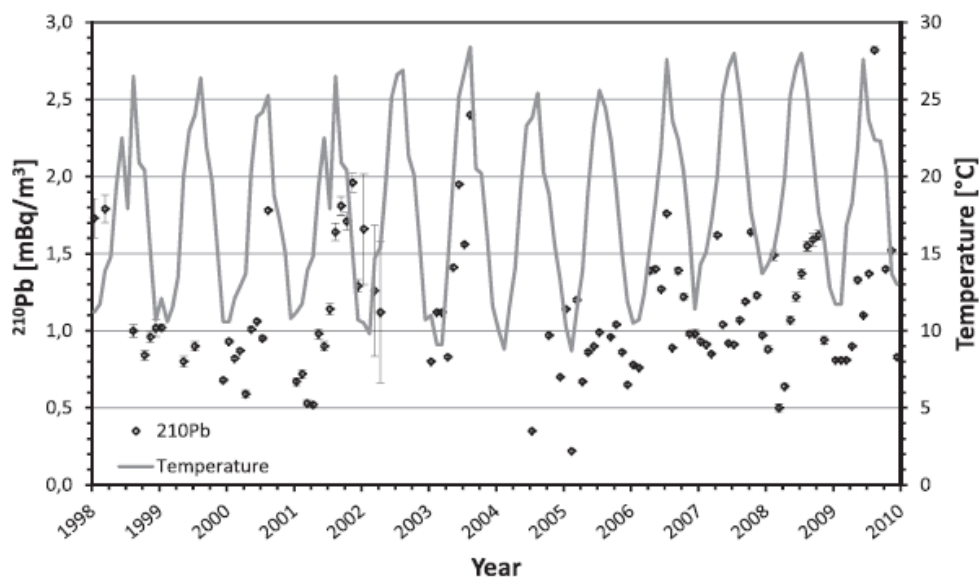
Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ^7Be και της θερμοκρασίας στην Πολυτεχνειούπολη ($\sim 38^{\circ}\text{N}$) Ζωγράφου. Η δειγματοληψία κάλυψε την περίοδο 2 ετών (Μάρτιος 2008 έως Απρίλιος 2010), με μία 4ωρη συλλογή δείγματος ανά εβδομάδα. (Papandreou et al., 2011)

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be κατά τη διάρκεια των θερμότερων εποχών αποδίδονται στο ότι οι αυξημένες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα την καλύτερη ανάμιξη της τροπόσφαιρας και την πιο αποτελεσματική κατακόρυφη μεταφορά των αερίων μαζών μέσα σε αυτήν. Αυτή η κατακόρυφη κίνηση αέρα μεταφέρει στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας ^7Be που έχει παραχθεί στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας καθώς και μέρος αυτού που έχει εισχωρήσει από τη στρατόσφαιρα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ρυθμός παραγωγής του ^7Be στη στρατόσφαιρα είναι υψηλότερος, προκύπτει ότι η στρατοσφαιρική - τροποσφαιρική ανταλλαγή αερίων μαζών επιφέρει σημαντική αύξηση του ^7Be στην τροπόσφαιρα κατά τη διάρκεια των θερμότερων εποχών.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας με τις εποχές του έτους συνδέεται και με ένα ακόμη φαινόμενο, το οποίο λαμβάνει χώρα στην ατμόσφαιρα και γίνεται ιδιαίτερα εμφανές σε περιοχές περί τις 40°N γεωγραφικό πλάτος, και αυτό είναι η ανύψωση της τροπόπαυσης κατά τους αίθριους μήνες του έτους. Πράγματι, η ανταλλαγή στρατοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα κατά την περίοδο της άνοιξης είναι σημαντικότερη για γεωγραφικά πλάτη 50° περίπου ενώ, για γεωγραφικά πλάτη 40° περίπου είναι εντονότερη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες τόσο η ανύψωση της τροπόπαυσης όσο και η κατακόρυφη μεταφορά αερίων μαζών από κατώτερα σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και αντίστροφα.

Αντίθετα κατά τους χειμερινούς μήνες, οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ευστάθεια της ατμόσφαιρας όπως επίσης και το χαμηλόμα του ύψους της τροπόπαυσης, με αποτέλεσμα οι τιμές των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων του ^7Be να είναι χαμηλές. Επίσης, οι συχνές συνθήκες αναστροφής των επιφανειακών αερίων στρωμάτων δεν επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση των αερίων μαζών στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Μια ασθενής θετική συσχέτιση ($r = 0,40$, Ioannidou et al., 2005) παρατηρήθηκε μεταξύ των μηνιαίων συγκεντρώσεων $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό αέρα και της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των θερμών και ξηρών καλοκαιρινών μηνών για την περιοχή της Θεσσαλονίκης, Παρόμοια αποτελέσματα ($r = 0,43$), βρήκαν για το Μονακό οι Pham et al. (2011) (Εικόνα 3.49). Αυτή η θετική συσχέτιση αντικατοπτρίζει πιθανώς την επίδραση της θερμοκρασίας στην αύξηση της παραγωγής $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ μέσω της αυξανόμενης εκροής από το έδαφος του πατρικού του ^{222}Rn .

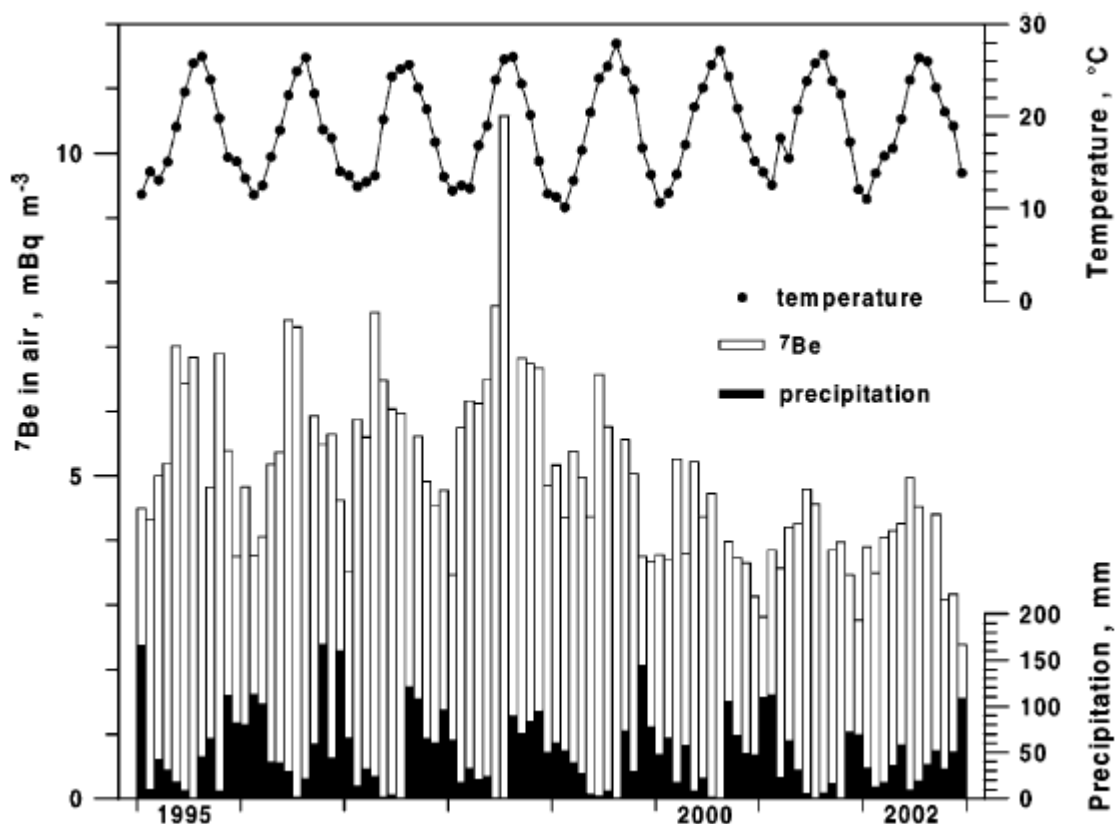


Εικόνα 3.49
Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ με τη θερμοκρασία στον αέρα του Μονακό ($\sim 44^\circ\text{N}$) για τη χρονική περίοδο 1998-2010. (Pham et al., 2011)

3.7.4 Συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία και την κατακρήμνιση

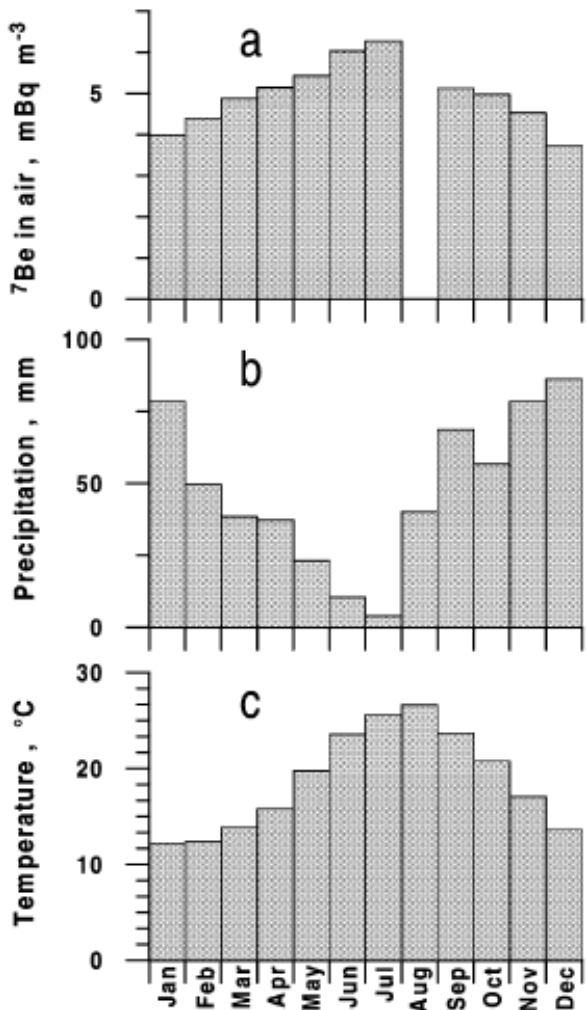
Στη βιβλιογραφία συναντάμε μελέτες, κυρίως για το ^7Be , στις οποίες οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του παρατηρούνται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όταν η θερμοκρασία είναι μεγάλη και ταυτόχρονα η ποσότητα της βροχόπτωσης πολύ μικρή. Να σημειωθεί ότι αυτός ο συνδυασμός θερμοκρασίας και βροχόπτωσης απαντάται σε περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών (βλ. §3.8.2). Σύμφωνα με όσα αναλύσαμε παραπάνω, αυτή η αύξηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας οφείλεται στο συνδυασμό αφενός μεν της απουσίας της διεργασίας της βροχόπτωσης και αφετέρου της εντονότερης κατακόρυφης ανάμιξης του αέρα που προκαλεί η αύξηση της θερμοκρασίας, της ανύψωσης της τροπόπαυσης κατά τους θερμούς μήνες και της αναδίπλωσης της τροπόπαυσης κατά τη διάρκεια της άνοιξης.

Για περιοχές της Μεσογείου, η θετική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be και της θερμοκρασίας καθώς και η αρνητική συσχέτισή της με τη βροχόπτωση απεικονίζονται περαιτέρω και συνδυαστικά από τα ιστογράμματα των Εικόνων 3.50 και 3.51, όπου οι μέσες τιμές των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων ^7Be συγκρίνονται με τις μέσες τιμές των μηνιαίων μέσων θερμοκρασιών καθώς και των μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης.



Εικόνα 3.50

Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του ^7Be , συνολική μηνιαία βροχόπτωση και μηνιαία μέση θερμοκρασία στο Παλέρμο (38°N , 13°E), Ιταλία, για την περίοδο 1995-2002. (Cannizzaro et al., 2004)



Εικόνα 3.51

Μέσες τιμές των:

(a) μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων ${}^7\text{Be}$,

(b) συνολικών μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης και

(c) μηνιαίων μέσων θερμοκρασιών

στο Παλέρμο(38°N, 13°E), Ιταλία, για την περίοδο 1995-2002.

(Cannizzaro et al., 2004)

3.7.5 Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ${}^7\text{Be}$ και ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και της σχετικής υγρασίας

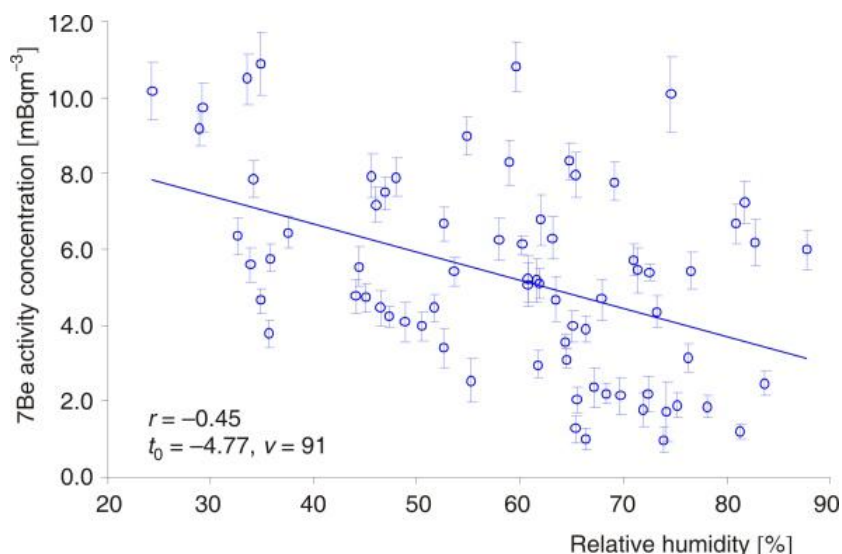
Παρατηρείται μια αρνητική συσχέτιση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ${}^7\text{Be}$ στον ατμοσφαιρικό αέρα και της σχετικής υγρασίας⁽¹²⁾ (π.χ. Papandreou et al., 2011, Εικόνα 3.52, Ioannidou, 2012, Εικόνα 3.53). Επίσης, μια ασθενή (αλλά θετική) συσχέτιση της συγκέντρωσης του ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και της σχετικής υγρασίας ($r=0,41$) αναφέρουν οι Pham et al. (2011). Η αρνητική συσχέτιση μπορεί να ερμηνευθεί ως εξής:

Όταν επικρατούν συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας, η συμπύκνωση⁽¹³⁾ γίνεται πιο έντονη και οι διαστάσεις των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αεροζόλ αυξάνονται. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός σάρωσης των αεροζόλ αυξάνεται με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ${}^7\text{Be}$ στην ατμόσφαιρα να είναι χαμηλότερες.

⁽¹²⁾ Βλ. Παράρτημα Β.10

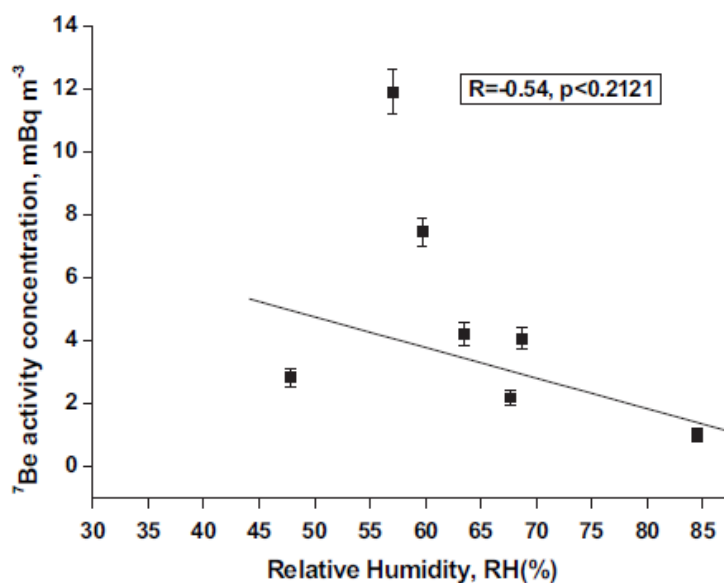
⁽¹³⁾ Βλ. Παράρτημα Γ.4

Αντίθετα, σε συνθήκες χαμηλής σχετικής υγρασίας, η διεργασία της συμπύκνωσης δεν είναι έντονη με αποτέλεσμα το μέγεθος των σωματιδίων αεροζόλ να παραμένει μικρό. Για τα μικρότερα σωματίδια οι ρυθμοί σάρωσης είναι μικροί. Έτσι, τα σωματίδια αεροζόλ παραμένουν στον ατμοσφαιρικό αέρα, οδηγώντας σε υψηλότερες συγκεντρώσεις του ^7Be (Ioannidou 2011). Επιπλέον, χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be παρατηρούνται μετά από ένα περιστατικό βροχόπτωσης, όταν η σχετική υγρασία είναι υψηλή (Papandreou et al., 2011).



Εικόνα 3.52

Συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be στον επιφανειακό αέρα της Πολυτεχνειούπολης ($\sim 38^\circ\text{N}, 23^\circ\text{E}$) Ζωγράφου συναρτήσει της σχετικής υγρασίας για τη χρονική περίοδο Μάρτιο 2008 – Απρίλιο 2010. (Papandreou et al., 2011).

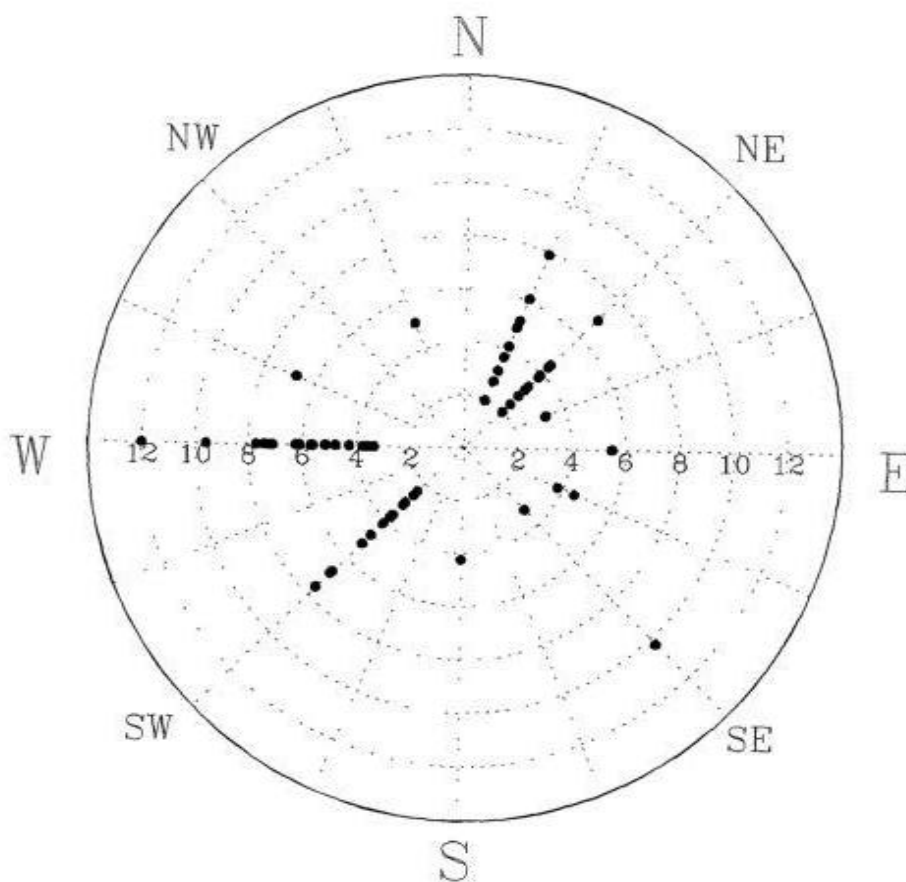


Εικόνα 3.53

Συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be στον επιφανειακό αέρα στη Θεσσαλονίκη ($\sim 40^\circ\text{N}, 23^\circ\text{E}$) συναρτήσει της σχετικής υγρασίας. (Ioannidou, 2012)

3.7.6 Συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου

Όσον αφορά στην κατανομή των συγκεντρώσεων ^7Be στις διάφορες διευθύνσεις πνοής των ανέμων, διαπιστώθηκε για την περιοχή της Θεσσαλονίκης ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις του σημειώνονται σε περιόδους πνοής ανέμων με κυρίαρχη διεύθυνση Δυτική (W) και Νοτιοδυτική (SW) (Εικόνα 3.54). Οι Δυτικοί και Νοτιοδυτικοί άνεμοι συνδέονται με τη θαλάσσια αύρα που πνέει ιδιαίτερα κατά τις μεσημβρινές ώρες της ημέρας (Ιωαννίδου, 1995).



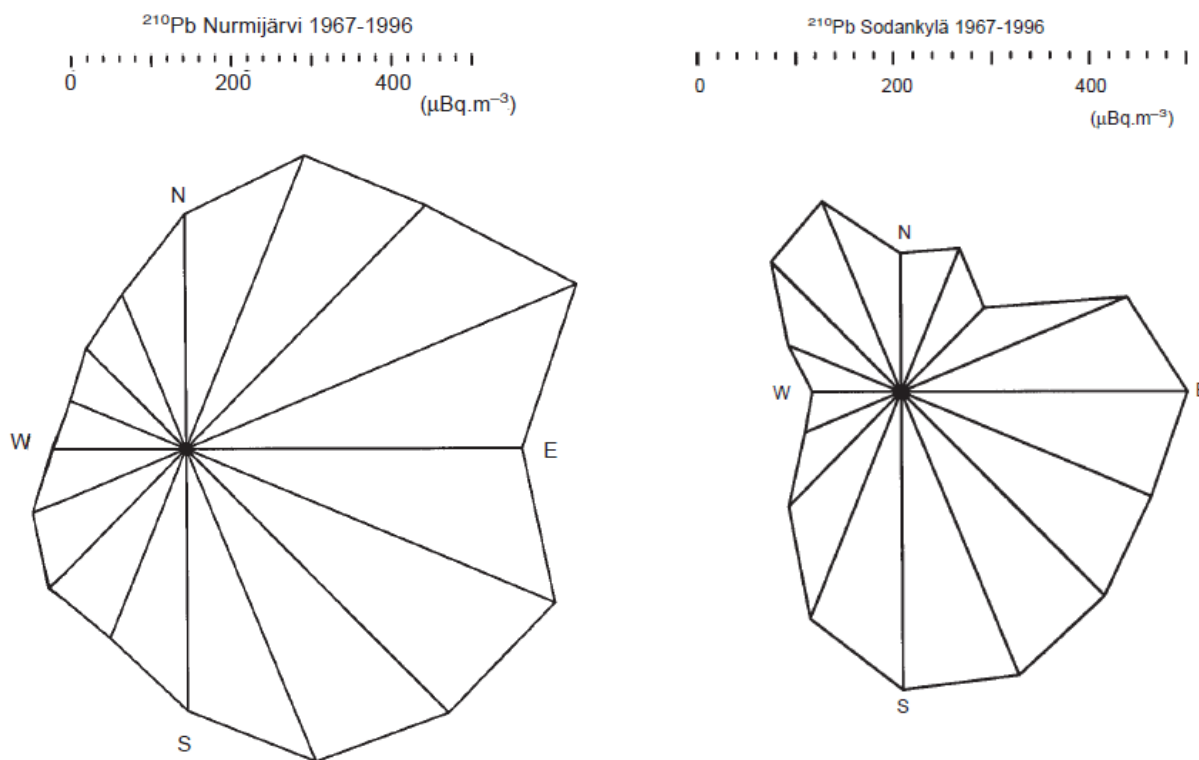
Εικόνα 3.54

Κατανομή ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων ^7Be (mBq m^{-3}) με τη διεύθυνση του ανέμου. Υψηλές συγκεντρώσεις σημειώνονται σε ώρες πνοής δυτικών ανέμων, οι οποίοι συνδέονται με τη θαλάσσια αύρα κατά τις μεσημβρινές ώρες στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

[Οι δειγματοληψίες του ατμοσφαιρικού αέρα πραγματοποιήθηκαν σε τακτά και συνεχή χρονικά διαστήματα στη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου, αλλά και ανά δύο μέρες στη διάρκεια ενός μήνα: 4 διαδοχικές δειγματοληψίες διάρκειας 6 ωρών η καθεμία στις 22/4/1992, 8 διαδοχικές δειγματοληψίες διάρκειας 3 ωρών η καθεμία στις 24/6/1992 και 15 δειγματοληψίες ανά δύο ημέρες διάρκειας 24 ωρών η καθεμία τον Νοέμβριο 1993. Να σημειωθεί ότι οι δειγματοληψίες του Απριλίου και Ιουνίου πραγματοποιήθηκαν σε περίοδο χωρίς βροχοπτώσεις, ενώ επιλέχθηκε ο μήνας Νοέμβριος διότι χαρακτηρίζεται από μικρά ύψη βροχοπτώσεων]. (Ιωαννίδου, 1995)

Πάντως, οι συγκεντρώσεις του ^7Be στον επιφανειακό αέρα είναι πρακτικά ανεξάρτητες από τον άνεμο, επιβεβαιώνοντας την κοσμική του προέλευση, ενώ οι συγκεντρώσεις του γεωγενούς $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ επηρεάζονται από αυτόν (Duenas et al., 2003). Λόγω της εδαφικής προέλευσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, οι ηπειρωτικές αέριες μάζες περιέχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του, σε αντίθεση με τις θαλάσσιες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρές συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Επομένως, είναι αναμενόμενο οι τιμές των συγκεντρώσεών του να εξαρτώνται από την κατεύθυνση του ανέμου.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η συγκέντρωση $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ που συλλέγεται στον Βόρειο Ειρηνικό είναι ~2 φορές μεγαλύτερη από εκείνη στον Νότιο Ειρηνικό, αντικατοπτρίζοντας τη μεγαλύτερη αναλογία ξηράς/θάλασσας του Βόρειου Ημισφαιρίου συγκριτικά με αυτή του Νότιου (Baskaran, 2011). Επίσης, στη Λισαβόνα, Πορτογαλία, οι χαμηλότερες τιμές της συγκέντρωσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ αντιστοιχούν σε ωκεάνιες αέριες μάζες (Carvalho, 1995). Παρόμοια, οι χαμηλότερες τιμές που μετρήθηκαν στο σταθμό Svalbard στη Φινλανδία, σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές άλλων σταθμών στα βόρεια της χώρας, αποδόθηκαν στις αέριες μάζες που προέρχονταν από τον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό, τη Γροιλανδία και την Καναδική Αρκτική (Paatero et al., 2003). Επιπλέον, στη Φινλανδία, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται όταν πνέουν ανατολικοί άνεμοι, οι οποίοι μεταφέρουν ηπειρωτικές αέριες μάζες, που προέρχονται από περιοχές υψηλών πιέσεων πάνω από την Κεντρική Ρωσία. Από την άλλη, οι μικρότερες συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ παρατηρούνται όταν πνέουν δυτικοί άνεμοι, οι οποίοι μεταφέρουν θαλάσσιες αέριες μάζες, που σχετίζονται με τους κυκλώνες του Βόρειου Ατλαντικού (Paatero et al., 1998) (Εικόνα 3.55).



Εικόνα 3.55

Μέσες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ως συνάρτηση της διεύθυνσης του ανέμου σε δύο σταθμούς δειγματοληψίας στη Φινλανδία, για την 30ετή χρονική περίοδο 1967-1996.

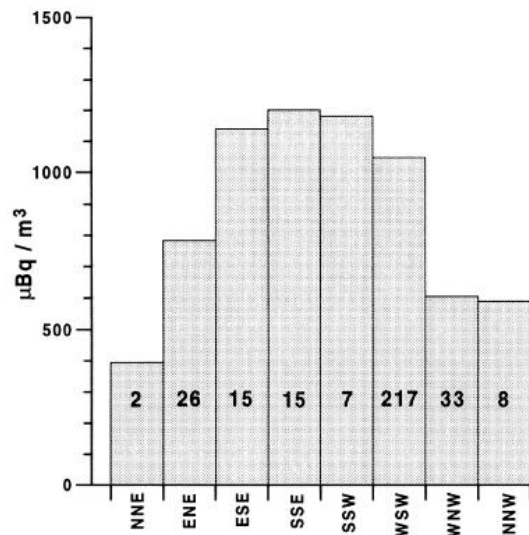
(Paatero et al., 1998)

Άλλο ένα παράδειγμα της επίδρασης της προέλευσης του ανέμου στη συγκέντρωση ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα παρουσιάζεται από τους Cannizzaro et al. (2004), όπου λόγω της γεωγραφικής θέσης του Παλέρμο, Ιταλία, οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ αντιστοιχούν σε τέσσερις διευθύνσεις του ανέμου, οι οποίες φέρνουν θαλάσσιες αέριες μάζες (Εικόνα 3.56).

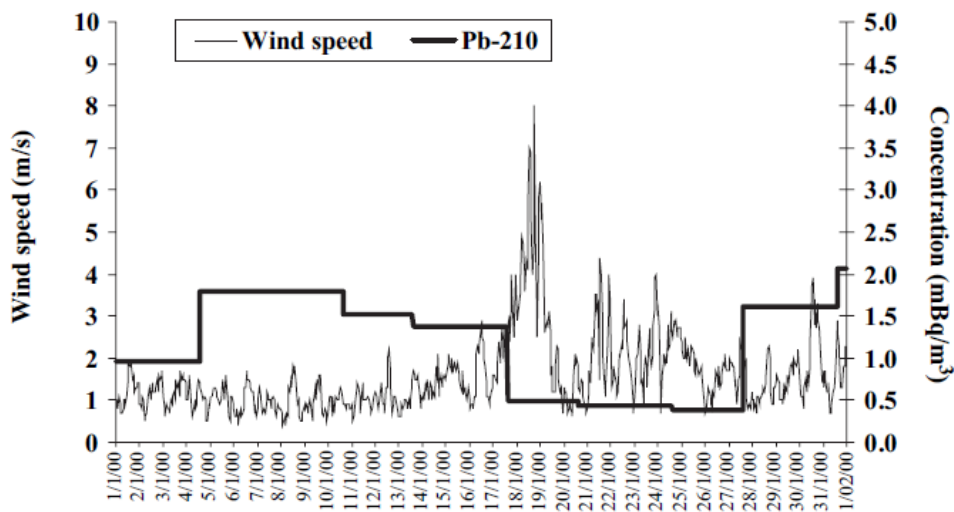
Εικόνα 3.56

Μέση συγκέντρωση ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα στο Παλέρμο, Ιταλία, συναρτήσει της διεύθυνσης του ανέμου για τη χρονική περίοδο Σεπτέμβριος 1995-Δεκέμβριος 1996 (οι αριθμοί δείχνουν τη συχνότητα των δειγμάτων).

(Cannizzaro et al., 2004)



Επίσης, από μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε κοιλάδα κοντά στο Μιλάνο στην Ιταλία (Vecchi et al., 2005), βρέθηκε μια αρνητική συσχέτιση ($R = -0,7$) μεταξύ των εβδομαδιαίων συγκεντρώσεων $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και της μέσης ταχύτητας του ανέμου κατά την ίδια περίοδο. Οι ελάχιστες συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ απαντώνται όταν οι ταχύτητες των ανέμων είναι υψηλές και αέριες μάζες, προερχόμενες από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, αναπληρώνουν τον στάσιμο αέρα πάνω από την κοιλάδα. Οι υψηλές συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ παρατηρούνται κατά τη διάρκεια παρατεταμένων αντικυκλωνικών⁽¹⁴⁾ συνθηκών υψηλών πιέσεων ή όταν επικρατεί στην κοιλάδα αναστροφή θερμοκρασίας⁽¹⁴⁾ διάρκειας λίγων ημερών.



Εικόνα 3.57

Ταχύτητα του ανέμου και συγκέντρωση ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, που καταγράφηκαν σε κοιλάδα στο Μιλάνο, Ιταλία, τον Ιανουάριο 2000. [Πολύ ισχυροί άνεμοι παρατηρήθηκαν την περίοδο 17-19 Ιανουαρίου].

(Vecchi et al., 2005)

⁽¹⁴⁾ Βλ. Παράρτημα Β (Β.2 και Β.4)

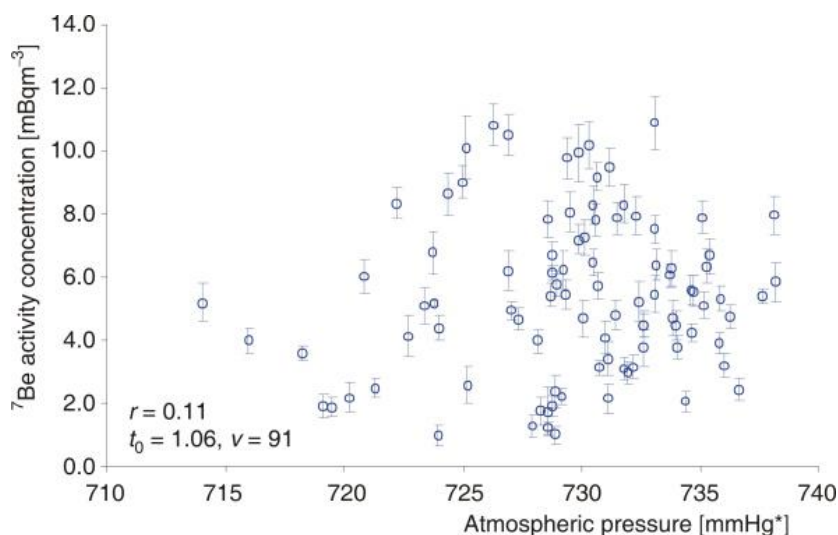
3.7.7 Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα και της ατμοσφαιρικής πίεσης

Γενικά, οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ παρουσιάζουν χαμηλές τιμές κατά τις περιόδους χαμηλών ατμοσφαιρικών πιέσεων και το αντίστροφο. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς οι χαμηλές ατμοσφαιρικές πιέσεις (κυκλωνικές συνθήκες)⁽¹⁵⁾ σχετίζονται με επεισόδια έντονων βροχοπτώσεων και κατά συνέπεια με χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας στον επιφανειακό αέρα λόγω της διεργασία της απόπλυσης (washout).

Πράγματι, οι Cannizzaro et al. (2004) αναφέρουν υψηλές συγκεντρώσεις ^7Be στον επιφανειακό αέρα στο Παλέρμο (~ 38°N, 13°E), Ιταλία, για 7ετή διάρκεια μελέτης (1995-2002), σε περίοδο λίγων κατακρημνίσεων και υψηλών θερμοκρασιών (δηλ., αντικυκλωνικών συνθηκών)⁽¹⁵⁾ καθώς, λόγω της εντονότερης κατακόρυφης προς τα κάτω ανάμιξης της ατμόσφαιρας, μεταφέρθηκαν ραδιενεργά ισότοπα κοσμικής προέλευσης στον επιφανειακό αέρα (βλ. επίσης § 3.7.4). Παρόμοια, οι Vecchi et al., 2005 αναφέρουν υψηλές συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα στο Μιλάνο (~ 45°N, 9°E), Ιταλία, για 2ετή περίοδο μελέτης (2000-2001), κατά τη διάρκεια παρατεταμένων αντικυκλωνικών συνθηκών υψηλών πιέσεων, λόγω της στασιμότητας των προϊόντων του ^{222}Rn κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (βλ. επίσης §3.7.6).

Η Εικόνα 3.59, a, b, δείχνει τη συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , αντίστοιχα, στον επιφανειακό αέρα στο Εδιμβούργο (56°N, 3°W), UK, για μελέτη χρονικής διάρκειας ενός έτους (Ιούλιο 2002 έως Ιούνιο 2003) (Likuku, 2006), η οποία συμφωνεί με τις παραπάνω διαπιστώσεις. Εξαιρέση αποτελούν οι καλοκαιρινοί μήνες Ιούλιος/Αύγουστος 2002 και η περίοδος τέλη Μαρτίου έως αρχές Απριλίου 2003, όπου παρατηρήθηκαν χαμηλές συγκεντρώσεις και των δύο αυτών ραδιενεργών ισότοπων σε συνθήκες υψηλής ατμοσφαιρικής πίεσης, γεγονός που αποδόθηκε σε βροχοπτώσεις που συνέβησαν εκείνες τις περιόδους, με αποτέλεσμα να κυριαρχήσει η διεργασία της απόπλυσης.

Πάντως, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (~ 38°N, 23°E), για 2ετή χρονική διάρκεια μελέτης (3/2008 - 4/2010), δεν παρατηρήθηκε συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be και της ατμοσφαιρικής πίεσης (Εικόνα 3.58, Papandreou et al, 2011).

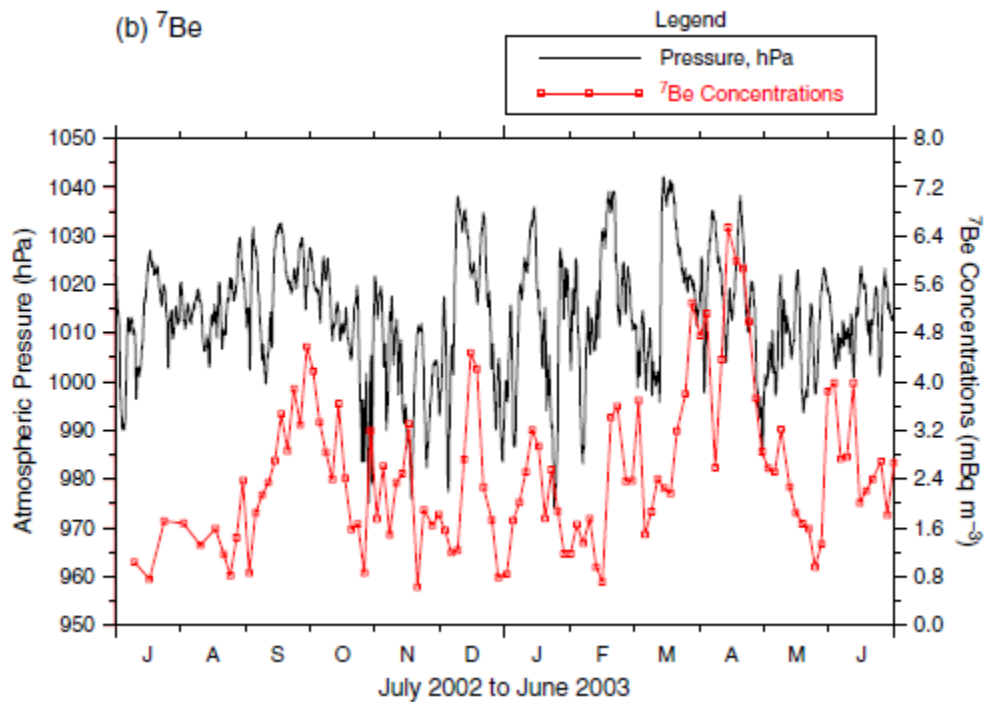
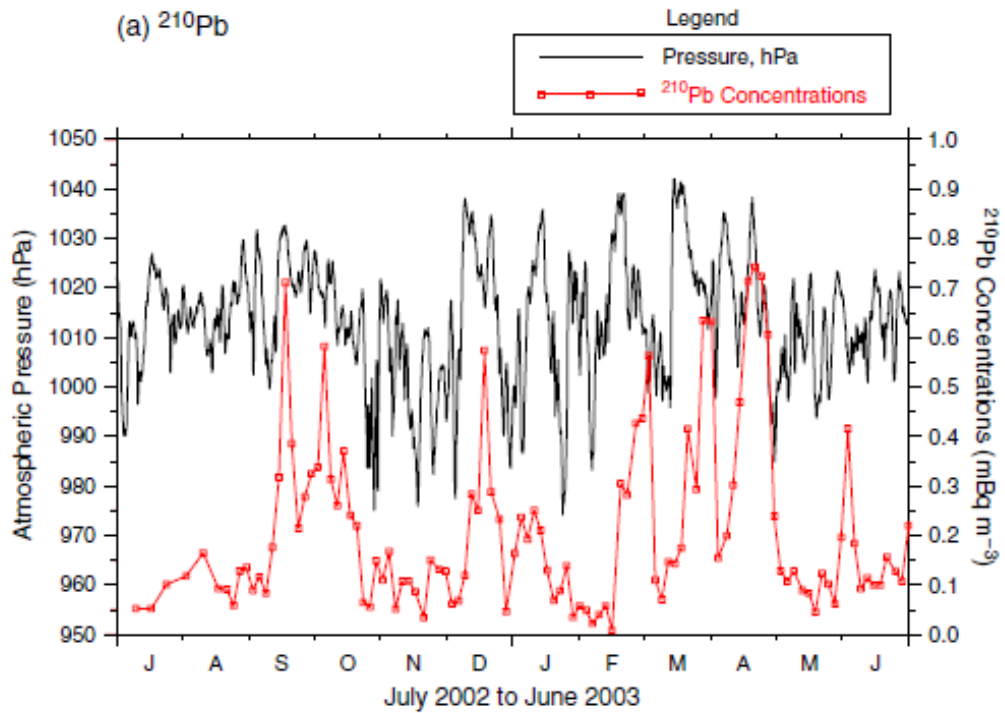


Εικόνα 3.58

Συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be στον επιφανειακό αέρα στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (~ 38°N, 23°E) συναρτήσεως της ατμοσφαιρικής πίεσης για τη 2ετή χρονική περίοδο της μελέτης (3/2008 - 4/2010).

(Papandreou et al., 2011).

⁽¹⁵⁾ Βλ. Παράρτημα Β.3, Εικόνα Β.6



Εικόνα 3.59

Κύμανση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των (a) $^{210}\text{Pb}_{ex}$ και (b) ^7Be με την ατμοσφαιρική πίεση στον επιφανειακό αέρα στο Εδιμβούργο (56°N , 3°W), UK, για μελέτη χρονικής διάρκειας ενός έτους (Ιούλιο 2002 έως Ιούνιο 2003). (Likuku, 2006)

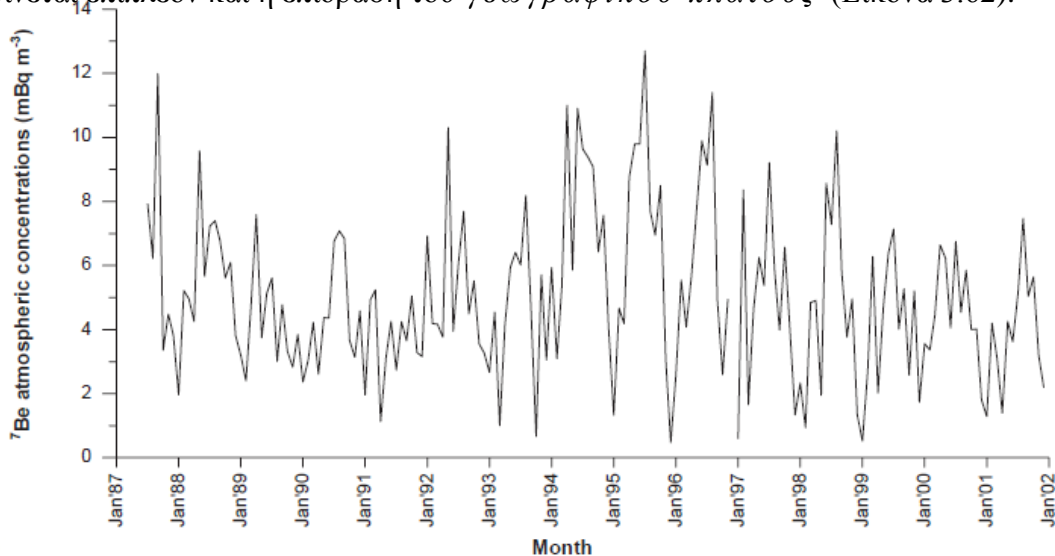
3.8 Χρονικές μεταβολές της συγκέντρωσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Στην §3.7 εξετάσαμε τις διεργασίες και τους παράγοντες που σχετίζονται με τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα κι ερμηνεύσαμε με ποιο τρόπο επηρεάζουν τη συγκέντρωσή τους στον επιφανειακό αέρα. Στην §3.8, θα ασχοληθούμε με τη χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεών τους. Όπως θα διαπιστώσουμε, οι διεργασίες και οι παράγοντες, που έχουμε ήδη εξετάσει, εμπλέκονται *συνδυαστικά* στην ερμηνεία των χρονικών μεταβολών των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των υπό μελέτη ισοτόπων σε ετήσια, εποχιακή ή/και ημερήσια κλίμακα.

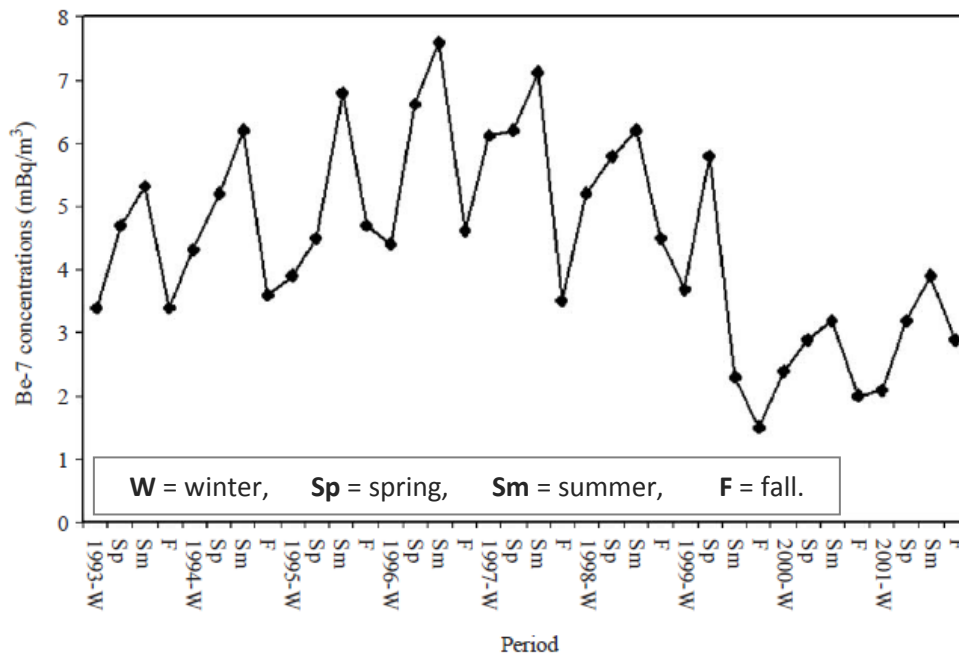
3.8.1 Πολυετείς μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Οι τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στον επιφανειακό αέρα των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης: ^7Be , ^{10}Be και ^{22}Na καθορίζονται από έναν σύνθετο συνδυασμό παραγόντων, οι οποίοι περιλαμβάνουν: την **ηλιακή δραστηριότητα**, την **ανταλλαγή στρατοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα** και την **κατακόρυφη ανάμιξη** αερίων μαζών, οι οποίες είναι διεργασίες που παρουσιάζουν διαφορές σε τοποθεσίες με διαφορετικά **γεωγραφικά πλάτη**, την **οριζόντια μεταφορά** αερίων μαζών τη συχνότητα και την ποσότητα των **κατακρημνίσεων** καθώς και από τη μεταβολή ορισμένων **μετεωρολογικών παραμέτρων**.

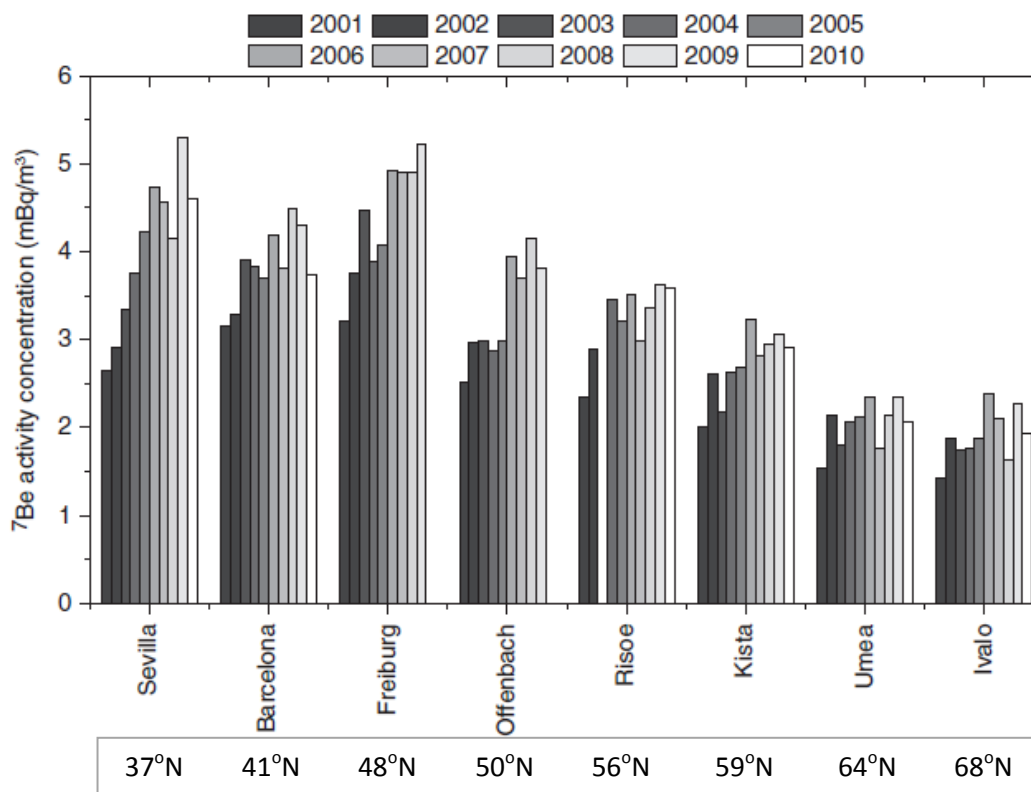
Σε διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται μια πολυετής χρονική κύμανση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be , όπως αυτά των Εικόνων 3.60 και 3.61, είναι δυνατό να διακρίνονται η επίδραση της **ηλιακής δραστηριότητας** καθώς επίσης και οι επαναλαμβανόμενες δομές των **εποχιακών τάσεων**. Επίσης, σε διαγράμματα, στα οποία, εκτός από τη χρονική απεικονίζεται και η χωρική μεταβολή της συγκέντρωσης ^7Be , διακρίνεται **επιπλέον** και η επίδραση του **γεωγραφικού πλάτους** (Εικόνα 3.62).



Εικόνα 3.60 Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης ^7Be στον επιφανειακό αέρα στη Θεσσαλονίκη (~ 40°N, 23°E), για τη 15ετή χρονική περίοδο 1987-2001. (Ioannidou et al., 2005)



Εικόνα 3.61 Χρονική κύμανση της συγκέντρωσης ^7Be στον επιφανειακό αέρα στη Granada, Ισπανία (~ 37°N, 4°W), για την 9ετή χρονική περίοδο 1993-2001. (Azahra et al., 2003)



Εικόνα 3.62 Χρονική (2001-2010) και χωρική (από μικρότερα προς μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη) κύμανση της συγκέντρωσης ^7Be στον αέρα σε 8 επιλεγμένους δειγματοληπτικούς σταθμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης (βλ. χάρτη Εικόνας 3.37). (Hernandes-Ceballos et al., 2016)

3.8.2 Εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Οι εποχιακές μεταβολές των συγκεντρώσεων ^7Be στον επιφανειακό αέρα εξαρτώνται από τις εξής διεργασίες (Feely et al., 1989):

- την υγρή σάρωση (wet scavenging),
- την ανταλλαγή στρατοσφαιρικού-τροποσφαιρικού αέρα (stratosphere-to-troposphere exchange, STE)⁽¹⁶⁾,
- την κατακόρυφη μεταφορά (vertical transport)⁽¹⁶⁾ αέρα μέσα στην τροπόσφαιρα και
- την οριζόντια μεταφορά (horizontal transfer)⁽¹⁶⁾ αέρα μέσα στην τροπόσφαιρα από τα μεσαία στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη και από τα υποτροπικά στα χαμηλότερα.

Καθεμία από αυτές τις διεργασίες ακολουθεί τους δικούς της εποχιακούς κύκλους με αποτέλεσμα σε διαφορετικές τοποθεσίες να κυριαρχούν διαφορετικές διεργασίες.

• Υγρή σάρωση στις υποτροπικές περιοχές

Στις υποτροπικές περιοχές επικρατεί η σάρωση από την κατακρήμνιση, με αποτέλεσμα οι τοπικές κατακρημνίσεις⁽¹⁷⁾ και οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα να παρουσιάζουν μια έντονη αρνητική συσχέτιση (πίνακας Εικόνας 3.63 και διαγράμματα Εικόνων 3.64 a, b, c).

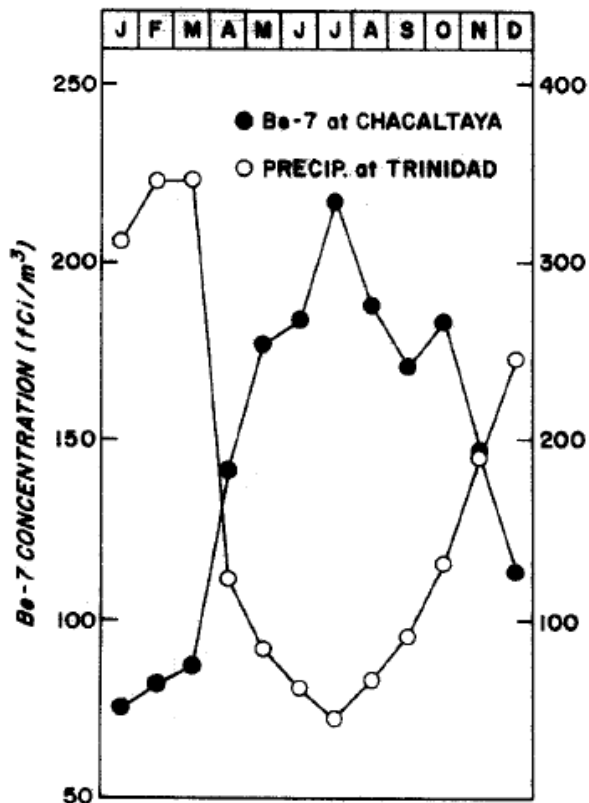
Εικόνα 3.63

Πίνακας με τις τιμές των συντελεστών συσχέτισης, r , και τις τιμές r^2 από την παλινδρόμηση των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων ^7Be (fCi m^{-3}) στη μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm), στις ίδιες ή κοντινές τοποθεσίες. (Feely et al., 1989)

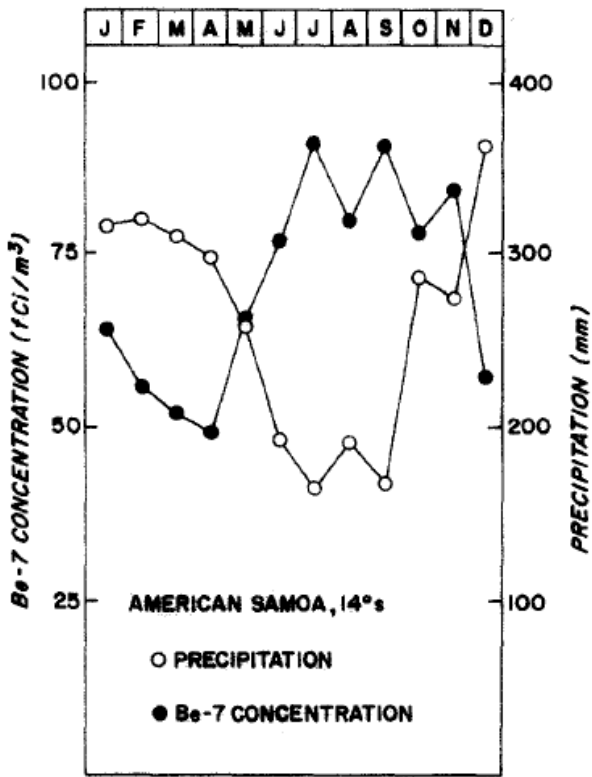
	Sampling site	Latitude	Longitude	Altitude (m)	r	r^2 (%)
^7Be site	Chacaltaya	16° 21' S	68° 07' W	5220		
Precipitation site	Trinidad	14° 45' S	64° 48' W	236	- 0.96	92
Precipitation site	Apolo	14° 43' S	68° 30' W	1382	- 0.91	83
Precipitation site	El Alto	16° 30' S	68° 12' W	4105	- 0.91	83
Precipitation site	Santa Cruz	17° 47' S	63° 11' W	437	- 0.85	73
^7Be site	Balboa	08° 58' N	79° 34' W	23		
Precipitation site	Balboa	08° 58' N	79° 33' W	31	- 0.91	82
^7Be site	GMCC, Samoa	14° 15' S	170° 34' W	77		
Precipitation site	Pago Pago	14° 20' S	170° 43' W	3	- 0.81	66

⁽¹⁶⁾ Βλ. Παράρτημα Β (B.4, B.5)

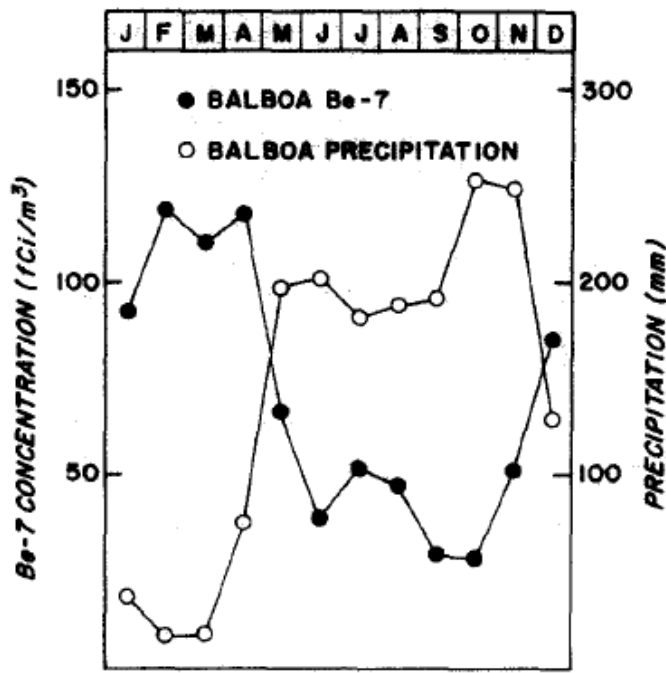
⁽¹⁷⁾ Βλ. Παράρτημα Β.9



(a)



(b)



(c)

Εικόνα 3.64

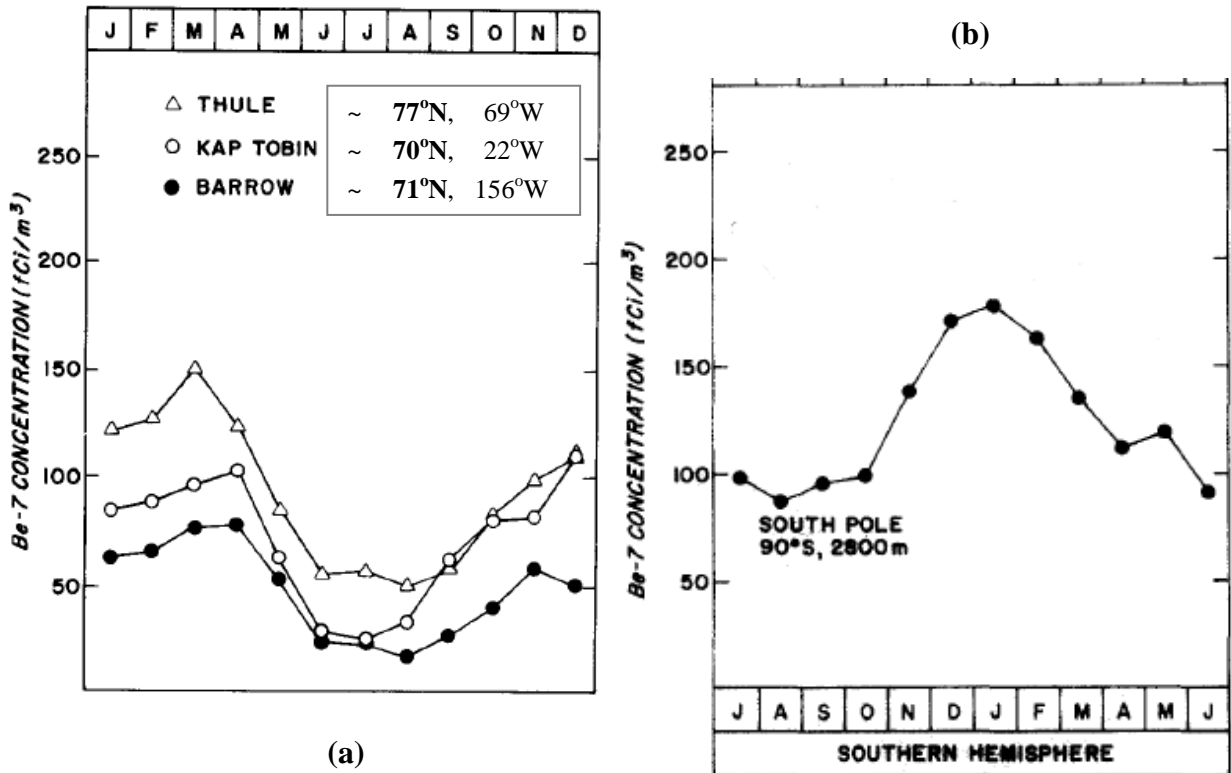
- (a) Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ⁷Be στη Chacaltaya (~16°S) και μέσες μηνιαίες κατακρημνίσεις στη Trinidad (~14°S), Βολιβία.
- (b) Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ⁷Be στη Samoa (~14°S), Αμερική και μέσες μηνιαίες κατακρημνίσεις στο Pago Pago (~14°S).
- (c) Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ⁷Be και μέσες μηνιαίες κατακρημνίσεις στη Balboa (~9°N).

(Feely et al., 1989)

[100 fCi m⁻³ = 3,7 mBq m⁻³]

• **Οριζόντια μεταφορά αέρα στις πολικές περιοχές**

Οι **Αρκτικές περιοχές** παρουσιάζουν καθυστερημένα χειμωνιάτικα και πρώιμα εαρινά μέγιστα (Εικόνα 3.65.a). Αυτά τα μέγιστα συμπίπτουν με την άφιξη αερολυμάτων (αχλός, haze)⁽¹⁸⁾ προερχόμενων από αέριους ρυπαντές που εκπέμπονται από περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών της Ασίας, Ευρώπης και Βόρειας Αμερικής. Η εξαφάνιση της αχλός την άνοιξη συνοδεύεται από μια σαφή μείωση της συγκέντρωσης ⁷Be, γεγονός που επιβεβαιώνει την άποψη ότι η εισαγωγή ⁷Be στη χαμηλότερη τροπόσφαιρα της Αρκτικής είναι κυρίως αποτέλεσμα της οριζόντιας μεταφοράς από τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη. Το καλοκαίρι, η σταθερότητα των πολικών και αρκτικών αερίων μαζών⁽¹⁹⁾ αναχαιτίζει την κατακόρυφη μεταφορά ⁷Be από την πολική ανώτερη τροπόσφαιρα στην επιφάνεια της γης. Στην **Ανταρκτική** υπάρχει μια εμφανής εποχιακή μεταβολή στις συγκεντρώσεις του ⁷Be. Κατά τη διάρκεια των θερμότερων μηνών, οι συγκεντρώσεις του είναι υψηλές αλλά, κατά τη διάρκεια των ψυχρότερων μηνών, μειώνονται (Εικόνα 3.65.b). Επειδή η σταθερότητα των αερίων μαζών πάνω από την Ανταρκτική αναχαιτίζει την κατακόρυφη μεταφορά αέρα, εμποδίζοντας τον πολικό στρατοσφαιρικό αέρα και το ⁷Be που περιέχει να εισβάλλει άμεσα στα χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας πάνω από την Ανταρκτική, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η πιο πιθανή πηγή ⁷Be που φθάνει στο Νότιο Πόλο η οριζόντια μεταφορά αέρα από τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη του νότιου ημισφαιρίου.



Εικόνα 3.65 Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ⁷Be (100 fCi m⁻³ = 3,7 mBq m⁻³) σε(a) τρεις **Αρκτικές** τοποθεσίες και (b) στην **Ανταρκτική** στο σταθμό του Νότιου Πόλου. (Feely et al.,1989)

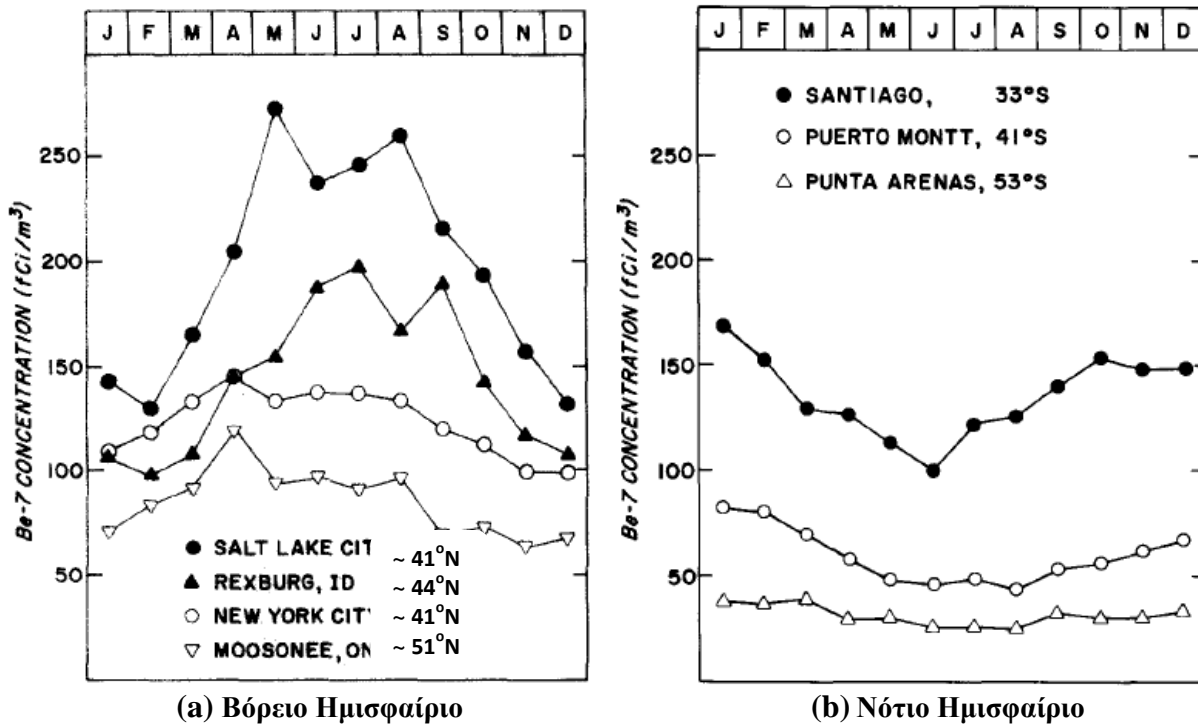
⁽¹⁸⁾ Βλ. Παράρτημα Γ.2

⁽¹⁹⁾ Βλ. Παράρτημα Β.8

- Ανταλλαγή στρατοσφαιρικού – τροποσφαιρικού αέρα και κατακόρυφη μεταφορά αερίων μαζών μέσα στην τροπόσφαιρα στις περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών

Η στρατοσφαιρική – τροποσφαιρική ανταλλαγή αερίων μαζών παρουσιάζει μέγιστο κατά τη διάρκεια της άνοιξης ή του καλοκαιριού κοντά στο πολικό μέτωπο και τους υποτροπικούς αεροχειμάρους (jet streams)⁽²⁰⁾, με αποτέλεσμα ο ετήσιος κύκλος του ⁷Be σε τοποθεσίες μεσαίων γεωγραφικών πλατών, ιδιαίτερα σε μεγάλα υψόμετρα, να κυβερνάται από αυτή τη διεργασία. Επίσης, η τροπόσφαιρα είναι λιγότερο σταθερή το καλοκαίρι από ό,τι τον χειμώνα, με αποτέλεσμα το καλοκαίρι να συμβαίνει εντονότερη κατακόρυφη προς τα κάτω μεταφορά (convective circulation)⁽²¹⁾, και οι τοποθεσίες των μεσαίων γεωγραφικών πλατών να παρουσιάζουν μέγιστες συγκεντρώσεις ⁷Be κατά την περίοδο του καλοκαιριού.

Έτσι, σε πολλές τοποθεσίες μεσαίων γεωγραφικών πλατών στο βόρειο και στο νότιο ημισφαίριο, οι συγκεντρώσεις ⁷Be είναι υψηλότερες κατά τη διάρκεια των θερμότερων εποχών και χαμηλότερες κατά τη διάρκεια των ψυχρότερων (Εικόνες 3.66 a, b). Παρόμοια, στα διαγράμματα των Εικόνων 3.67, 3.68 και 3.69, γίνεται εμφανής η εποχιακή τάση των συγκεντρώσεων του ⁷Be σε τοποθεσίες μεσαίων γεωγραφικών πλατών, με τις μέγιστες τιμές τους να παρατηρούνται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και τις ελάχιστες κατά τους χειμερινούς.



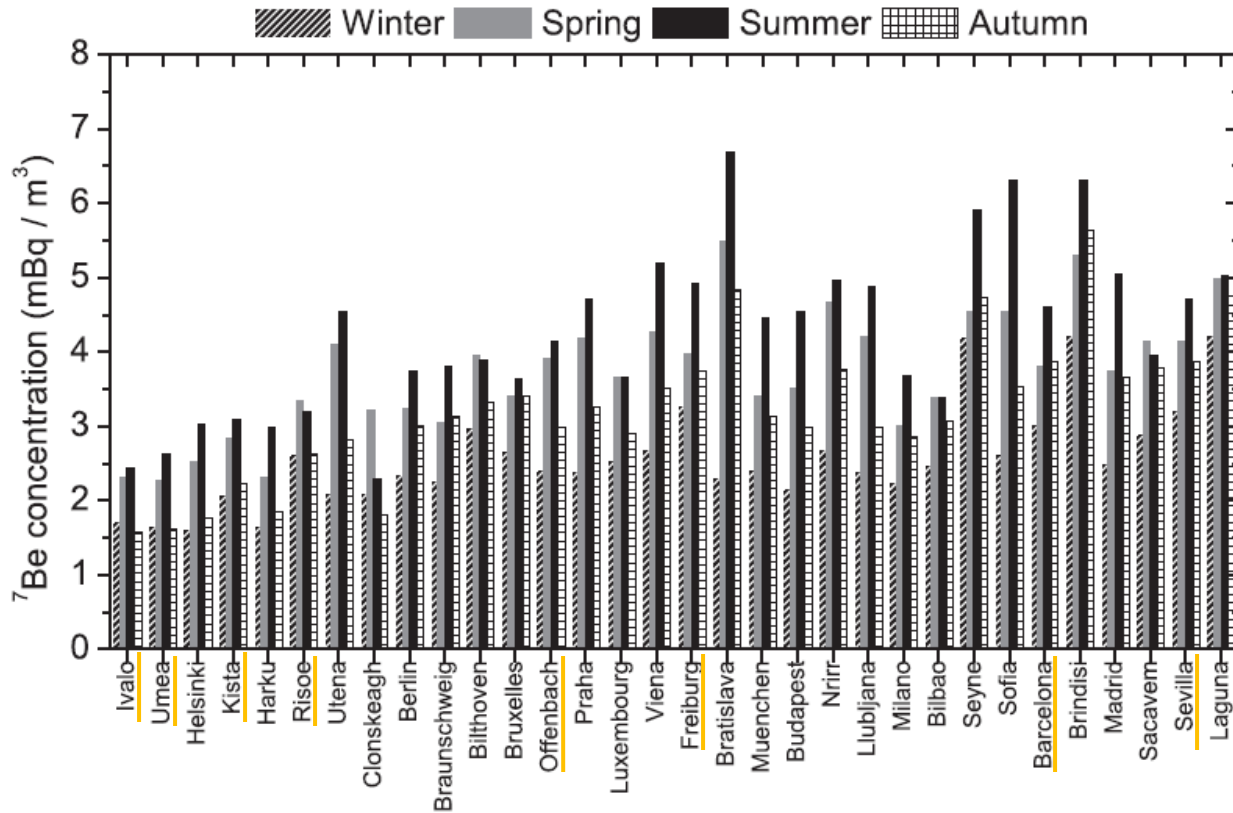
Εικόνα 3.66

Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ⁷Be ($100 \text{ fCi m}^{-3} = 3,7 \text{ mBq m}^{-3}$) σε τοποθεσίες μεσαίων γεωγραφικών πλατών: (a) στο βόρειο και (b) στο νότιο ημισφαίριο.

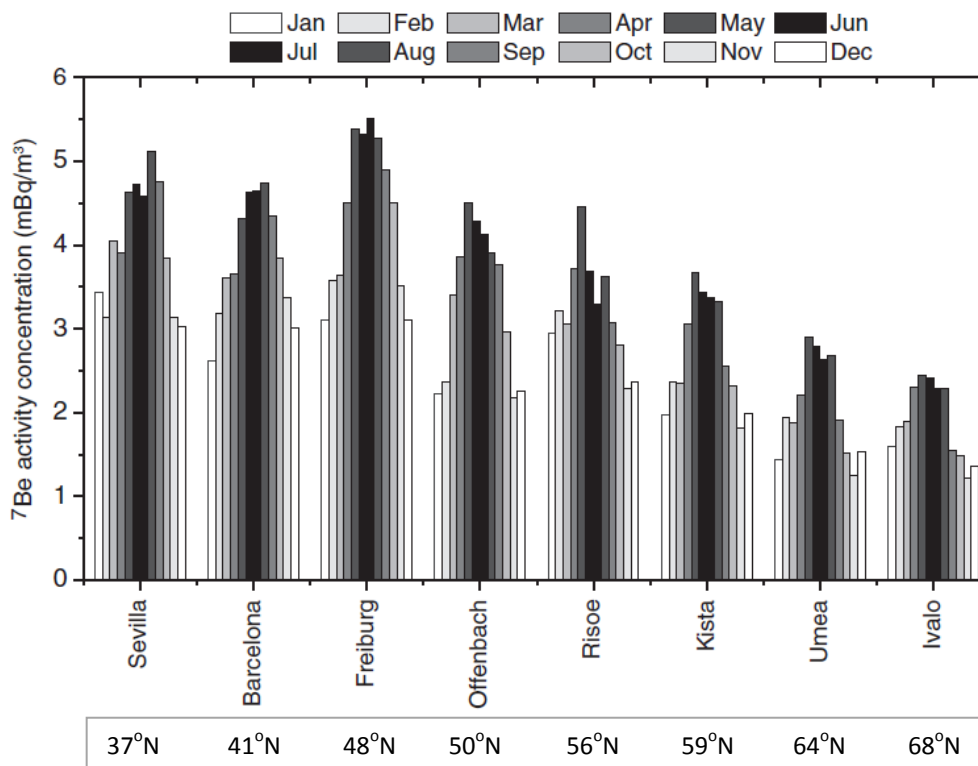
(Feely et al., 1989)

⁽²⁰⁾ Βλ. Παράρτημα Γ.2

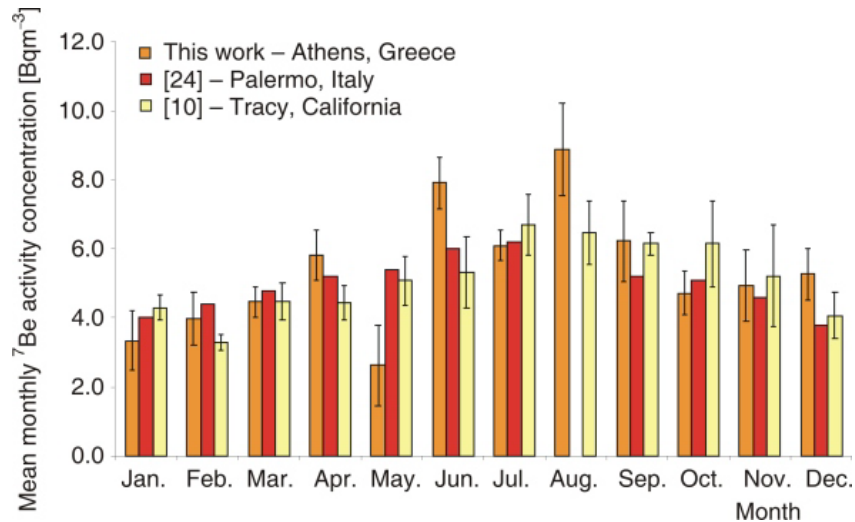
⁽²¹⁾ Βλ. Παράρτημα Β.8



Εικόνα 3.67 Εποχιακή και χωρική (από μεγαλύτερα προς μικρότερα γεωγραφικά πλάτη) κύμανση της συγκέντρωσης ^7Be στον αέρα σε 32 δειγματοληπτικούς σταθμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης (βλ. χάρτη Εικόνας 3.37). (Hernandes-Ceballos et al., 2015)



Εικόνα 3.68 Μηνιαία και χωρική μεταβλητότητα (από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη) των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be στον αέρα σε 8 δειγματοληπτικούς σταθμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης (βλ. χάρτη Εικόνας 3.37). (Hernandes-Ceballos et al., 2016)



Εικόνα 3.69

Μέση μηνιαία συγκέντρωση ραδιενέργειας ⁷Be στον επιφανειακό αέρα στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (~38°N, 23°E, 195m asl), όπως προέκυψε από δειγματοληψία, που κάλυψε την περίοδο 2 ετών (Μάρτιος 2008 έως Απρίλιος 2010), με μία 4ωρη συλλογή δείγματος ανά εβδομάδα. Γίνεται σύγκριση με αντίστοιχα μηνιαία δεδομένα άλλων ερευνητών ([24]: Cannizzaro et al., 2004, [10]: Feely et al., 1989) για τοποθεσίες παρόμοιων γεωγραφικών πλατών (~38°N).

(Papandreou et al., 2011)

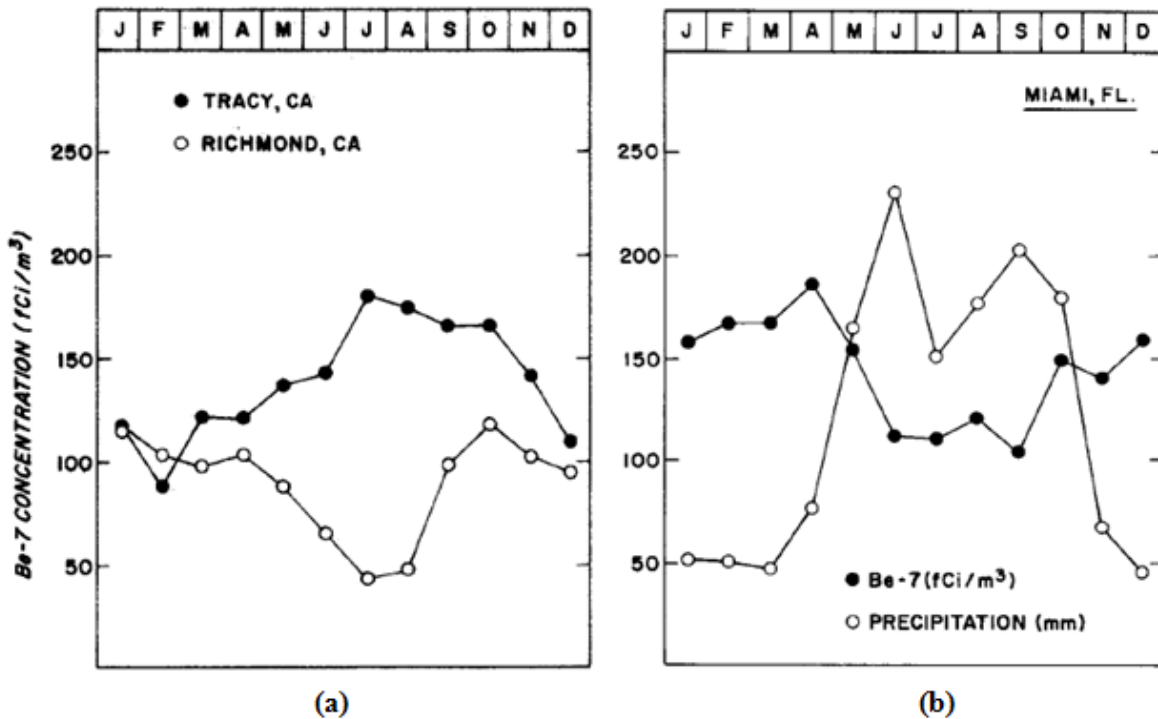
Οι υψηλές συγκεντρώσεις ⁷Be που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των θερμών καλοκαιρινών μηνών σε τοποθεσίες μεσαίων γεωγραφικών πλατών μπορούν να αποδοθούν:

- Στην έντονη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εντονότερη **κατακόρυφη μεταφορά αερίων μαζών** και συγκεκριμένα τη μεταφορά θερμότερου αέρα από την επιφάνεια της γης προς τα πάνω και την άφιξη αέρα από υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα, με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ⁷Be, προς την επιφάνεια της γης. Αυτή η κατακόρυφη κυκλοφορία αντικατοπτρίζεται από τη **θετική συσχέτιση** που παρατηρείται μεταξύ της **συγκέντρωσης ⁷Be** στον επιφανειακό αέρα και της **θερμοκρασίας** (βλ. § 3.7.3).
- Στην **ανύψωση της τροπόπαυσης** κατά τη διάρκεια των θερμών καλοκαιρινών μηνών. Από την άλλη, κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη, το ύψος της τροπόπαυσης και η συγκέντρωση του ⁷Be στον επιφανειακό αέρα είναι χαμηλότερη. Το γεγονός αυτό εκφράζεται μέσω της **θετικής συσχέτισης** που προκύπτει μεταξύ της **συγκέντρωσης ⁷Be** στον επιφανειακό αέρα και του **ύψους της τροπόπαυσης** (βλ. § 3.6.2).
- Στις ξηρές αέριες μάζες που επικρατούν κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από **χαμηλή σχετική υγρασία**. Σε συνθήκες χαμηλής σχετικής υγρασίας, το μέγεθος των σωματιδίων αεροζόλ, άρα και οι ρυθμοί σάρωσης, παραμένουν μικροί. Έτσι, τα σωματίδια αεροζόλ παραμένουν στον ατμοσφαιρικό αέρα, οδηγώντας σε υψηλότερες συγκεντρώσεις του ⁷Be (βλ. § 3.7.7).
- Στην **έλλειψη βροχοπτώσεων** κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, με αποτέλεσμα την απουσία του μηχανισμού της σάρωσης από την κατακρήμνιση και την παραμονή του ατμοσφαιρικού αεροζόλ στον επιφανειακό αέρα (βλ. § 3.7.2).

- **Τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες**

Παγκοσμίως, υπάρχουν αρκετές περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών στις οποίες οι εποχιακές μεταβολές των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be δεν ακολουθούν την τάση που περιγράψαμε παραπάνω, δηλαδή υψηλές συγκεντρώσεις κατά τη διάρκεια των θερμότερων εποχών. Αυτό συμβαίνει διότι, εξαιτίας της τοπογραφίας των περιοχών αυτών, επικρατούν τοπικά φαινόμενα τα οποία υπερισχύουν έναντι των διεργασιών της στρατοσφαιρικής - τροποσφαιρικής ανταλλαγής και της κατακόρυφης μεταφοράς αερίων μαζών. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν ορισμένα παραδείγματα τέτοιων περιοχών.

- Μια εκπληκτική διαφορά υπάρχει μεταξύ των εποχιακών μεταβολών των συγκεντρώσεων ^7Be των περιοχών Tracy (~38°N, 121°W) και Richmond (~38°N, 122°W) στην Καλιφόρνια. Οι συγκεντρώσεις ^7Be στην περιοχή Tracy εμφανίζουν μέγιστο κατά τους θερμούς μήνες, όπως είναι αναμενόμενο, εντούτοις στο Richmond, μια πολύ κοντινή περιοχή με σχεδόν ίδιες γεωγραφικές συντεταγμένες, οι συγκεντρώσεις ^7Be παρουσιάζουν ελάχιστο την ίδια εποχή (Εικόνα 3.70 α). Αυτό συμβαίνει διότι το Richmond βρίσκεται στον κόλπο του San Francisco και, κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, επηρεάζεται από την **παραθαλάσσια ροή του αέρα** που προκαλεί σάρωση του ^7Be καθώς περνά από τα στρώματα ομίχλης που σχηματίζονται πάνω από τα κρύα νερά της ακτής της Καλιφόρνια (Feely et al., 1989).
- Επίσης, οι συγκεντρώσεις ^7Be το Μαϊάμι (~26°N, 80°W) στη Φλόριντα, δεν φαίνεται να εμφανίζουν αύξηση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού εξαιτίας των σφοδρών καλοκαιρινών βροχοπτώσεων, με αποτέλεσμα σε τέτοιες περιοχές να επικρατεί η διεργασία της **σάρωσης από τις βροχοπτώσεις** (Feely et al., 1989).



Εικόνα 3.70 Μέσες συγκεντρώσεις ^7Be ($100 \text{ fCi m}^{-3} = 3,7 \text{ mBq m}^{-3}$) στις πόλεις: (a) Tracy και Richmond στην Καλιφόρνια και (b) Μαϊάμι στη Φλόριντα. (Feely et al., 1989)



Εικόνα 3.71

Η γεωγραφική θέση των πόλεων: (A) Tracy, CA, (B) Richmond, CA και (C) Miami, FL.

- Στο Τόκυο (~ 35°N, 139°E), Ιαπωνία, οι εποχιακές μεταβολές των συγκεντρώσεων ^7Be είναι διαφορετικές από τις αναμενόμενες σε περιοχές παρόμοιων γεωγραφικών πλατών, με τις μέγιστες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ^7Be στον επιφανειακό αέρα να παρατηρούνται την άνοιξη και το φθινόπωρο (Εικόνα 3.72). Αυτή η εποχιακή τάση αποδόθηκε στις ιδιαίτερες μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην Ιαπωνία και συγκεκριμένα στο ζεύγος **αντικυκλώνα και κυκλώνα** (κύματα Rossby)⁽²²⁾, το οποίο περνά από την Ιαπωνία την άνοιξη και το φθινόπωρο και διαρκεί λίγες μέρες (Yoshimori, 2005a). Ο συνδυασμός τέτοιων υψηλών και χαμηλών ατμοσφαιρικών πιέσεων δημιουργεί ροή ψυχρού αέρα προς τα κάτω και ροή θερμού αέρα προς τα πάνω. Μια τέτοια κατακόρυφη ροή αέρα στην τροπόσφαιρα προκαλεί αύξηση της συγκέντρωσης ^7Be την άνοιξη και το φθινόπωρο. Επίσης, στην Ιαπωνία αύξηση της συγκέντρωσης του ^7Be μπορεί να παρατηρηθεί ακόμα και τον χειμώνα ως αποτέλεσμα της επίδρασης του πολύ ψυχρού αέρα που πνέει από τη Σιβηρία κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ο οποίος προσκρούει στις πολύ θερμότερες αέριες μάζες που προέρχονται από τον Ειρηνικό Ωκεανό (Yamamoto et al, 2006).
- Οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ^7Be στον επιφανειακό αέρα στην πόλη Hsinchu (24°N, 121°E), Τάϊβαν είναι μεγαλύτερες τον χειμώνα και το φθινόπωρο και μικρότερες το καλοκαίρι (Εικόνα 3.73). Αυτή η εποχιακή τάση μπορεί να ερμηνευθεί από την επίδραση των **εποχιακών μουσώνων**⁽²³⁾ σε συνδυασμό με τη συγκέντρωση των **αιωρούμενων σωματιδίων**⁽²⁴⁾.

⁽²²⁾ Βλ. Παράρτημα Β.4

⁽²³⁾ Βλ. Παράρτημα Β.6

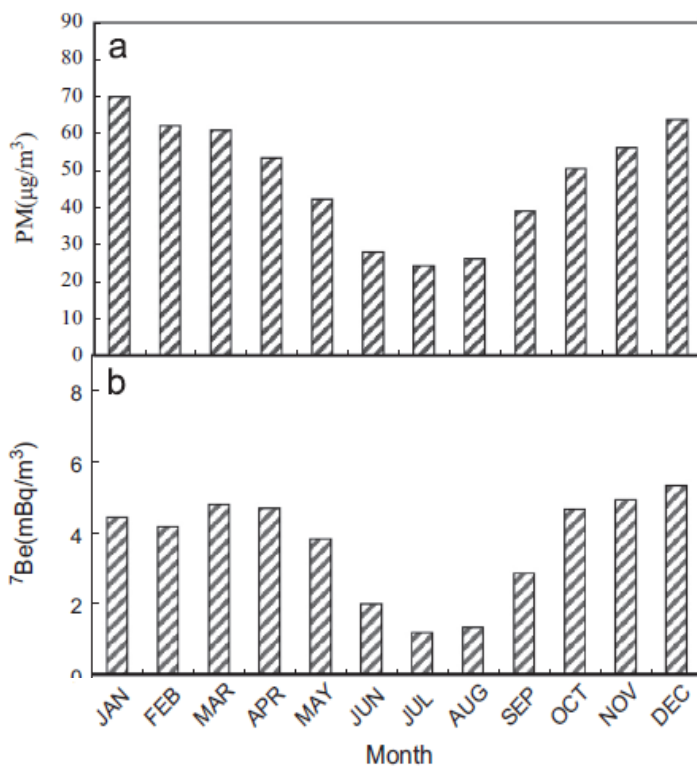
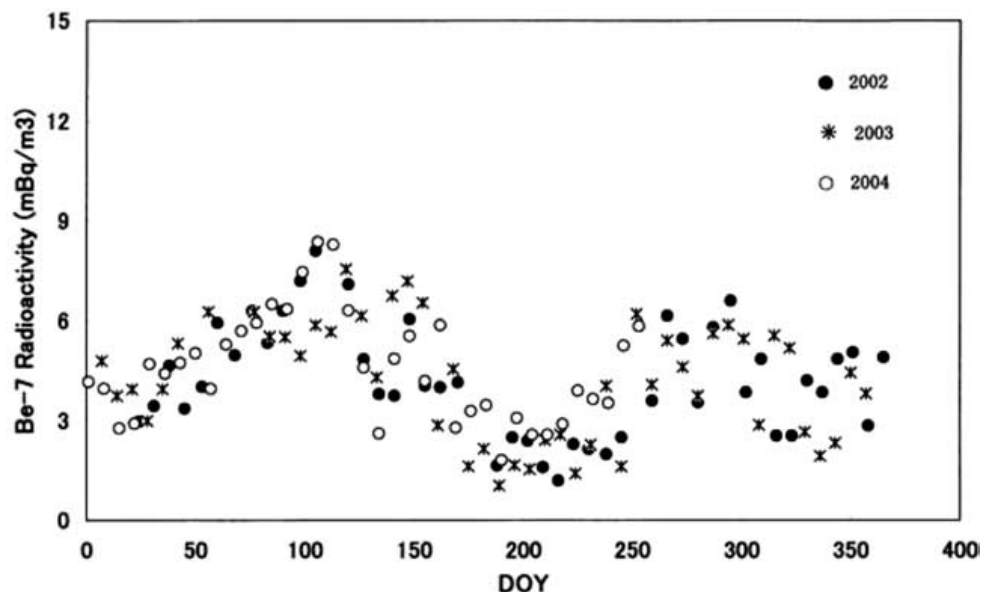
⁽²⁴⁾ Βλ. Παράρτημα Γ

Πιο συγκεκριμένα, οι βορειοανατολικοί μουσώνες από τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα μεταφέρουν αέριες μάζες, οι οποίες περιέχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και ^7Be , σε αντίθεση με τους νοτιοδυτικούς μουσώνες από τα μικρά γεωγραφικά πλάτη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Παρόλο που τα αιωρούμενα σωματίδια και το ^7Be προέρχονται από διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη, ενώνονται και κινούνται μαζί στην Taiwan (Chao et al, 2013). Εντούτοις, από έρευνα σε διάφορες πόλεις της Taiwan δεν βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων ^7Be και αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , ενώ οι εποχιακοί μουσώνες επέφεραν σε όλες παρόμοια ετήσια μεταβολή της συγκέντρωσης ^7Be (Chao et al., 2014).

Εικόνα 3.72

Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be στο Τόκιο (~35°N, 139°E), Ιαπωνία, για τη χρονική περίοδο 2002-2004.

(Yoshimori, 2005a)



Εικόνα 3.73

Εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης:

(a) αιωρούμενων σωματιδίων

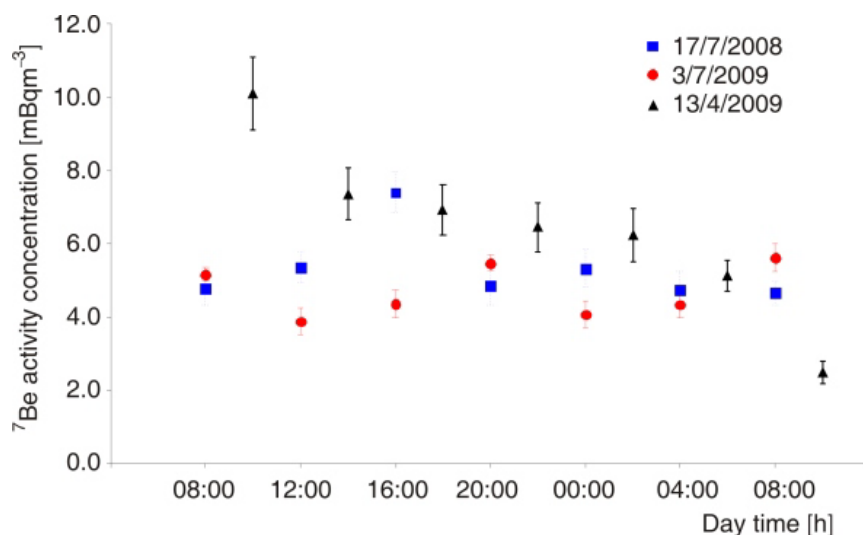
(b) ^7Be

στον επιφανειακό αέρα της πόλης Hsinchu (24°N, 121°E), Taiwan, για την περίοδο 1998-2011.

(Chao et al., 2013)

3.8.3 Ημερήσιες μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Οι ημερήσιες μεταβολές των συγκεντρώσεων ^7Be στον επιφανειακό αέρα απαιτούν μετρήσεις μικρής χρονικής κλίμακας, όπως είναι για παράδειγμα ο «ημερήσιος κύκλος δειγματοληψιών φίλτρων», δηλαδή η διαδοχική δειγματοληψία φίλτρων αέρα, κάθε 4 ώρες, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, που πραγματοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ σε τακτά χρονικά διαστήματα τα τελευταία χρόνια. Τέτοιου είδους δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια δύο τυπικών καλοκαιρινών ημερών (17/7/08 και 3/7/09), δεν επέτρεψαν τη διεξαγωγή συγκεκριμένων συμπερασμάτων ή την παρατήρηση εμφανών τάσεων. Πάντως, η μεταβολή της συγκέντρωσης του ^7Be είναι πιο έντονη κατά την ανοιξιάτικη βροχερή ημέρα (13/4/09) εξαιτίας της επίδρασης των διεργασιών της βροχόπλυσης (rainout) και απόπλυσης (washout) (Εικόνα 3.74, Papandreou et al., 2011).



Εικόνα 3.74

Ημερήσιες μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (~ 38°N, 23°E, 195m asl), που προέκυψαν από διαδοχικές 4ωρες δειγματοληψίες. (Papandreou et al., 2011)

3.8.4 Εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης ^7Be και ^{10}Be στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα - Χρήση του λόγου $^{10}\text{Be} / ^7\text{Be}$ ως ιχνηλάτη στρατοσφαιρικών εισβολών

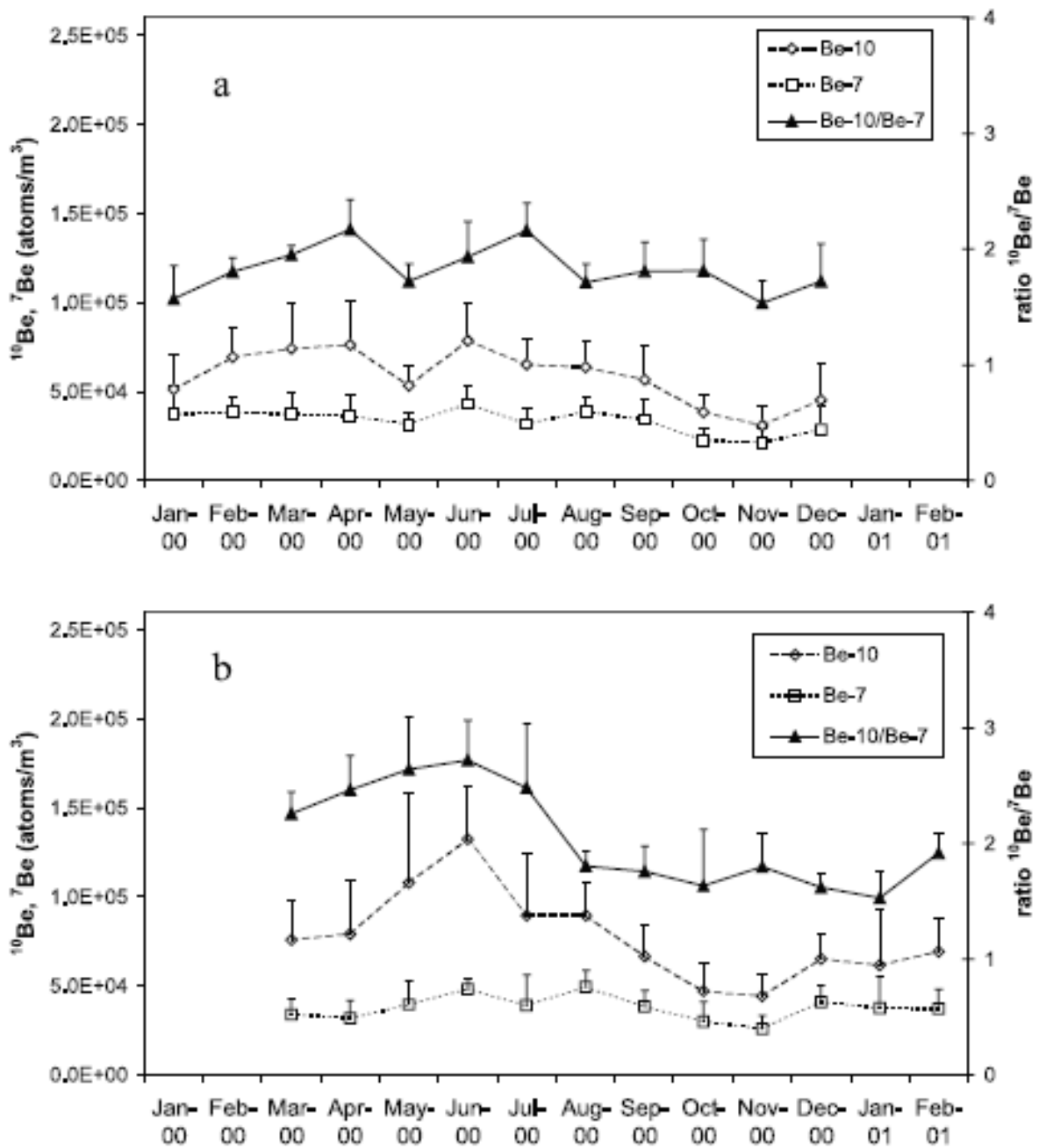
Τα ραδιενεργά ισότοπα κοσμικής προέλευσης είναι δυνατό να χρησιμεύσουν ως ιχνηλάτες της εισροής στρατοσφαιρικού αέρα στην τροπόσφαιρα. Όμως, η μεμονωμένη χρήση τους δεν τους καθιστά ιδανικούς στρατοσφαιρικούς ιχνηλάτες διότι προσκολλώνται στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ, με αποτέλεσμα ο χρόνος παραμονής τους στην τροπόσφαιρα να καθορίζεται πρωταρχικά από την υγρή σάρωση (wet scavenging) των αεροζόλ-φορέων τους. Ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία είναι η χρήση του λόγου της συγκέντρωσης ραδιενέργειας

δύο τέτοιων ισοτόπων, όπως ο λόγος $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$, διότι και τα δύο αυτά ισότοπα προσκολλώνται σε ίδιου είδους σωματίδια αεροζόλ κι επομένως η απόπλυσή τους (washout) γίνεται με τον ίδιο τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος των συγκεντρώσεων $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ δεν επηρεάζεται από τη διεργασία της υγρής σάρωσης. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή του λόγου $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ είναι πολύ μεγαλύτερη στην στρατόσφαιρα απ' ό,τι στην τροπόσφαιρα εξαιτίας του πολύ μεγαλύτερου χρόνου υποδιπλασιασμού του ^{10}Be ($T_{1/2} = 1,5 \times 10^6$ έτη) έναντι του ^7Be ($T_{1/2} = 53,3$ ημέρες), συμπεραίνουμε ότι ο λόγος $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ μπορεί να αποτελέσει έναν πολύ καλό **στρατοσφαιρικό ιχνηλάτη**. Εντούτοις, μία αδυναμία που ακόμη παραμένει, είναι το γεγονός ότι ένα σημαντικό ποσοστό και των δύο αυτών ραδιενεργών ισοτόπων παράγεται στην ανώτερη τροπόσφαιρα, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις τους στον επιφανειακό αέρα να επηρεάζονται από την κατακόρυφη ανάμιξη των αερίων μαζών μέσα στη τροπόσφαιρα. Στα μειονεκτήματα προστίθενται και οι περιορισμοί που συνοδεύουν τη μέτρηση του ^{10}Be , ιδιαίτερα σε συνεχή βάση (βλ. § 2.4.5).

Στη στρατόσφαιρα, όπου οι διεργασίες της υγρής και ξηρής εναπόθεσης είναι αναποτελεσματικές, οι τιμές του λόγου $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ είναι πολύ υψηλότερες απ' ό,τι στην τροπόσφαιρα και καθορίζονται από τους χρόνους παραμονής (μήνες έως χρόνια) αυτών των ραδιενεργών ισοτόπων στον αέρα της στρατόσφαιρας. Οι μετρούμενες τιμές του λόγου των συγκεντρώσεων $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$, που έχουν καταγραφεί σε σχετικές μελέτες και αναφέρονται στη δημοσίευση των Zanis et al. (2003), είναι: 4,0-6,9 (για την κατώτερη στρατόσφαιρα στην Αρκτική), 2,4-5,7 (για την κατώτερη στρατόσφαιρα σε γεωγραφικό πλάτος 65°N) και μικρότερες από 2,2 (για τον στρατοσφαιρικό αέρα στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη). Επίσης, οι τυπικές τιμές του λόγου $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ στη χαμηλότερη τροπόσφαιρα του βόρειου ημισφαιρίου κυμαίνονται από 1,2 τον χειμώνα έως 2 το καλοκαίρι. Η θεωρητική τιμή του λόγου $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ κατά την παραγωγή τους είναι 0,5. Μεγαλύτερες τιμές από τη θεωρητική υποδηλώνουν την παρουσία αερίων μαζών μεγάλης ηλικίας.

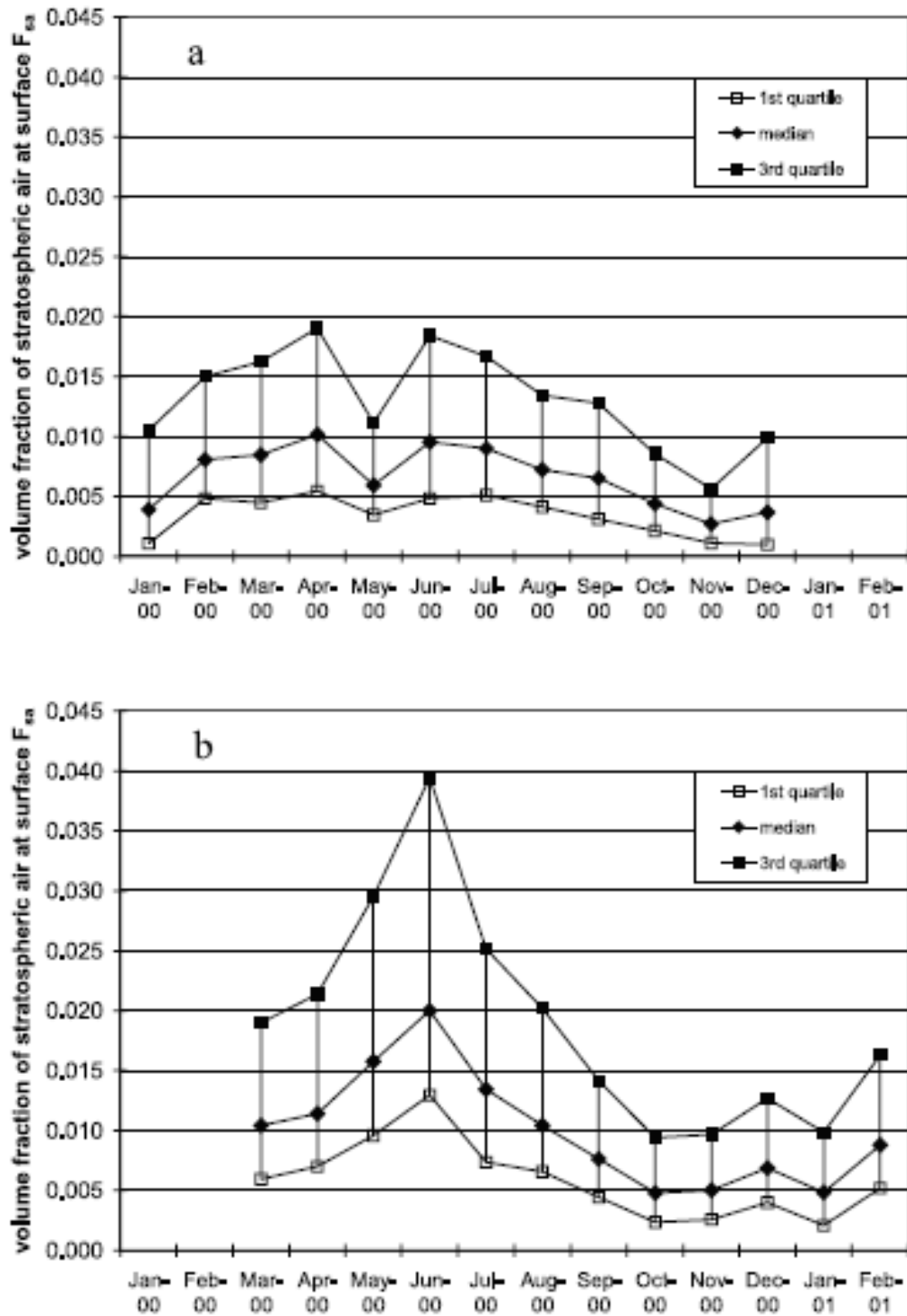
Από μετρήσεις ^7Be και ^{10}Be που πραγματοποιήθηκαν σε τακτά χρονικά διαστήματα για διάρκεια ενός ολόκληρου έτους σε τοποθεσίες μεγάλου υψόμετρου, οι Zanis et al. (2003) βρήκαν τη μέση ετήσια τιμή του λόγου $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ ίση με: 1,82 [για την περιοχή Jungfrauoch, ZUG, ($\sim 47^\circ\text{N}$, 8°E , 3580 m asl), Ελβετία] και 1,97 [για την περιοχή Zugspitze, JUN, ($\sim 47^\circ\text{N}$, 11°E , 2962 m asl), Γερμανία]. Επίσης, μετά από μελέτη της συσχέτισης των συγκεντρώσεων στον αέρα των ^7Be και ^{10}Be και του λόγου τους με την σχετική υγρασία καθώς και τους τοπικούς καιρικούς τύπους (κλάσεις), διαπιστώθηκε ότι ο λόγος $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ είναι πρακτικά ανεξάρτητος από την επίδραση της υγρής σάρωσης και ότι εξακολουθεί να αποτελεί έναν καλό **ιχνηλάτη στρατοσφαιρικών εισβολών**, γεγονός που δεν ισχύει όταν το ^7Be και το ^{10}Be χρησιμοποιούνται μεμονωμένα.

Στην ίδια μελέτη, παρατηρήθηκε ένας εμφανής εποχιακός κύκλος στις συγκεντρώσεις των ^7Be και ^{10}Be καθώς και στο λόγο $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$, με τα **μέγιστα να εμφανίζονται την άνοιξη και το καλοκαίρι** (Εικόνα 3.75), όπως είναι αναμενόμενο για περιοχές της Ευρώπης, αντικατοπτρίζοντας τη στρατοσφαιρική - τροποσφαιρική ανταλλαγή αερίων μαζών, η οποία παρουσιάζει μέγιστο κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού σε περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών και ιδιαίτερα σε μεγάλα υψόμετρα (βλ. §3.8.2). Με δεδομένα τις μέσες μηνιαίες τιμές των συγκεντρώσεων ^7Be και ^{10}Be και του λόγου τους, οι Zanis et al. (2003) υπολόγισαν το κλάσμα του όγκου του επιφανειακού αέρα που έχει στρατοσφαιρική προέλευση και διαπίστωσαν ότι ο εποχιακός κύκλος του παρουσίασε μέγιστα την άνοιξη και το καλοκαίρι και ελάχιστα το φθινόπωρο και τον χειμώνα (Εικόνα 3.76).



Εικόνα 3.75

Εποχιακός κύκλος των ^7Be , ^{10}Be και του λόγου τους $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ στις περιοχές (a) Jungfraujoch, ZUG, (~ 47°N, 8°E, 3580 m asl), Ελβετία και (b) Zugspitze, JUN, (~ 47°N, 11°E, 2962 m asl), Γερμανία. Πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες και για τα δύο ραδιενεργά ισότοπα σε τακτά χρονικά διαστήματα για χρονική διάρκεια ενός ολόκληρου έτους. (Zanis et al.2003)



Εικόνα 3.76

Εποχιακός κύκλος του κλάσματος του όγκου του επιφανειακού αέρα που έχει στρατοσφαιρική προέλευση στις περιοχές (a) Jungfrauoch, ZUG, (~ 47°N, 8°E, 3580 m asl), Ελβετία και (b) Zugspitze, JUN, (~ 47°N, 11°E, 2962 m asl), Γερμανία. Οι υπολογισμοί προέκυψαν από τις μέσες μηνιαίες τιμές των συγκεντρώσεων ^7Be και ^{10}Be καθώς και του λόγου $^7\text{Be}/^{10}\text{Be}$. (Zanis et al.2003)

3.8.5 Εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης ^7Be και ^{22}Na στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα - Χρήση του λόγου $^7\text{Be} / ^{22}\text{Na}$ ως ιχνηλάτη στρατοσφαιρικών εισβολών

Λόγω της κοινής τους κοσμικής προέλευσης, ενδεχομένως μπορούμε να οδηγηθούμε στην υπόθεση ότι το ραδιενεργό ισότοπο ^{22}Na ($T_{1/2}=2,6$ έτη) μπορεί να αντικαταστήσει το ^{10}Be ($T_{1/2} = 1,5 \times 10^6$ έτη) σε έρευνες περιβαλλοντικών διεργασιών μικρότερης χρονικής κλίμακας.

Έτσι, ο ρόλος του ^{22}Na αναμένεται να είναι παρόμοιος με αυτόν του ^{10}Be , με τη διαφορά ότι ο μικρότερος χρόνος υποδιπλασιασμού του είναι περισσότερο κατάλληλος για τη μελέτη της κυκλοφορίας αερίων μαζών. Η ανίχνευση του ^{22}Na παρουσιάζει περιορισμούς (βλ. §2.4.1), αλλά, από την άλλη, η μέτρηση του ^{10}Be απαιτεί ακριβές εργαστηριακές εγκαταστάσεις (βλ. §2.4.5). Επομένως, το ^{22}Na θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αντί για το ^{10}Be ως εναλλακτική επιλογή και ο λόγος $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ θα μπορούσε να αποτελέσει έναν νέο πιο αποδοτικό μέσο για τη μελέτη της ανταλλαγής στρατοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα, αρκεί να ήταν διαθέσιμη μια επαρκής βάση δεδομένων για το ^{22}Na (Hoffman, 2016).

Καθώς το ραδιενεργό ισότοπο ^{22}Na είναι κοσμικής προέλευσης, οι εποχιακές μεταβολές του παρουσιάζουν παρόμοια τάση με αυτή του ^7Be (βλ. § 3.8.2). Έτσι, στην Ευρώπη, τα μέγιστα εμφανίζονται κατά τη διάρκεια των θερμών εποχών και τα ελάχιστα κατά τη διάρκεια των ψυχρών [διαγράμματα Εικόνων: 3.78 και 3.79 (Steinmann et al., 2013) καθώς και 3.82 και 3.83 (Blazej and Mietelski, 2014)]. Ο λόγος $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ παρουσιάζει μεγάλη κύμανση σε πολυετή κλίμακα (διάγραμμα Εικόνας 3.77, Leppanen et al., 2012), εντούτοις, σε ετήσια κλίμακα εμφανίζει μια εποχιακή τάση, η οποία είναι αντίθετη από αυτή των ^7Be και ^{22}Na , δηλαδή *οι τιμές του είναι μικρότερες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια του χειμώνα* [διαγράμματα Εικόνων 3.80 (Steinmann et al., 2013) και 3.84 (Blazej and Mietelski, 2014)]. Οι τιμές των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των ^7Be και ^{22}Na , που έχουν μετρηθεί για περιοχές της Ευρώπης, καθώς και οι εποχιακές μεταβολές αυτών και του λόγου τους συμφωνούν μεταξύ τους (Leppanen et al., 2012, Φιλανδία, Steinmann et al., 2013, Ελβετία, Blazej and Mietelski, 2014, Πολωνία). Οι μηνιαίες μέσες τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be κυμάνθηκαν από 2600 έως 4600 $\mu\text{Bq m}^{-3}$, του ^{22}Na από 0,2 έως 0,5 $\mu\text{Bq m}^{-3}$ και του λόγου $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ από **5000** έως **20000**, παρουσιάζοντας μεγαλύτερες διακυμάνσεις τον χειμώνα απ' ότι το καλοκαίρι (Steinmann et al., 2013).

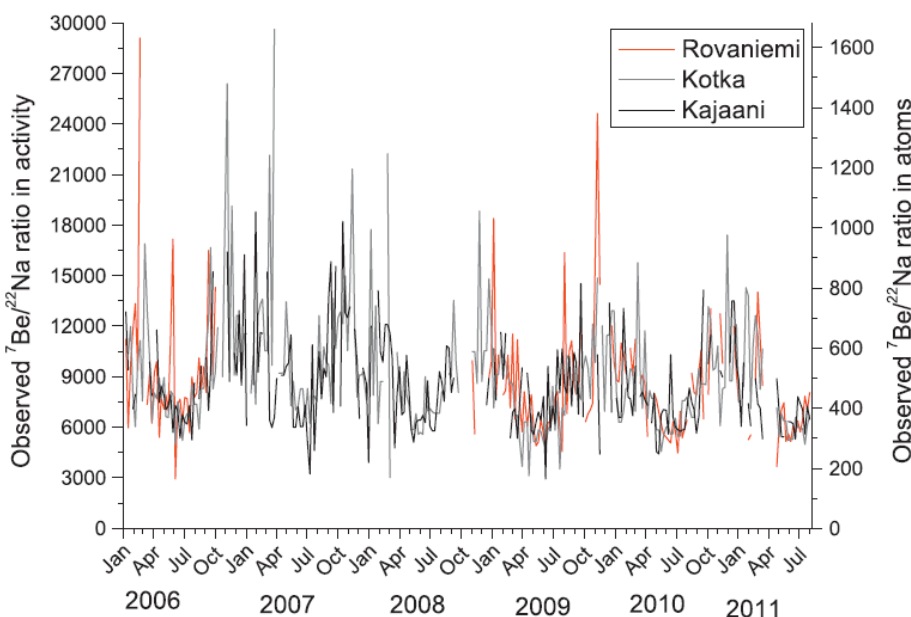
Ο λόγος $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ αποτελεί έναν πολύ καλό ιχνηλάτη για τη μελέτη των **στρατοσφαιρικών εισβολών** στον επιφανειακό αέρα (Steinmann et al., 2013). Μια μικρή τιμή του λόγου $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ υποδηλώνει: **(i)** προέλευση αερίων μαζών από την χαμηλή στρατόσφαιρα (Low Stratosphere, LS) ή την ανώτερη τροπόσφαιρα (Upper Troposphere, UT) ή/και **(ii)** μεγάλη διάρκεια παραμονής αερίων μαζών. Πιο συγκεκριμένα:

- (i)** Η ερμηνεία της LS/UT προέλευσης αερίων μαζών προκύπτει από το γεγονός ότι οι ρυθμοί παραγωγής του ^{22}Na αυξάνονται πιο έντονα με το υψόμετρο σε σχέση με αυτούς του ^7Be διότι *το ενεργειακό κατώφλι της αντίδρασης κατακερματισμού του Ar προς σχηματισμό ^{22}Na είναι υψηλότερο* από αυτό των ελαφρύτερων στοιχείων προς σχηματισμό ^7Be . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη παραγωγή του λόγου $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ στην τροπόσφαιρα από ό,τι στη στρατόσφαιρα.

(ii) Η ερμηνεία του μεγάλου χρόνου παραμονής αερίων μαζών προκύπτει από τους διαφορετικούς χρόνους υποδιπλασιασμού των δύο ραδιενεργών ισοτόπων ($T_{1/2}=53,2$ ημέρες για το ^7Be και $T_{1/2}=2,6$ έτη για το ^{22}Na).

Ο εποχιακός κύκλος του λόγου $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ στον επιφανειακό αέρα συναρτίζεται της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.81 και μπορεί να ερμηνευθεί ως εξής:

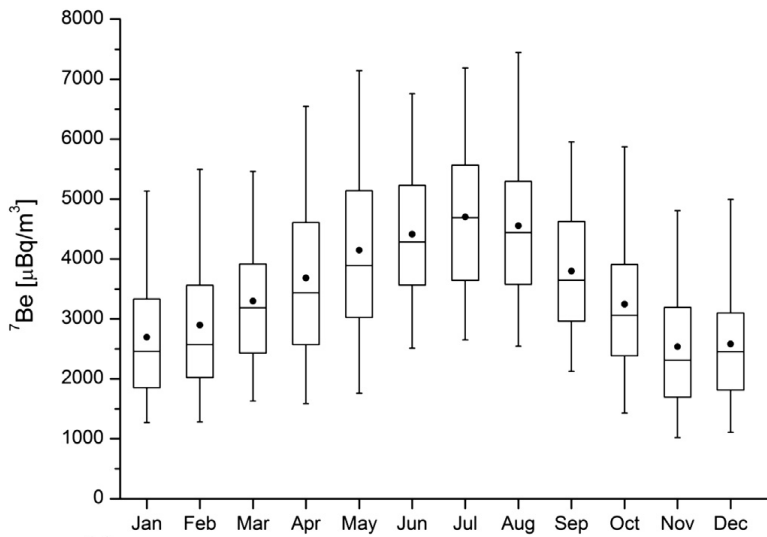
- Η μέγιστη ανταλλαγή στρατοσφαιρικών - τροποσφαιρικών αερίων μαζών (Stratosphere – Troposphere Exchange, STE) στο βόρειο ημισφαίριο συμβαίνει μεταξύ Μαρτίου και Μαΐου. Την περίοδο αυτή οι συγκεντρώσεις των ^{22}Na και ^7Be είναι αυξημένες, ενώ ο λόγος $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ μειώνεται. Τα παραπάνω υποδηλώνουν την αυξημένη ανάμιξη των LS/UT αερίων μαζών με τον επιφανειακό αέρα (βέλος A, Εικ. 3.81).
- Κατά τη διάρκεια του Ιουνίου και Ιουλίου, το ^7Be συνεχίζει να αυξάνεται, ενώ το ^{22}Na παραμένει σχεδόν σταθερό, με αποτέλεσμα και η συγκέντρωση ^7Be και ο λόγος $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ να αυξάνονται (βέλος B, Εικ. 3.81). Αυτό υποδηλώνει παύση της LS πηγής, αλλά συνέχιση της UT πηγής, η οποία ερμηνεύεται από τη μεγαλύτερη κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας και αερίων μαζών που παρατηρείται το καλοκαίρι.
- Από τον Αύγουστο έως τον Οκτώβριο, οι συγκεντρώσεις και των δύο ραδιενεργών ισοτόπων μειώνονται σημαντικά, υποδηλώνοντας προέλευση αερίων μαζών από χαμηλότερα υψόμετρα, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την αύξηση του λόγου $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ (βέλος C, Εικ. 3.81).
- Τέλος, από τον Οκτώβριο έως τον Ιανουάριο, οι συγκεντρώσεις και των δύο ραδιενεργών ισοτόπων παραμένουν σε σταθερά σχεδόν επίπεδα με το λόγο $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ να μειώνεται, υποδηλώνοντας τη μικρή κατακόρυφη ανάμιξη αερίων μαζών, δηλαδή τη μικρή εισροή ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης. Η παρατηρούμενη μείωση του λόγου $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ αυτήν την περίοδο αντικατοπτρίζει το μεγάλο χρόνο παραμονής των αερίων μαζών με επικρατέστερη τη ραδιενεργό διάσπαση του πιο βραχύβιου ^7Be (βέλος D, Εικ. 3.81).



Εικόνα 3.77

Χρονική κόμανση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του λόγου $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ σε τρεις πόλεις της Φιλανδίας για εβδομαδιαίες δειγματοληψίες αέρα κατά τη χρονική περίοδο Ιανουάριο 2006 - Ιούλιο 2011.

(Leppanen et al., 2012)

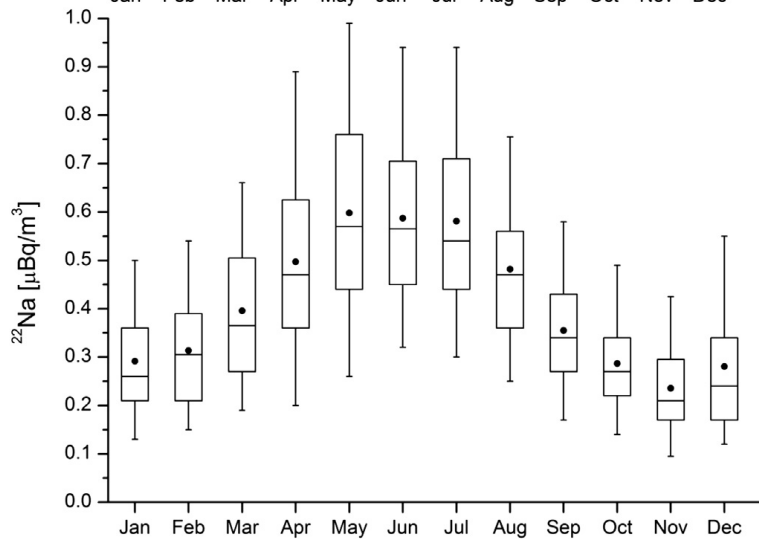


Εικόνα 3.78

Μηνιαίες μέσες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^7Be στον επιφανειακό αέρα, που προέκυψαν από εβδομαδιαίες δειγματοληψίες σε 5 τοποθεσίες στην Ελβετία ($46^\circ - 47^\circ \text{N}$) για τη **18ετή** περίοδο Ιανουάριο 1994 – Νοέμβριο 2011.

Οι μηνιαίες μέσες τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be κυμάνθηκαν από 2600 έως 4600 $\mu\text{Bq m}^{-3}$.

(Steinmann et al., 2013)

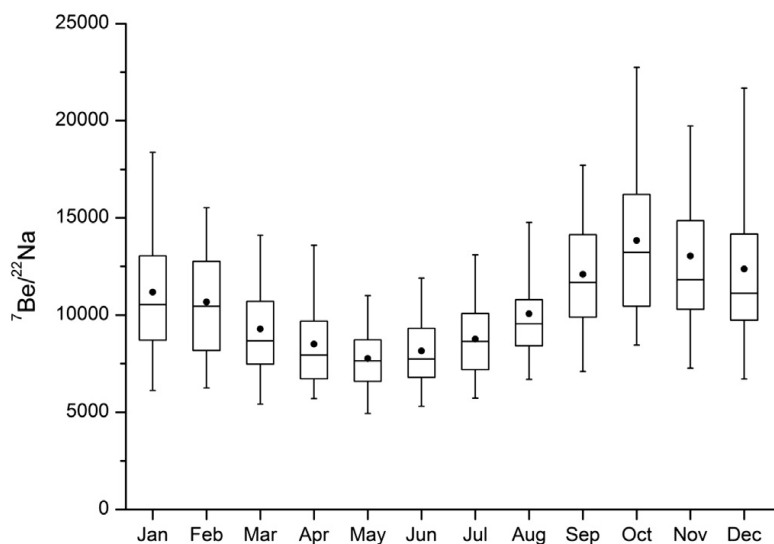


Εικόνα 3.79

Μηνιαίες μέσες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ^{22}Na στον επιφανειακό αέρα, που προέκυψαν από εβδομαδιαίες δειγματοληψίες σε 5 τοποθεσίες στην Ελβετία ($46^\circ - 47^\circ \text{N}$) για τη **12ετή** περίοδο Ιανουάριο 2000 – Νοέμβριο 2011.

Οι μηνιαίες μέσες τιμές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{22}Na κυμάνθηκαν από 0,2 έως 0,5 $\mu\text{Bq m}^{-3}$.

(Steinmann et al., 2013)



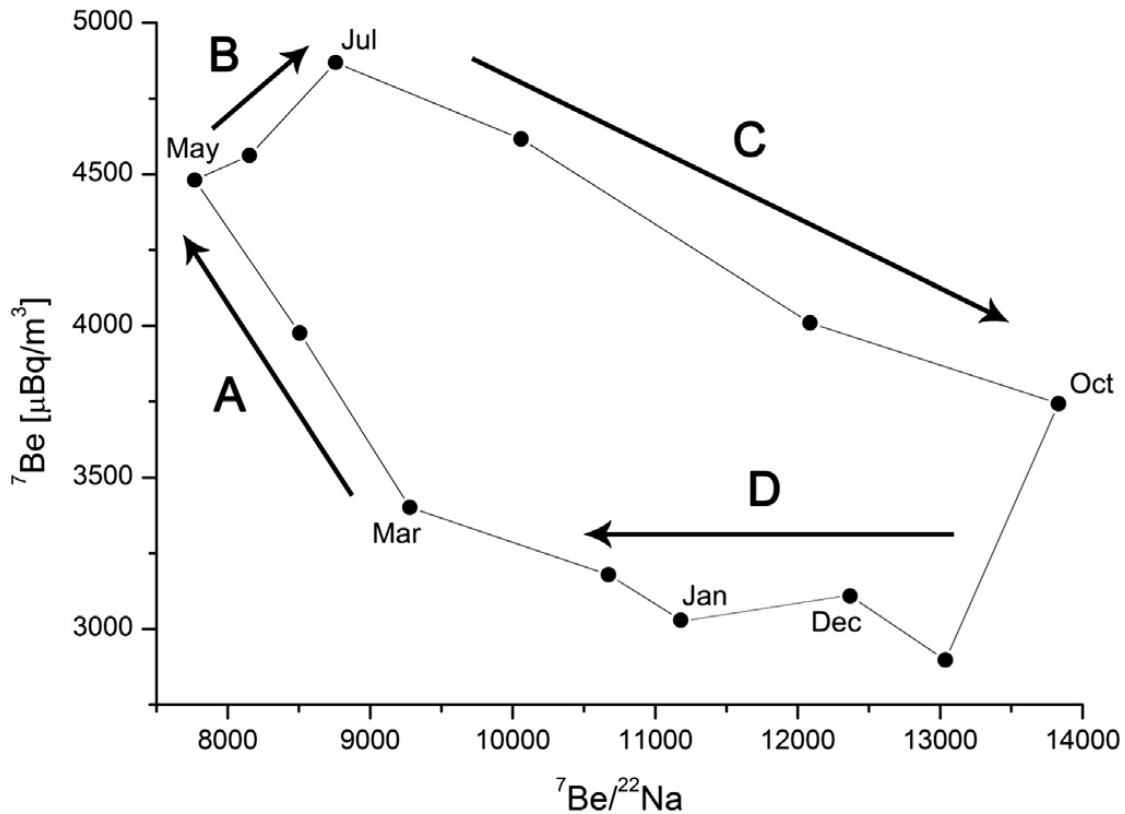
Εικόνα 3.80

Μηνιαίες μέσες τιμές του λόγου $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ στον επιφανειακό αέρα, που προέκυψαν από εβδομαδιαίες δειγματοληψίες σε 5 τοποθεσίες στην Ελβετία ($46^\circ - 47^\circ \text{N}$) για τη **12ετή** περίοδο Ιανουάριο 2000 – Νοέμβριο 2011.

Οι τιμές του λόγου $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ κυμάνθηκαν από 5000 έως 20000, παρουσιάζοντας μεγαλύτερες διακυμάνσεις τον χειμώνα απ' ό τι το καλοκαίρι.

(Steinmann et al., 2013)

Horizontal lines give medians, the boxes encompass 50% of the values, and whiskers show the 5th and 95th percentiles. Arithmetic means are indicated by the dots.

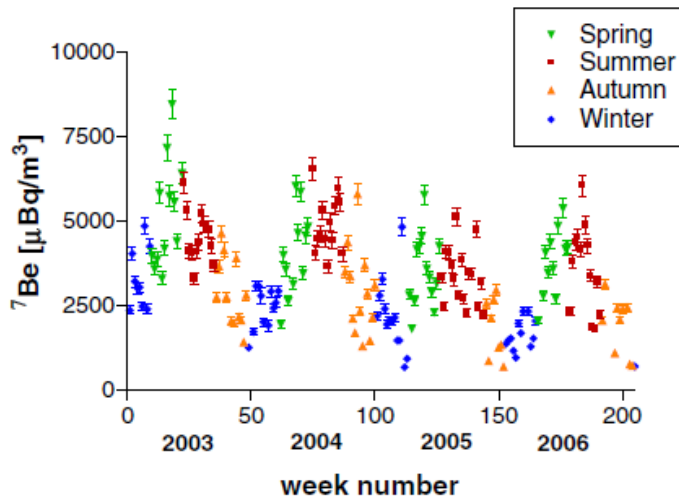


Εικόνα 3.81

Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ${}^7\text{Be}$ συναρτήσει των μέσων μηνιαίων τιμών του λόγου ${}^7\text{Be}/{}^{22}\text{Na}$ για όλα τα δείγματα επιφανειακού αέρα στην Ελβετία ($46^\circ - 47^\circ \text{N}$) για τη χρονική περίοδο 2000-2011. Η γραμμή δίνει τη χρονική εξέλιξη ξεκινώντας από τον Ιανουάριο. Τα βέλη A – D υποδηλώνουν σχηματικά τέσσερις φάσεις:

- (A) Κατά τη διάρκεια της **άνοιξης**: εισβολή αερίων μαζών από τη χαμηλότερη στρατόσφαιρα στην ανώτερη τροπόσφαιρα (Stratosphere – Troposphere Exchange, STE).
- (B) Κατά τη διάρκεια του **καλοκαιριού**: καθοδική ανάμιξη αέρα προερχόμενου από την ανώτερη τροπόσφαιρα.
- (C) Κατά τη διάρκεια του **φθινοπώρου**: χαμήλωμα του υψομέτρου ανάμειξης των αερίων μαζών.
- (D) Κατά τη διάρκεια του **χειμώνα**: περιορισμένη ανάμιξη αερίων μαζών (στρωματοποιημένο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα).

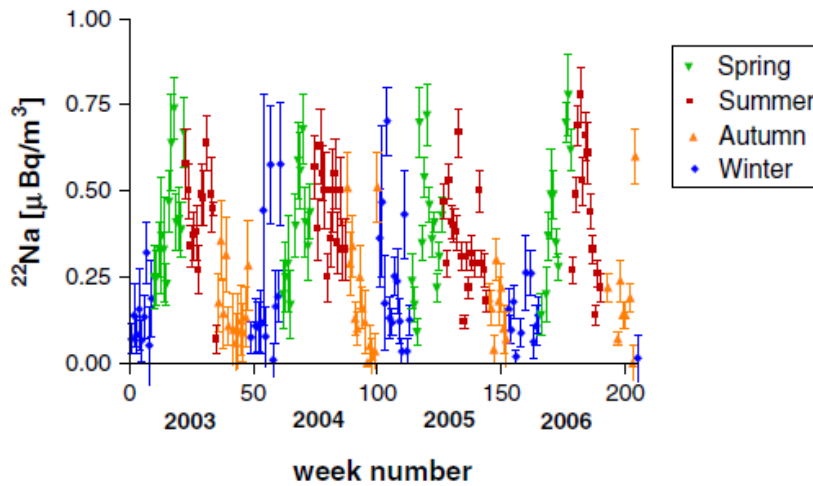
(Steinmann et al., 2013)



Εικόνα 3.82

Η συγκέντρωση ραδιενέργειας του ${}^7\text{Be}$, ξεκίνησε με τη τιμή $3313 \mu\text{Bq m}^{-3}$ την άνοιξη 2003 και ανέβηκε στα $8470 \mu\text{Bq m}^{-3}$. Το καλοκαίρι η συγκέντρωση μειώθηκε από $6140 \mu\text{Bq m}^{-3}$ σε $3307 \mu\text{Bq m}^{-3}$. Το φθινόπωρο παρουσίασε περαιτέρω μείωση στα $1420 \mu\text{Bq m}^{-3}$. Η μικρότερη συγκέντρωση $1270 \mu\text{Bq m}^{-3}$ καταγράφηκε τον χειμώνα 2003.

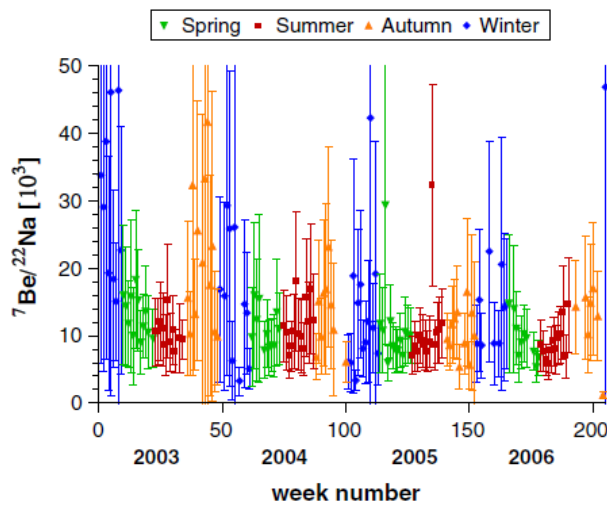
(Blazej and Mietelski, 2014)



Εικόνα 3.83

Η συγκέντρωση ραδιενέργειας του ${}^{22}\text{Na}$ παρουσιάζει μέγιστα κατά τις θερμές εποχές, φτάνοντας τα $0,75 \mu\text{Bq m}^{-3}$, και ελάχιστα κοντά στα $0,1 \mu\text{Bq m}^{-3}$ κατά τις ψυχρές εποχές.

(Blazej and Mietelski, 2014)



Εικόνα 3.84

Ο λόγος των συγκεντρώσεων ${}^7\text{Be}/{}^{22}\text{Na}$ παρουσιάζει μια κυκλική εποχιακή δομή. Οι μικρότερες τιμές του λόγου απαντώνται κατά τις θερμές εποχές (άνοιξη και καλοκαίρι), ενώ οι μεγαλύτερες κατά τις ψυχρές εποχές (χειμώνα ή φθινόπωρο).

(Blazej and Mietelski, 2014)

Εβδομαδιαίες δειγματοληψίες αέρα στην Krakow (50°N , 20°E , 240 m , 240 m as.), νότια Πολωνία, για την 4ετή χρονική περίοδο Ιανουάριο 2003 έως Δεκέμβριο 2006. (Blazej and Mietelski, 2014)

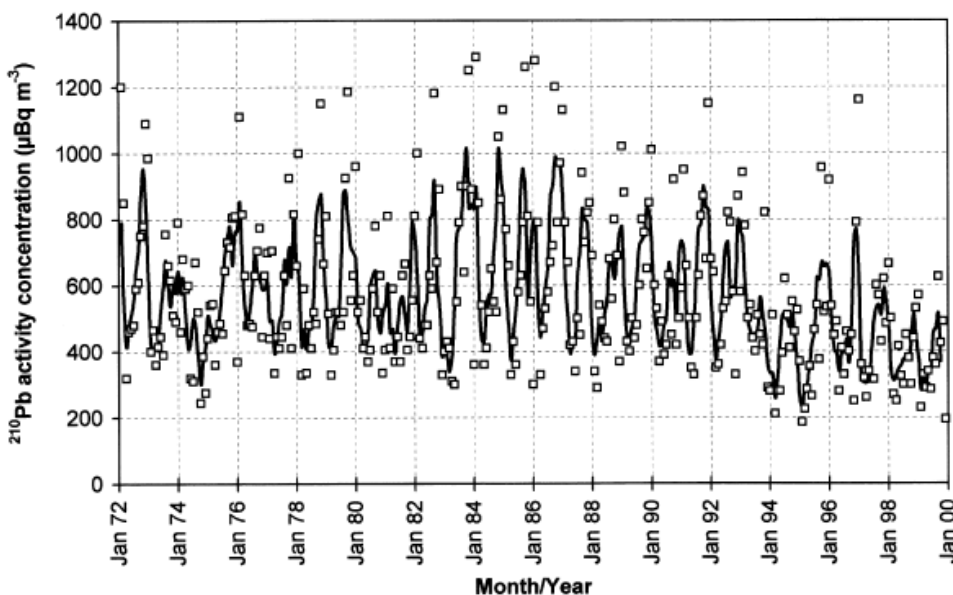
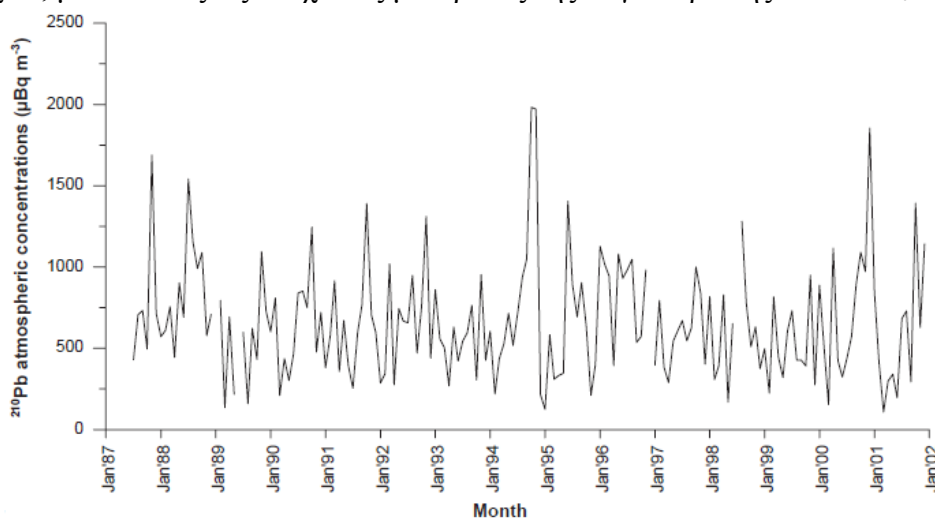
3.8.6 Πολυετείς μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Εφόσον ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ προέρχεται από την επιφάνεια του εδάφους λόγω της διαφυγής ^{222}Rn , η συγκέντρωσή του στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα εξαρτάται κυρίως από τους παράγοντες εκείνους που επηρεάζουν τη διαφυγή του ^{222}Rn από την επιφάνεια του εδάφους, όπως είναι η υγρασία του εδάφους καθώς και η κάλυψή του από χιόνι ή πάγο. Η συγκέντρωση ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ εξαρτάται επίσης και από τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες, όπως είναι οι μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης, που επηρεάζουν τις πηγές των αερίων μαζών και τους τοπικούς ρυθμούς διαφυγής του ^{222}Rn , το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, οι αναστροφές της θερμοκρασίας, οι ημερήσιες κι εποχιακές μεταβολές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων καθώς επίσης και η συχνότητα και η ποσότητα των κατακρημνίσεων.

Η πολυετής κύμανση των συγκεντρώσεων $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ παρουσιάζει τη μορφή που φαίνεται στα διαγράμματα των Εικόνων 3.85 και 3.86. Διακρίνεται μια περιοδικότητα, την οποία θα εξετάσουμε στη συνέχεια, μελετώντας τις εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$.

Εικόνα 3.85

Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον αέρα στη Θεσσαλονίκη ($\sim 40^\circ\text{N}$, 23°E), για τη 15ετή χρονική περίοδο 1987-2001. (Ioannidou et al., 2005)



Εικόνα 3.86

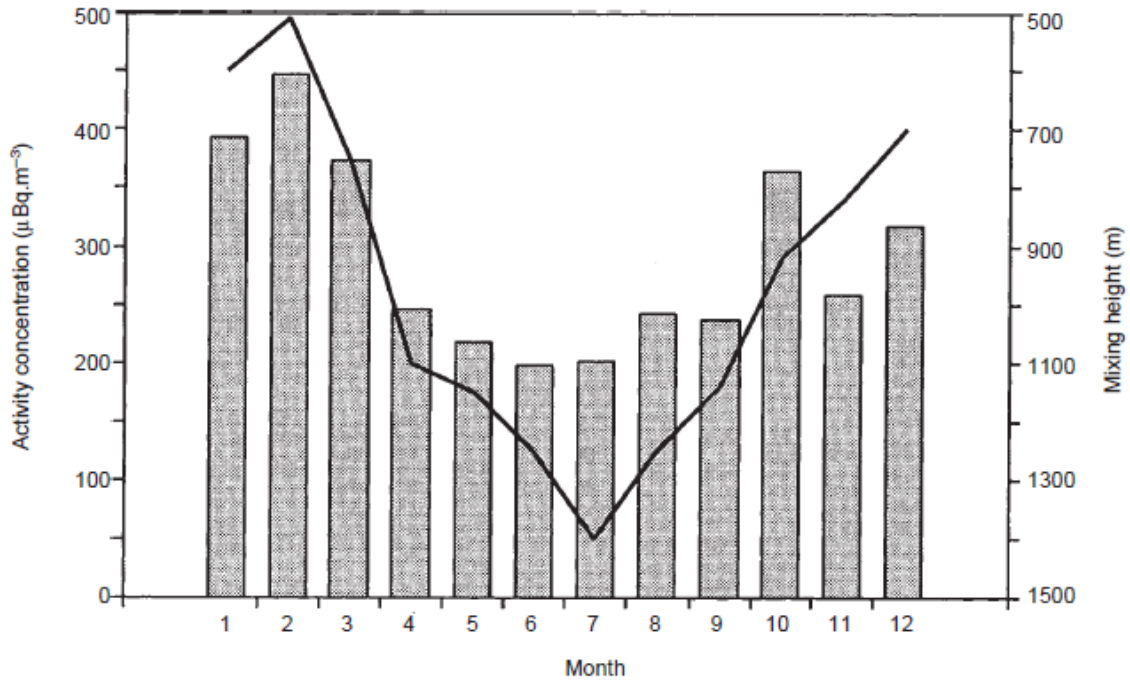
Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα, στο Munich-Neuherberg ($\sim 48^\circ\text{N}$, 12°E), Γερμανία, για την 28ετή χρονική περίοδο 1972-1999. (Winkler and Rosner, 2000)

3.8.7 Εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Γενικά τα γεωγενή ραδιενεργά ισότοπα κατανέμονται σε χαμηλά ύψη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και οι συγκεντρώσεις τους στον επιφανειακό αέρα δεν παρουσιάζουν εποχιακές μεταβολές. Εντούτοις, το ραδιενεργό ισότοπο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ απαντάται σε μεγαλύτερα υψόμετρα διότι είναι θυγατρικό του ^{222}Rn , το οποίο, ως αδρανές αέριο, δεν προσκολλάται στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και μετακινείται ψηλότερα. Έτσι, παρόλο που το ^{222}Rn διαφεύγει κυρίως από την επιφάνεια του εδάφους, είναι δυνατή η μεταφορά αερίων μαζών πλούσιων σε ραδόνιο από το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα στην ανώτερη τροπόσφαιρα ή ακόμη και στη στρατόσφαιρα. Ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, που βρίσκεται σε μεγαλύτερα υψόμετρα, συμμετέχει στις κατακόρυφες ατμοσφαιρικές κινήσεις παρουσιάζοντας εποχιακές μεταβολές ως προς τη συγκέντρωσή του στον επιφανειακό αέρα. Οι εποχιακές αυτές μεταβολές δεν παρουσιάζουν την ίδια τάση σε όλες τις περιοχές. Η εποχιακή τάση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ καθορίζεται από τις ατμοσφαιρικές διεργασίες και τα μετεωρολογικά φαινόμενα που επικρατούν στην κάθε περιοχή και μπορούν να επηρεάσουν τη συγκέντρωσή του. Ακολουθώντας, παραθέτουμε μερικές περιπτώσεις εποχιακών μεταβολών της συγκέντρωσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε διάφορες τοποθεσίες.

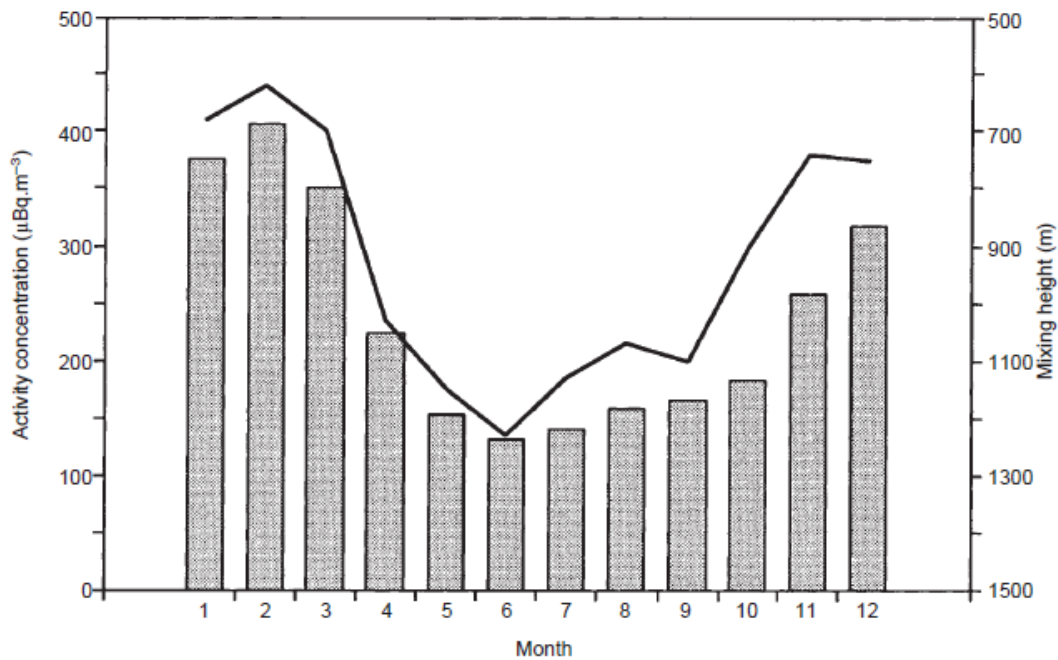
- Σε πολλές περιοχές, έχουν καταγραφεί οι εποχιακές μεταβολές των συγκεντρώσεων του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στην ατμόσφαιρα, οι οποίες παρουσιάζουν την εξής τάση: το φθινόπωρο και τον χειμώνα, οι μέσες συγκεντρώσεις ραδιενέργειάς του είναι μεγαλύτερες από αυτές της άνοιξης και του καλοκαιριού. Αυτή η εποχιακή τάση συμβαίνει επειδή το *ύψος του στρώματος ανάμιξης* είναι χαμηλότερο κατά τους ψυχρούς μήνες και υψηλότερο κατά τους θερμούς. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των ψυχρών περιόδων οι συχνές *αναστροφές θερμοκρασίας*⁽²⁵⁾ των επιφανειακών ατμοσφαιρικών στρωμάτων έχουν ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση ραδονίου και των προϊόντων της ραδιενεργού διάσπασής του στα στρώματα αέρα που βρίσκονται πάνω από το έδαφος. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια των θερμών περιόδων, οι υψηλότερες θερμοκρασίες, που επικρατούν, συνοδεύονται από *μεγαλύτερες αναταράξεις*, με αποτέλεσμα τον απεμπλουτισμό του επιφανειακού αέρα σε $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ λόγω της μεγαλύτερης ανάμιξης του αέρα μέσα στην τροπόσφαιρα. Παραδείγματα περιοχών, στις οποίες έχει παρατηρηθεί μια τέτοια εποχιακή τάση, είναι: Nurmijarvi και Sodankyla στη Φινλανδία (Εικ. 3.87 και 3.88, Paatero et al., 1998), Μόναχο, Γερμανία (Εικ. 3.89, Winkler and Rosner, 2000), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα (Εικ. 3.90, Ioannidou et al., 2005), Μιλάνο, Ιταλία (Vecchi et al., 2005), Detroit, MI, USA (McNeary and Baskaran, 2003). Ειδικότερα, σε περιοχές, στις οποίες οι τιμές των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ είναι χαμηλότερες κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, σε σχέση με αυτές των φθινοπωρινών, μπορεί να συμβαίνει χαμηλή διαφυγή ραδονίου από το παγωμένο ή καλυμμένο με χιόνι έδαφος. Από την άλλη, μικρότερες συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ κατά τη διάρκεια της άνοιξης, σε σχέση με αυτές του καλοκαιριού, μπορεί να αντικατοπτρίζουν τη διεργασία της απόπλυσης σε περιοχές όπου το μεγαλύτερο ποσοστό κατακρημνίσεων συμβαίνει κατά τους εαρινούς μήνες. Η διαφυγή ραδονίου περιορίζεται έντονα όταν το έδαφος είναι υγρό με αποτέλεσμα τη χαμηλότερη παραγωγή $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (Εικ. 3.90, Ioannidou et al., 2005).

⁽²⁵⁾ Βλ. Παράρτημα Β.2



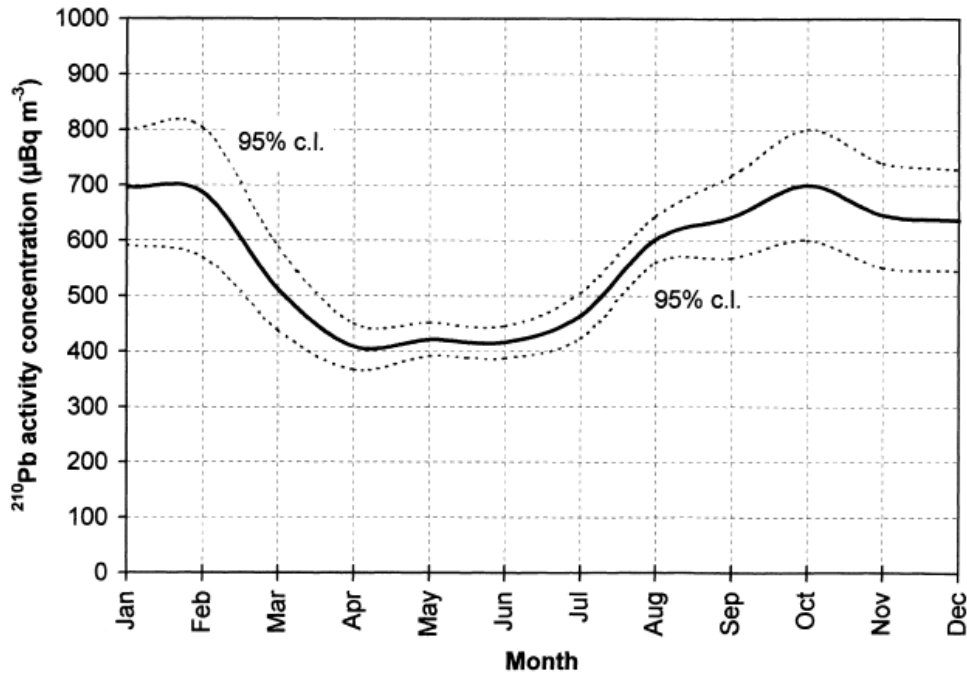
Εικόνα 3.87

Εποχιακή μεταβολή του ύψους ανάμιξης (γραμμή) και της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{ex}$ (μπάρες) στον αέρα στη Nurmiyarvi (~ 60°N, 24°E, 105m asl), Φιλανδία, για την 30ετή χρονική περίοδο 1967-1996. (Paatero et al., 1998)



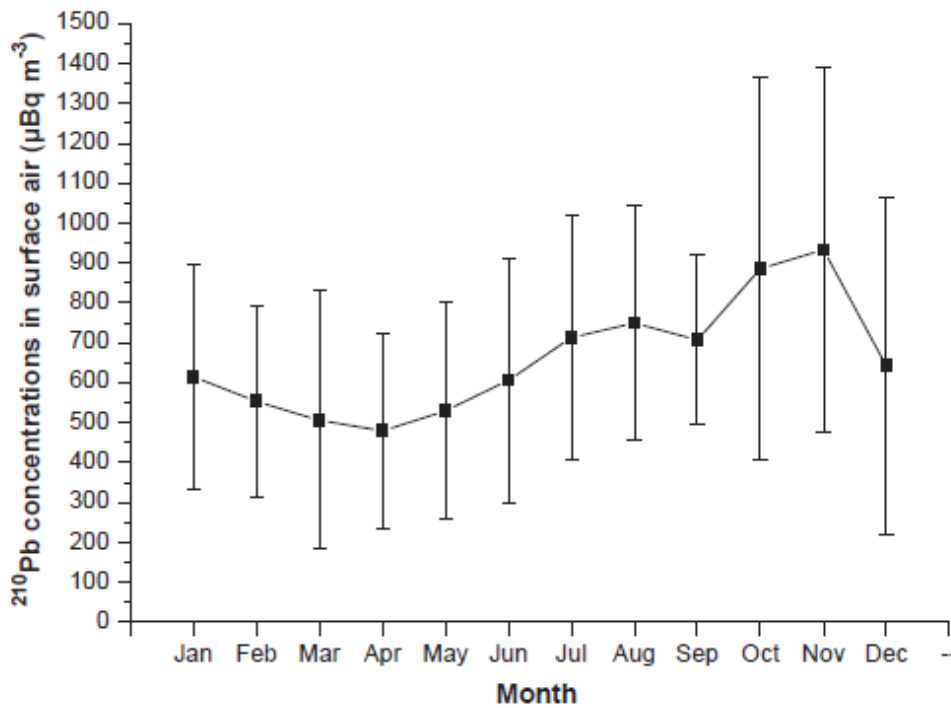
Εικόνα 3.88

Εποχιακή μεταβολή του ύψους ανάμιξης (γραμμή) και της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{ex}$ (μπάρες) στον αέρα στη Sodankyla (~ 67°N, 26°E, 198m asl), Φιλανδία, για την 22ετή χρονική περίοδο 1975-1996. (Paatero et al., 1998)



Εικόνα 3.89

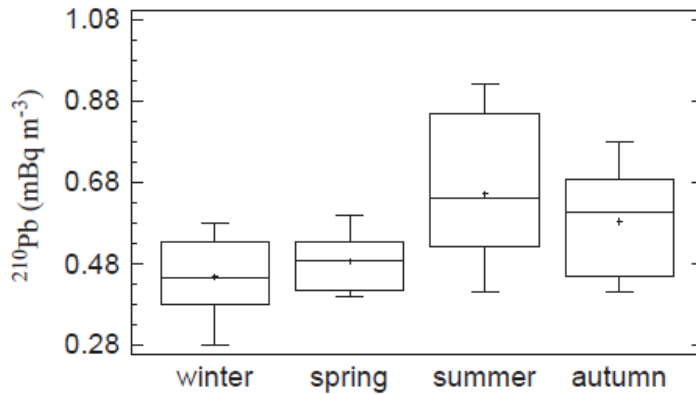
Εποχιακή μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{ex}$ στον αέρα (συνεχής γραμμή) στο Munich-Neuherberg ($\sim 48^\circ\text{N}$, 12°E), 490m asl), Γερμανία, για την **28ετή** χρονική περίοδο 1972-1999. (Winkler and Rosner, 2000)



Εικόνα 3.90

Εποχιακή μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{ex}$ στον επιφανειακό αέρα στη Θεσσαλονίκη ($\sim 40^\circ\text{N}$, 23°E) για τη **15ετή** χρονική περίοδο 1987-2001. (Ioannidou et al., 2005)

- Υπάρχουν τοποθεσίες όπου έχουν αναφερθεί υψηλές συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ το καλοκαίρι (π.χ. στην Ισπανία: Garcia-Talavera et al., 2001, Azahra et al., 2004b, Duenas et al., 2005, 2009, Εικόνα 3.91). Αυτή η εποχιακή τάση, με τις υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ να απαντώνται το καλοκαίρι και χαμηλότερες κατά τη διάρκεια των άλλων εποχών, αποδόθηκε στις μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης, αναστροφές θερμοκρασίας, ημερήσιες ή εποχιακές μεταβολές στις μετεωρολογικές συνθήκες, κατακρημνίσεις, υγρασία του εδάφους και κάλυψη του εδάφους από χιόνι και πάγο, δηλαδή σε συνδυασμό παραγόντων που επηρεάζουν τη διαφυγή ^{222}Rn από το επιφανειακό έδαφος (Duenas et al., 2005).

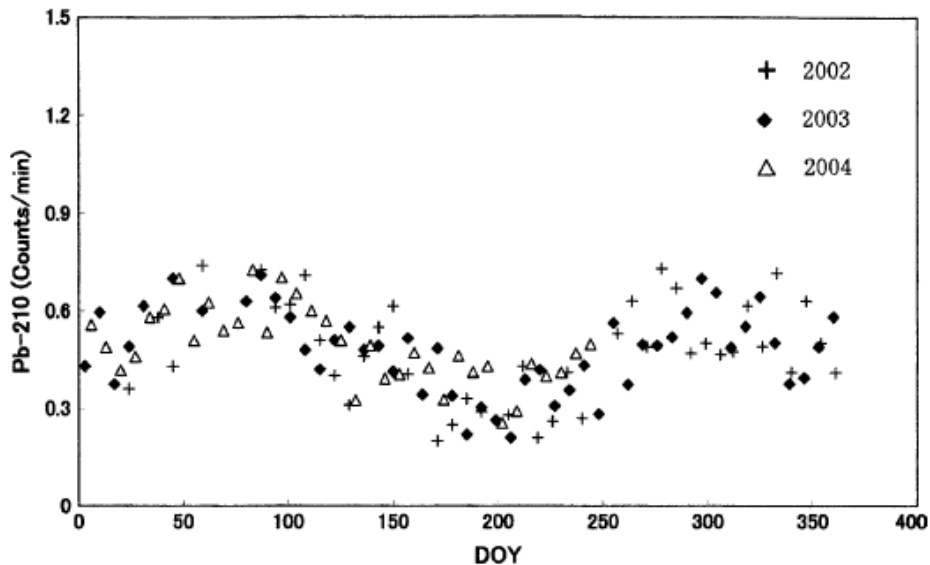


Εικόνα 3.91

Εποχιακές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στην τοποθεσία της Μεσογείου Malaga (~ 37°N, 5°W), νοτιοανατολική Ισπανία, για την δετή χρονική περίοδο 1992-1999.

(Duenas et al., 2005)

- Στο Τόκυο (~ 35°N, 139°E), Ιαπωνία, επειδή οι κατακόρυφες κινήσεις των αερίων μαζών είναι έντονες την άνοιξη και το φθινόπωρο (βλ. επίσης § 3.8.2, Εικόνα 3.72), αναμένεται ότι οι εποχιακές μεταβολές των συγκεντρώσεων $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ να παρουσιάζουν μέγιστα τις εποχές αυτές (Εικόνα 3.92) (Yoshimori, 2005a). Επίσης, στην Ιαπωνία, έχουν παρατηρηθεί μέγιστες συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και τον χειμώνα (Yamamoto et al., 2006).

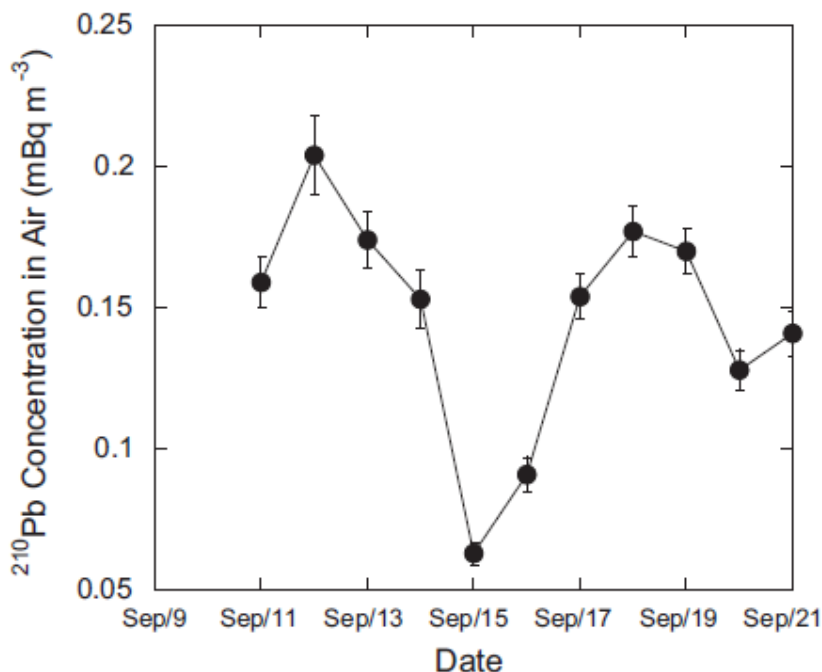


Εικόνα 3.92

Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στο Τόκυο (~ 35°N, 139°E), Ιαπωνία, για τη χρονική περίοδο 2002-2004. (Yoshimori, 2005a)

3.8.8 Ημερήσιες μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Οι ημερήσιες μεταβολές του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ είναι τοπικής κλίμακας και οφείλονται κυρίως στη διεύθυνση του ανέμου, η οποία υποδηλώνει την ηπειρωτική ή τη θαλάσσια προέλευση των αερίων μαζών (βλ. §3.7.6). Έτσι, είναι δυνατό να αποτελούν ιχνηλάτες φαινομένων που σχετίζονται με τη μεταφορά αιωρούμενων σωματιδίων (π.χ. σκόνης) σε μια περιοχή. Για παράδειγμα, οι συγκεντρώσεις του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ που μετρήθηκαν για μια περίοδο 11 ημερών στις Βερμούδες, οι οποίες απέχουν περίπου 1300 km από την κοντινότερη ξηρά, παρουσίασαν πολύ μεγάλο εύρος τιμών από 0,063 mBq m⁻³ έως 0,204 mBq m⁻³, δηλαδή μεταβολή κατά έναν παράγοντα 3,2. (Εικόνα 3.93), παρά το γεγονός ότι ο ρυθμός διαφυγής του ^{222}Rn από την επιφάνεια των ωκεανών παραμένει σταθερός. Τέτοιες μεταβολές των συγκεντρώσεων του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ αποδίδονται σε μεταφορές σκόνης προερχόμενης από ηπειρωτικές περιοχές (Baskaran, 2011).



Εικόνα 3.93

Ημερήσιες μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα στις Βερμούδες, οι οποίες απέχουν ~1300 km από την κοντινότερη ξηρά. Οι τιμές της συγκέντρωσης παρουσιάζουν κύμανση κατά έναν παράγοντα 3,2, γεγονός που αποδίδεται στην εισαγωγή σκόνης στην περιοχή.

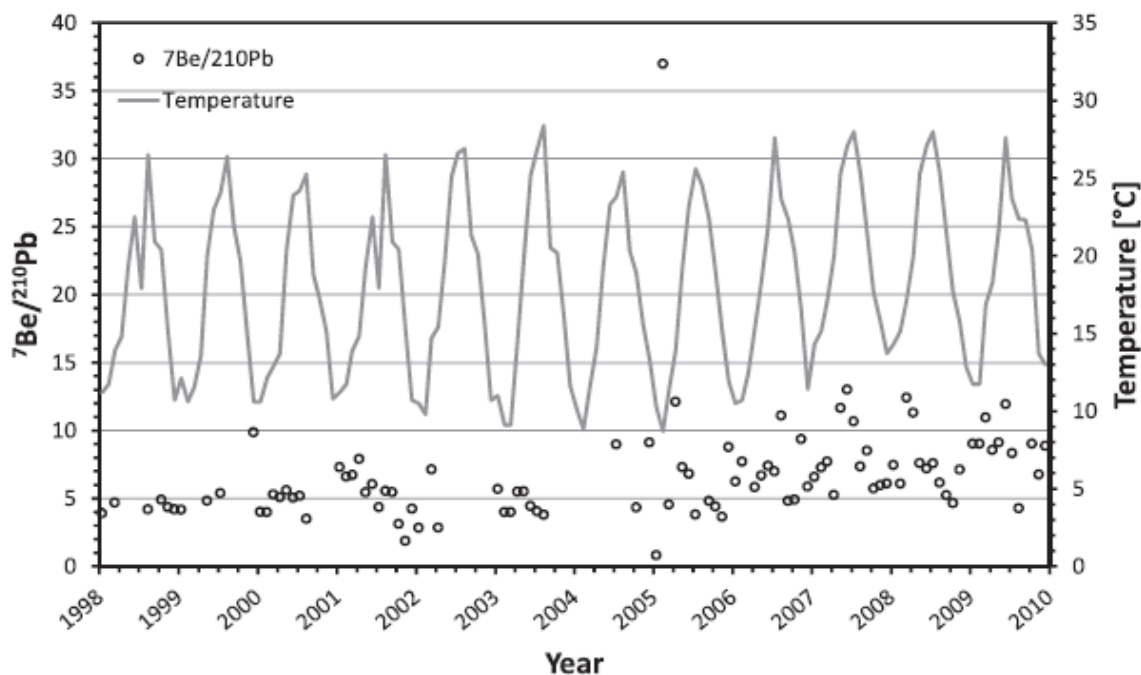
(Baskaran, 2011).

3.8.9 Ο λόγος $^7\text{Be} / ^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ως ιχνηλάτης διεργασιών μεταφοράς αερίων μαζών

Το ^7Be και ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ αποτελούν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί ως ιχνηλάτες της προέλευσης αερίων μαζών λόγω των μοναδικών πηγών προέλευσής τους. Εφόσον το ^7Be είναι κοσμικής προέλευσης και ο ρυθμός παραγωγής του είναι υψηλός στην ανώτερη τροπόσφαιρα, οι συγκεντρώσεις του στον αέρα αυξάνονται με το υψόμετρο. Αντιθέτως, η εδαφική προέλευση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ συνεπάγεται υψηλότερο ρυθμό παραγωγής του στη χαμηλότερη τροπόσφαιρα, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις

ραδιενέργειάς του στον αέρα να μειώνονται με το υψόμετρο, αλλά και την απόσταση από την ξηρά. Έτσι, ο λόγος των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας ${}^7\text{Be}/{}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει τη μεταφορά που σχετίζεται με τη δυναμική των αερίων μαζών. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά αυτών των δύο ραδιενεργών ισοτόπων μπορούν να επιτρέψουν την εκτίμηση της σχετικής σπουδαιότητας των στρατοσφαιρικών και τροποσφαιρικών διαδρομών μεταφοράς αερίων μαζών, καθιστώντας τα ιδανικά εργαλεία απεικόνισης των **διεργασιών μεταφοράς** που λαμβάνουν χώρα σε ολόκληρη την ατμόσφαιρα (Baskaran, 1995, 2011, Pham et al., 2011).

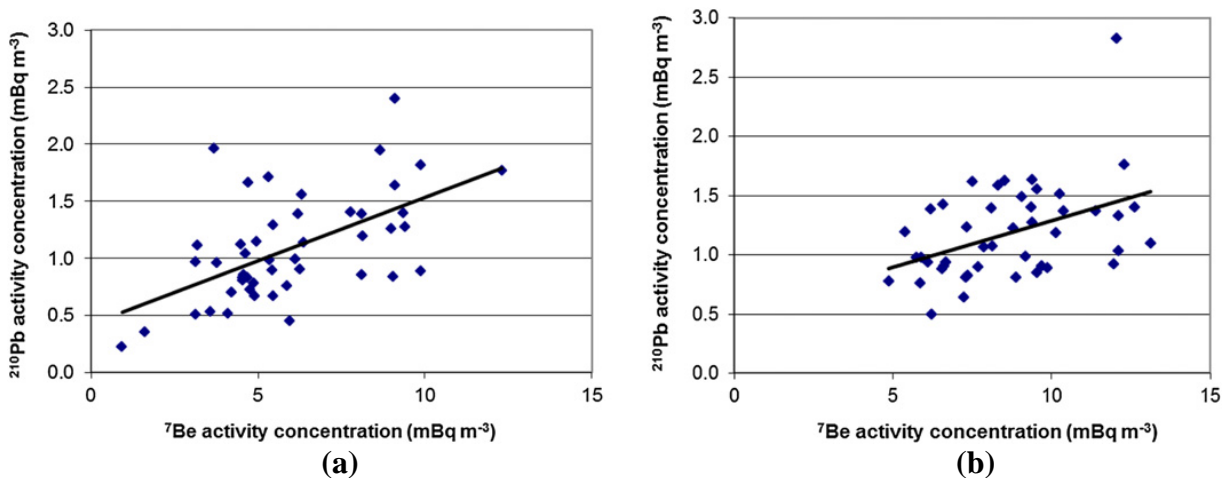
- Η Εικόνα 3.94 συγκρίνει τις μεταβολές των λόγων ραδιενέργειας ${}^7\text{Be}/{}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για την 11ετή περίοδο 1998-2009 στο επιφανειακό αέρα στο Μονακό (~44°N, 7°E) (Pham et al., 2011). Οι λόγοι ραδιενέργειας ${}^7\text{Be}/{}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ κυμαίνονταν μεταξύ 1 και 13, εκτός από υψηλή τιμή που παρατηρήθηκε τον Ιανουάριο 2005, λόγω της ελάχιστης τιμής του ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (0,22mBq m⁻³). Γενικά τα μέγιστα ${}^7\text{Be}/{}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλών θερμοκρασιών. Αυτό οφείλεται στις υψηλές συγκεντρώσεις ${}^7\text{Be}$ που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας ενισχύει την κατακόρυφη μεταφορά των σωματιδίων, στα οποία έχει προσκολληθεί ${}^7\text{Be}$, από την ανώτερη τροπόσφαιρα προς τον επιφανειακό αέρα. Το καλοκαίρι, οι κινήσεις αερίων μαζών λόγω μεταφοράς θερμότητας του ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ προς τα πάνω και του ${}^7\text{Be}$ προς τα κάτω, οδηγεί σε ένα μέγιστο του λόγου ${}^7\text{Be}/{}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Από την άλλη, τα ελάχιστα του λόγου ${}^7\text{Be}/{}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών καθώς η μείωση της θερμοκρασίας μπορεί να εμποδίζει τη διαφυγή ραδονίου από το έδαφος (Pham et al., 2011). Πάντως, οι περισσότερες μεταβολές των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων ${}^7\text{Be}$ και ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ οφείλονται σε αλλαγές του ύψους ανάμιξης του επιφανειακού αέρα.



Εικόνα 3.94

Χρονικές μεταβολές του λόγου ${}^7\text{Be}/{}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα στο Μονακό (~ 44°N, 7°E) για την 11ετή χρονική περίοδο 1998-2009. (Pham et al., 2011)

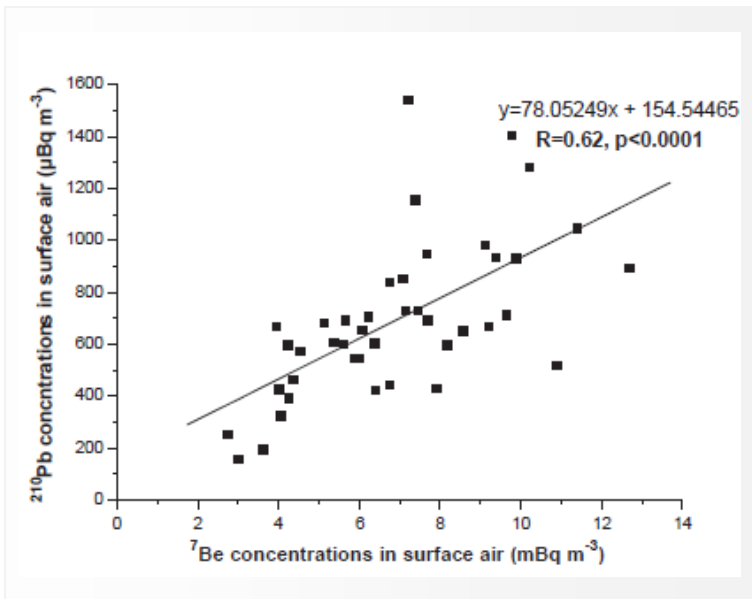
- Καθώς οι πηγές των ${}^7\text{Be}$ και ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ είναι διαφορετικές, μια συσχέτιση μεταξύ τους υποδηλώνει ενδεχομένως μια παρόμοια ατμοσφαιρική συμπεριφορά τους. Επίσης, η ηλιακή δραστηριότητα μπορεί να επιδρά σ' αυτή τη συσχέτιση. Για το λόγο αυτό, οι συγκεντρώσεις του ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ συναρτήσκει των συγκεντρώσεων ${}^7\text{Be}$ στον επιφανειακό αέρα στο Μονακό (Pham et al., 2011) σχεδιάστηκαν για διαφορετικές περιόδους (Εικόνα 3.95): (a) για τη χρονική περίοδο 2000-2006 (ίδια με την περίοδο μελέτης των Duenas et al., 2009, Malaga, Ισπανία) και (b) για τη χρονική περίοδο 2006-2010. Στην πρώτη περίπτωση, ο συντελεστής συσχέτισης ($r=0,57$) ήταν κοντά στην τιμή που προέκυψε για ολόκληρη την περίοδο 1998-2009 ($r=0,5$) καθώς επίσης και στην τιμή που βρέθηκε στη Malaga ($r=0,62$), ενώ στη δεύτερη περίπτωση, ήταν μικρότερος ($r=0,43$). Οι παρατηρούμενες διαφορές ανάμεσα στο Μονακό και στη Malaga οφείλονται ενδεχομένως στη διαφορετική γεωγραφική θέση τους. Συγκεκριμένα, η θέση δειγματοληψίας στο Μονακό βρίσκεται είναι παραθαλάσσια (με πολύ περιορισμένη κυκλοφοριακή κίνηση) και επηρεάζεται από θαλάσσιες αέριες μάζες με χαμηλότερες συγκεντρώσεις ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Αντίθετα, η θέση δειγματοληψίας στη Malaga βρίσκεται 5km μακριά από τη θάλασσα και περιβάλλεται από δρόμους με έντονη κυκλοφορία (και συσχετιζόμενα μ' αυτήν αιωρούμενα σωματίδια).



Εικόνα 3.95

Συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ${}^7\text{Be}$ στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα στο Μονακό ($\sim 44^\circ\text{N}$, 7°E) για τη χρονική περίοδο: (a) 2000-2006 και (b) 2006-2010. (Pham et al., 2011)

- Από την ταυτόχρονη καταγραφή των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των ${}^7\text{Be}$ και ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα που πραγματοποιήθηκε στη Θεσσαλονίκη ($\sim 40^\circ\text{N}$, 23°E) για τη 15ετή χρονική περίοδο 1987-2001 (Ioannidou et al., 2005), προέκυψε θετική συσχέτιση ($r=0,62$) μεταξύ των μηνιαίων συγκεντρώσεων των δύο αυτών ραδιενεργών ισοτόπων κατά την καλοκαιρινή περίοδο (Εικόνα 3.96) (οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ${}^7\text{Be}$ διορθώθηκαν ώστε να ληφθεί υπόψη ο 11ετής κύκλος του ήλιου, αφού οι συγκεντρώσεις του ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ δεν επηρεάζονται απ' αυτόν). Η θετική συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων των δύο αυτών ραδιενεργών ισοτόπων υποδηλώνει ότι οι περιβαλλοντικές διεργασίες έχουν μεγαλύτερη επίδραση στις χρονικές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις τους από ό,τι οι πηγές προέλευσής τους.



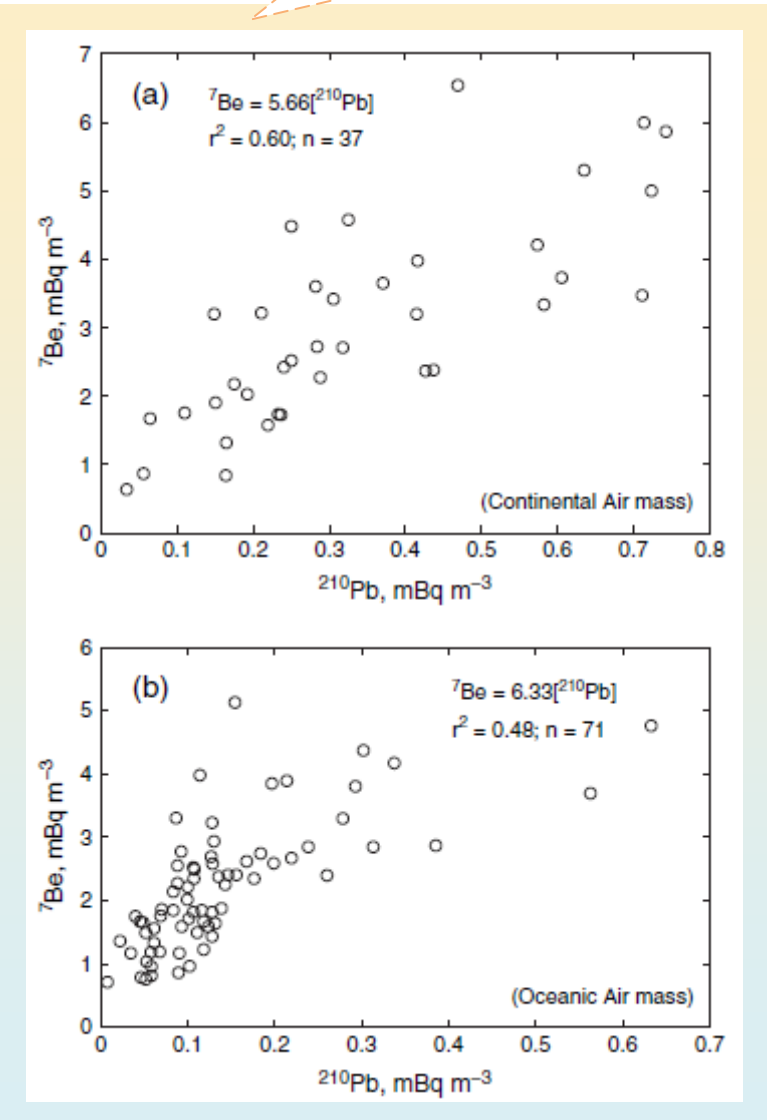
Εικόνα 3.96
 Μηνιαίες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ συναρτήσει του ^7Be , για τους καλοκαιρινούς μήνες της 15ετούς χρονικής περιόδου 1987 - 2001.
 (Ioannidou et al., 2005)

Η προέλευση των αερίων μαζών προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας ανάλυση τροχιάς (trajectory analysis) και πεδία ανέμων από το μοντέλο πρόβλεψης ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts).

- Ένα διάγραμμα των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^7Be στον επιφανειακό αέρα συναρτήσει αυτών του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ μπορεί επίσης να αποτελέσει έναν δείκτη του ότι ο αέρας που προέρχεται από ηπειρωτικής περιοχές είναι πιο πλούσιος σε $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ από αυτόν που προέρχεται από θαλάσσιες περιοχές. Για παράδειγμα, από τα διαγράμματα της Εικόνας 3.97, τα οποία αντιπροσωπεύουν δύο ομάδες δεδομένων: αέριες μάζες που προέρχονται (a) από ηπειρωτικές περιοχές και (b) από τον ωκεανό, διαπιστώνουμε ότι και οι δύο ομάδες δίνουν καλές συσχετίσεις, με λόγο 1,12 (Likuku, 2006):

$$\frac{\left(\frac{^7\text{Be}}{^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}} \right)_{\omega\kappa\epsilon\acute{\alpha}\nu\iota\omicron\varsigma}}{\left(\frac{^7\text{Be}}{^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}} \right)_{\eta\pi\epsilon\iota\rho\omega\tau\iota\kappa\acute{\omicron}\varsigma}} = 1,12$$

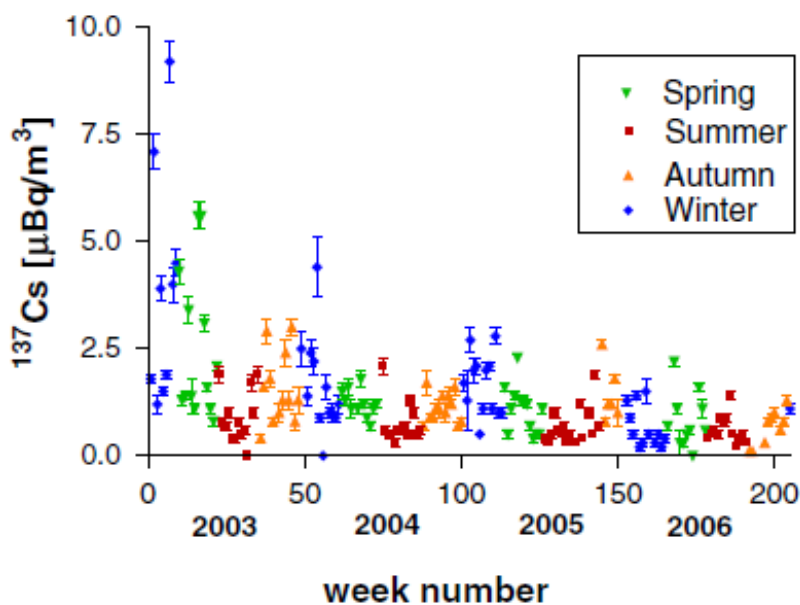
Εικόνα 3.97 Η επίδραση της προέλευσης των αερίων μαζών στις συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be στον επιφανειακό αέρα: (a) ηπειρωτική προέλευση και (b) ωκεάνια προέλευση. (Likuku, 2006)



3.8.10 Χρονικές μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{137}C στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα

Οι μεταβολές της συγκέντρωσης ^{137}Cs στον επιφανειακό αέρα επηρεάζονται κυρίως από την επαναιώρηση σωματιδίων από το έδαφος και από την καύση της βιομάζας (Bourcier et al, 2010), κυρίως τον χειμώνα. Η διεργασία της επαναιώρησης εξαρτάται από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, όπως είναι η ταχύτητα του ανέμου, οι υψηλές θερμοκρασίες, η κατακρήμνιση και η κίνηση των αερίων μαζών, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από μήνα σε μήνα.

Για παράδειγμα, η συγκέντρωση του ^{137}Cs στον επιφανειακό αέρα στην Πολωνία παρουσιάζει κάποια κυκλική δομή (διάγραμμα Εικόνας 3.98) με τα ελάχιστα να απαντώνται κατά την περίοδο τέλη άνοιξης - αρχές καλοκαιριού, όταν η υψηλή βλάστηση περιορίζει την επαναιώρηση. Μέγιστα παρατηρούνται τον χειμώνα, γεγονός που αποδίδεται στις καύσεις ξύλων και βιομάζας, αφού η επαναιώρηση δεν αποτελεί την κυρίαρχη διεργασία καθώς τον χειμώνα στην Πολωνία το έδαφος καλύπτεται με χιόνι (Blazej and Mietelski, 2014).

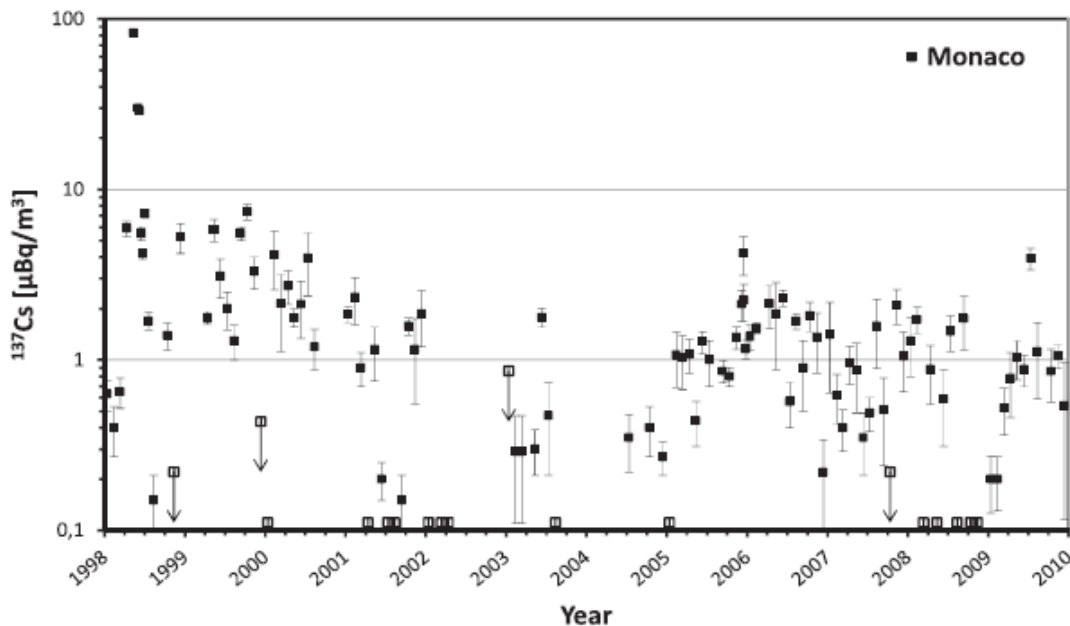


Εικόνα 3.98

Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης ^{137}Cs στον επιφανειακό αέρα στην περιοχή Krakow, Πολωνία (~ 50°N, 20°E, 240m a.s.l.) για τη χρονική περίοδο 2003-2006.

(Blazej and Mietelski, 2014)

Εντούτοις, στον επιφανειακό αέρα στο Μονακό, δεν παρατηρήθηκε καμιά διακριτή εποχιακή επίδραση (διάγραμμα Εικόνας 3.99) στις μεταβολές των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ^{137}Cs (Pham et al., 2011).



Εικόνα 3.99 Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης ^{137}Cs στον επιφανειακό αέρα στο Μονακό (~ 44°N , 7°E), για τη χρονική περίοδο 1998-2010 [οι πολύ μεγαλύτερες τιμές του Μαΐου-Ιουνίου 1998 οφείλονται σε απελευθέρωση ^{137}Cs εξαιτίας ατυχήματος σε εργοστάσιο χάλυβα στην περιοχή Algeciras της νότιας Ισπανίας]. (Pham et al., 2011)

3.9 Ροή και χωρική κατανομή εναπόθεσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης

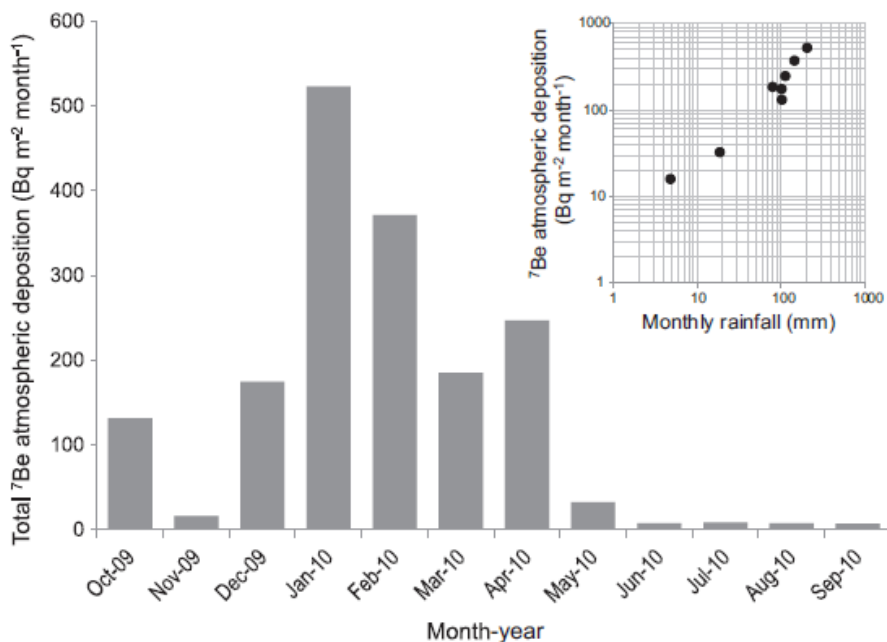
Τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα εναποτίθενται στην επιφάνεια της γης κυρίως με τη διεργασία της υγρής εναπόθεσης (§3.2). Η γνώση της ροής εναπόθεσής τους, ιδιαίτερα των ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , καθώς και της χωρικής κατανομής της, είναι σημαντική για τη μελέτη διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος.

3.9.1 Ροή και χωρική κατανομή εναπόθεσης του ^7Be από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης

Η εναπόθεση ^7Be στην επιφάνεια της γης παρουσιάζει αύξηση κατά τη διάρκεια της υγρών περιόδων, όταν οι βροχοπτώσεις σαρώνουν το ατμοσφαιρικό αεροζόλ. Για μεμονωμένα περιστατικά βροχοπτώσεως, η εναπόθεση σχετίζεται με το ποσό της βροχοπτώσεως κι επομένως οι εποχιακές ροές εναπόθεσης είναι στενά συνδεδεμένες με τη βροχοπτώση, αντικατοπτρίζοντας τους μηνιαίους όγκους των βροχοπτώσεων (Doering and Akber, 2008, Ayub et al., 2009). Μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις, η εναπόθεση ^7Be παρουσιάζει γραμμική σχέση με το ποσό της μηνιαίας βροχοπτώσεως (Conaway et al., 2013) (Εικόνα 3.100).

Παρόλα αυτά, όχι όνο η βροχοπτώση, αλλά ένας σύνθετος συνδυασμός παραγόντων, οι οποίοι περιλαμβάνουν την ηλιακή δραστηριότητα, την ανταλλαγή αερίων μαζών μεταξύ στρατόσφαιρας-τροπόσφαιρας και τις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες, καθορίζει τη

συγκέντρωση του ^7Be , που είναι διαθέσιμη για σάρωση στην τροπόσφαιρα, επηρεάζοντας έτσι τις ροές απόθεσης του ^7Be στην επιφάνεια της γης. Από τον πίνακα της Εικόνας 3.101, ο οποίος περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος των τιμών εναπόθεσης ^7Be και μεγέθους των βροχοπτώσεων, αναδεικνύεται το γεγονός ότι η ροή εναπόθεσής του δεν καθορίζεται μόνο από έναν παράγοντα (π.χ. τη βροχόπτωση).



Εικόνα 3.100

Μηνιαία εναπόθεση ^7Be στη Santa Cruz (37°N, 122°W), CA, USA. Η ενσωματωμένη γραφική παράσταση (πάνω δεξιά), η οποία απεικονίζει (σε λογαριθμική κλίμακα) τη μηνιαία εναπόθεση του ^7Be για τους μήνες της υγρής περιόδου συναρτήσει της μηνιαίας βροχόπτωσης, παρουσιάζει γραμμική σχέση μεταξύ τους.

**Conaway et al.
(2013)**

Εικόνα 3.101

Πίνακας με τις ετήσιες μέσες ροές εναπόθεσης ^7Be και βροχόπτωσης σε διαφορετικές περιοχές με συγκρίσιμα γεωγραφικά πλάτη.

Fallout ($\text{Bq m}^{-2} \text{y}^{-1}$)	Location	Latitude	Rainfall (mm)
412	Malaga, Spain	36° N	308
469	Granada, Spain	37° N	452
528	Damascus, Syria	33° N	153
867	Arkansas, USA	38° N	1070
898	Chilton, UK	51° N	822
1030	Canberra, Australia	35° S	660
1249	Heidelberg, Germany	52° N	810
1267	Bombay, India	19° N	2277
1618	Milford Haven, UK	51° N	1328
2133	New Hampshire, USA	41.5° N	na
2625	Devon, UK	51° N	901
2767	Massachusetts, USA	43° N	na
2850	Bermuda	33° N	1700
2968	Galvetson, Texas, USA	29° N	1390
3780	New Haven, Connecticut, USA	41° N	1240

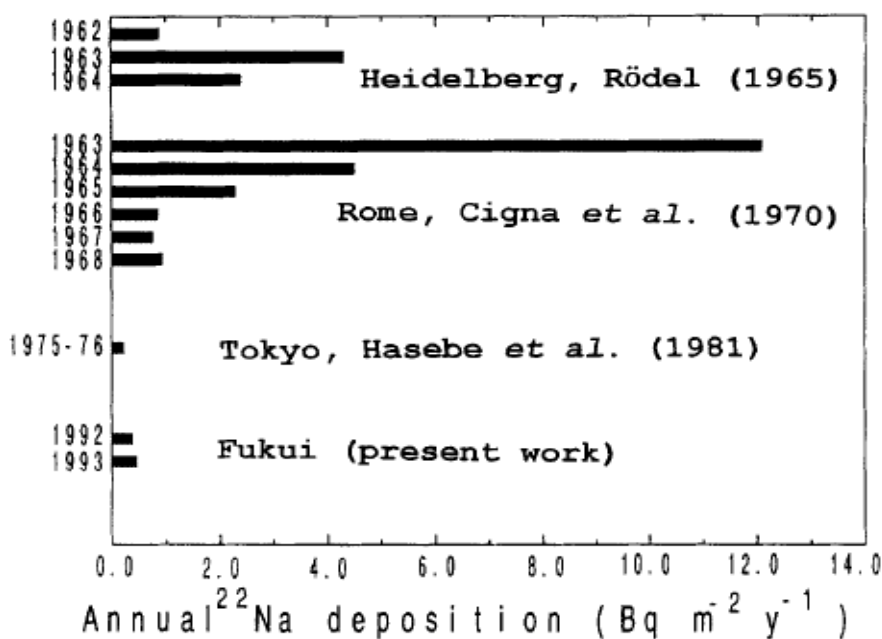
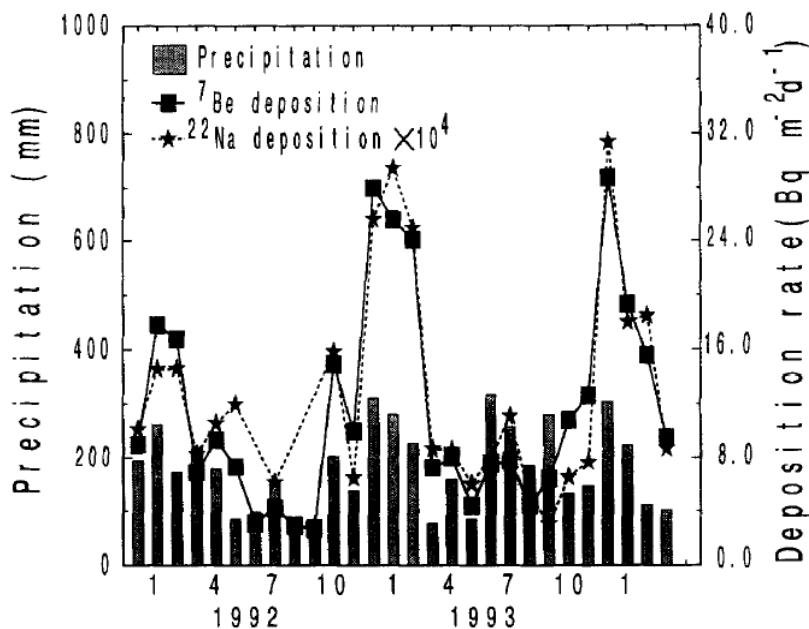
na = data not available

3.9.2 Ροή και χωρική κατανομή εναπόθεσης του ^{22}Na από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης

Όσον αφορά στην εναπόθεση του ^{22}Na στην επιφάνεια της γης, παραθέτουμε μερικά στοιχεία για την πόλη Fukui City (36°N , 136°E) στην Ιαπωνία (Tokuyama and Igarashi, 1998). Όπως συμβαίνει με τις συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ^{22}Na στον επιφανειακό αέρα, έτσι και η ετήσια ροή εναπόθεσής του στην επιφάνεια της γης έχει βρεθεί να είναι τέσσερις τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτή του ^7Be . Ο ρυθμός εναπόθεσης του ^{22}Na βρέθηκε να παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή, με τις τιμές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού να είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερες από αυτές του χειμώνα (Εικόνα 3.102). Στην Εικόνα 3.103 φαίνεται επίσης ο ετήσιος ρυθμός εναπόθεσης σε διάφορες πόλεις.

Εικόνα 3.102

Μηνιαία κύμανση του ρυθμού εναπόθεσης ^7Be και ^{22}Na και μηνιαία κατακρήμνιση στη Fukui City (36°N , 136°E), Ιαπωνία. Η μέση τιμή του ετήσιου ρυθμού εναπόθεσης του ^{22}Na για τη 2ετή χρονική περίοδο 1992-1993 ήταν $0,42 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$, τέσσερις τάξεις μεγέθους μικρότερη από την αντίστοιχη του ^7Be $4,2 \times 10^3 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$. (Tokuyama and Igarashi, 1998)



Εικόνα 3.103

Ετήσιος ρυθμός εναπόθεσης ^{22}Na σε διάφορες πόλεις. Τα υψηλά επίπεδα κατά τη δεκαετία του '60 οφείλονται στο τεχνητό ^{22}Na που είχε παραχθεί από τις συχνές ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές εκείνης της περιόδου. Μετά το 1975 η προέλευσή του θεωρείται μόνο φυσική. (Tokuyama and Igarashi, 1998)

3.9.3 Ροή και χωρική κατανομή εναπόθεσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης

Η παγκόσμια χωρική μορφή της εναπόθεσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ χαρακτηρίζεται από μεγάλη χωρική κύμανση εξαιτίας των επικρατέστερων από δυτικά προς ανατολικά κινήσεων των αερίων μαζών (westerlies)⁽²⁶⁾. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αφενός τη μικρή εναπόθεση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στις δυτικές περιοχές των ηπείρων, όπου οι αέριες μάζες έχουν ταξιδέψει πάνω από τους ωκεανούς, και αφετέρου πολύ μεγαλύτερη εναπόθεση $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στις ανατολικές περιοχές των ηπείρων, όπου οι αέριες μάζες έχουν περάσει πάνω από το εσωτερικό των ηπείρων. Οι Beks et al., (1998) εκτίμησαν ότι η ροή εναπόθεσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στις ηπειρωτικές περιοχές είναι $220\text{-}330 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$, ενώ στις ωκεάνιες περίπου μόνο $3 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$.

Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί σημαντική συσχέτιση μεταξύ της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (mm) και των μέσων ετησίων ροών του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Bq m^{-2}), υποδηλώνοντας ότι η υγρή εναπόθεση είναι ο κύριος μηχανισμός σύρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα.

Σε παγκόσμια κλίμακα, η ροή εναπόθεσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ αναφέρεται ανάμεσα στις τιμές: $23\text{-}367 \text{ Bq m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (Turekian et al., 1977, Robbins, 1978). Μια επισκόπηση της παγκόσμιας κύμανσης της συνολικής ετήσιας ροής εναπόθεσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ παρουσιάζεται στον πίνακα της Εικόνας 3.104. Ενδεικτικά, αναφέρουμε επίσης μερικές τιμές της ετήσιας ροής του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στην Ευρώπη (πίνακας Εικόνας 3.105).

Εικόνα 3.104

Πίνακας με τις τιμές της συνολικής ετήσιας εναπόθεσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε διαφορετικές περιοχές παγκοσμίως. (Turekian et al., 1977)

Location	Mean ^{210}Pb deposition rate ($\text{Bq m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)
Suva, Fiji	80
Auckland, New Zealand	50
Delhi, India	133
Calcutta, India	102
Bombay, India	250
Sydney, Australia	53
Alice Springs, Australia	57
Darwin, Australia	95
Hokkaido, Japan	367
Milford Haven, UK	85
Moscow, Russia	115
New Haven, USA	153

⁽²⁶⁾ Βλ. Παράρτημα Β.5

Εικόνα 3.105

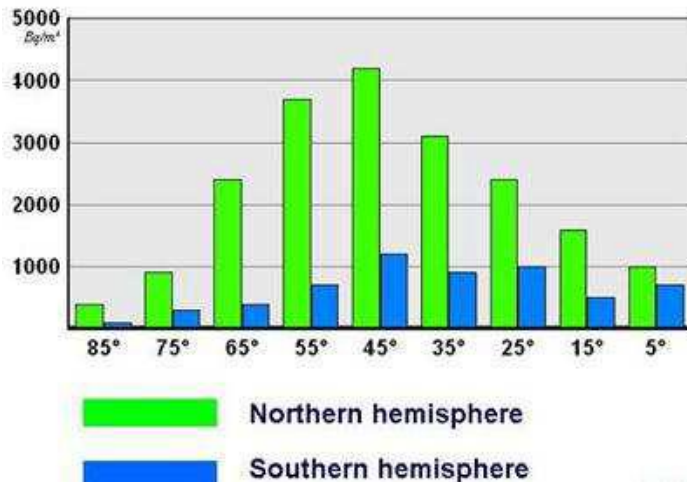
Πίνακας με τις τιμές της συνολικής ετήσιας εναπόθεσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε περιοχές της Ευρώπης.

Τοποθεσία	Ροή εναπόθεσης $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ($\text{Bq m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)				Χρονική περίοδος	
	Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή			
Νότια Γερμανία	180	120	250	1981-1999	Winkler & Rosner, 2000	
Βουδαπέστη, Ουγγαρία	81	44	100	1999-2006	CRLFFSD, 2006	
Νότια Ιταλία	161			τελευταίος αιώνας	Porto et al., 2006	
Νότια Ιταλία	241			2006-2009	Porto et al., 2012	

3.9.4 Ροή και χωρική κατανομή εναπόθεσης του ^{137}Cs από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης

Το ανθρωπογενούς προέλευσης ^{137}Cs , που ελευθερώθηκε στη στρατόσφαιρα εξαιτίας των πυρηνικών δοκιμών, κυκλοφόρησε παγκοσμίως πριν εναποτεθεί στην επιφάνεια του εδάφους. Η εναπόθεσή του σχετίστηκε πρωτίστως με την κατακρήμνιση, αλλά τοπικά, γύρω από τις τοποθεσίες των πυρηνικών δοκιμών, η ξηρή εναπόθεση ήταν επίσης σημαντική. Η παγκόσμια εναπόθεση του ^{137}Cs εκτείνεται από τα μέσα της δεκαετίας του '50 μέχρι τη δεκαετία του '70, με τη μέγιστη απόθεσή του να έχει συμβεί το 1963 στο βόρειο ημισφαίριο. Μετά την αναστολή των πυρηνικών δοκιμών και τη συμφωνία απαγόρευσής τους, που υπογράφηκε το 1963, οι παγκόσμιοι ρυθμοί εναπόθεσής του μειώθηκαν σταθερά, εκτός από μικρές περιόδους το 1971 και 1974 εξαιτίας πυρηνικών δοκιμών από χώρες, που δεν συμμετείχαν στη συμφωνία. Η απελευθέρωση ^{137}Cs στην ατμόσφαιρα από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl χαρακτηρίζεται από μια πιο τοπική ετερογενή χωρική κατανομή. Άλλες απελευθερώσεις ^{137}Cs , που έχουν συμβεί από πυρηνικές εγκαταστάσεις, είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά με αυτή στο Chernobyl και με περιορισμένες τοπικές επιπτώσεις.

Η συνολική εναπόθεση ^{137}Cs στο βόρειο ημισφαίριο είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή στο νότιο ημισφαίριο (Εικόνα 3.106). Οι δύο σημαντικότεροι παράγοντες για αυτή τη γεωγραφικού πλάτους διαφορά είναι πρώτον το γεγονός ότι οι περισσότερες πυρηνικές δοκιμές διεξήχθησαν στο βόρειο ημισφαίριο και δεύτερον η περιορισμένη ένταση της ανταλλαγής αέρα ανάμεσα στα δύο ημισφαίρια. Παρόλα αυτά, οι παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs στο νότιο ημισφαίριο είναι μετρήσιμες όταν γίνεται χρήση κατάλληλων ανιχνευτών και χρόνων ανάλυσης. Οι τιμές της ετήσιας ροής εναπόθεσης του ^{137}Cs (Bq m^{-2}) από το 1954 για τοποθεσίες του βόρειου και νότιου ημισφαιρίου, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι εναποθέσεις του ^{137}Cs που σχετίζονται με το Chernobyl, περιλαμβάνονται στον πίνακα της Εικόνας 3.107. Η προκαθορισμένη τιμή για τα έτη μετά το 1983 είναι μηδέν.



Εικόνα 3.106

Εναπόθεση του ¹³⁷Cs σε παγκόσμια κλίμακα συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους.

(Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77)

Εικόνα 3.107

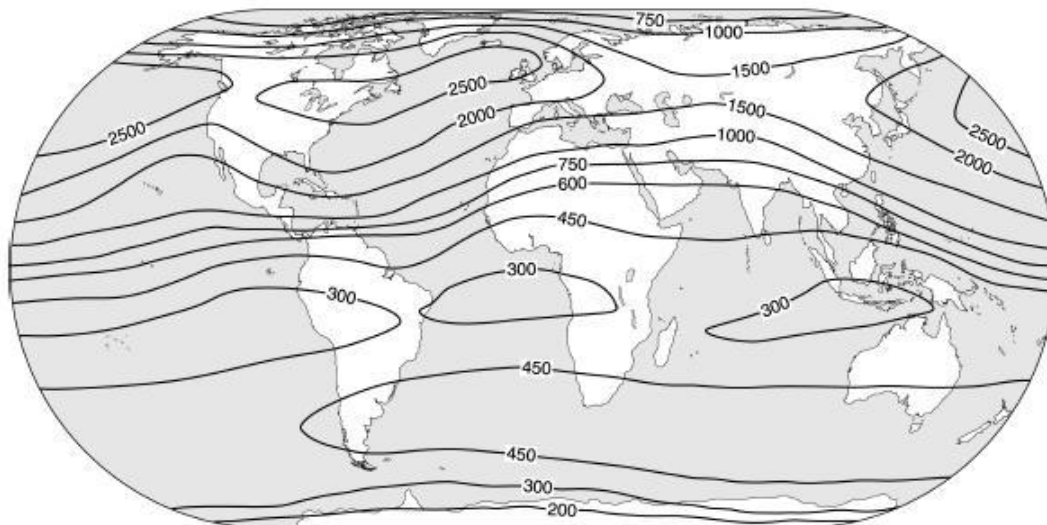
Πίνακας που περιλαμβάνει τις τιμές της ετήσιας εναπόθεσης του ¹³⁷Cs (Bq m⁻²) για αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο. (Walling et al., In: Zapata (ed), 2002, pp. 111-162)

Fallout input (Bq m ⁻²)					
Year	N. hem. ^a	S. hem. ^b	Year	N. hem. ^a	S. hem. ^b
1954	56.5	26.8	1997	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	1995	0.00	0.00
1974	35.3	53.7	1997	0.00	0.00
1975	28.2	35.8	1978	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.

Η χωρική κατανομή της εναπόθεσης του ^{137}Cs καθορίζεται από την τοποθεσία των πυρηνικών δοκιμών, τη στρατοσφαιρική κυκλοφορία και μεταφορά καθώς και το ποσό της ετήσιας κατακρήμνισης. Η χωρική μορφή της εναπόθεσης παρουσιάζει έναν εμφανή χωρισμό σε ζώνες γεωγραφικού πλάτους (Εικόνα 3.108).



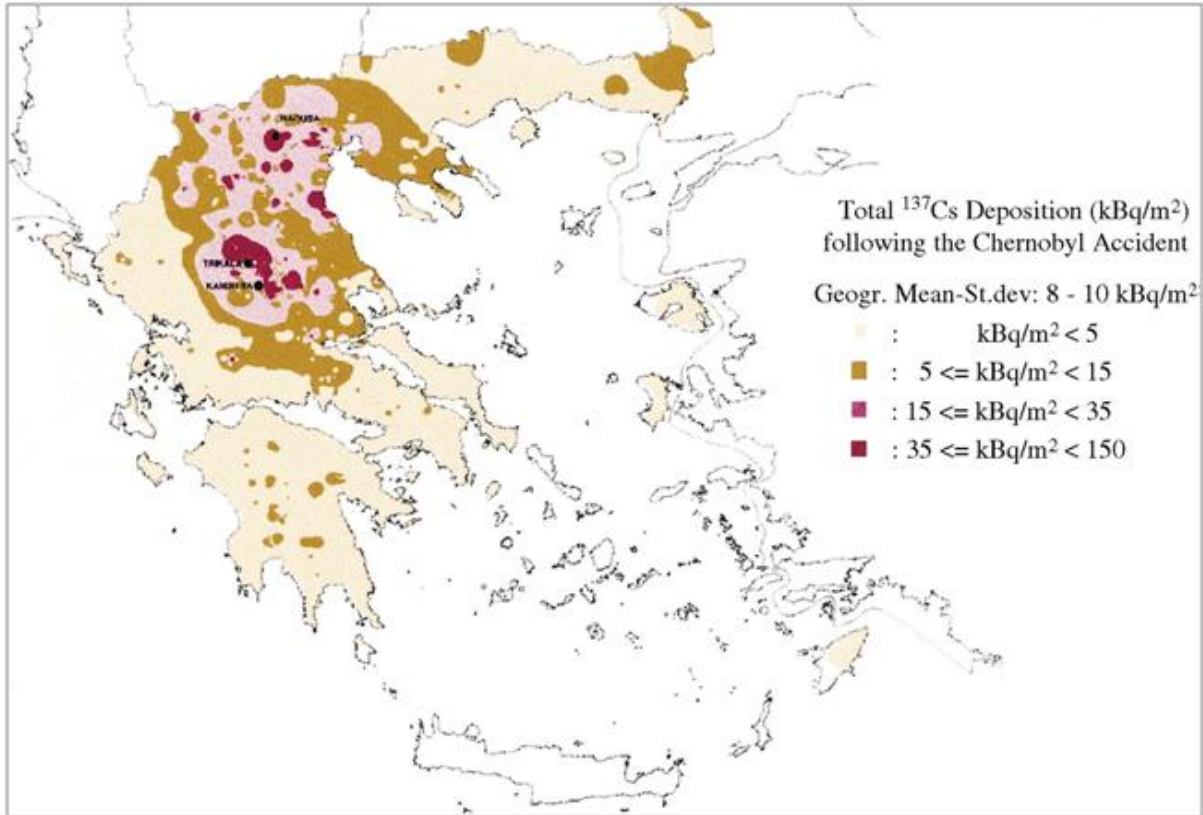
Εικόνα 3.108

Μια προσεγγιστική απεικόνιση, κατά το έτος 1998, σε παγκόσμια κλίμακα της κατανομής του προερχόμενου από τις πυρηνικές δοκιμές ^{137}Cs . Η παγκόσμια μορφή της εναπόθεσής του υποδηλώνει ότι κυμαίνεται από 160 και 3200 Bq m^{-2} περίπου, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος.

(Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77)

Η εναπόθεση του ^{137}Cs , το οποίο απελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα από πυρηνικά ατυχήματα, όπως αυτό στο Chernobyl, χαρακτηρίζεται από μια πιο τοπική ετερογενή χωρική κατανομή, η οποία αντανακλά την ατμοσφαιρική κυκλοφορία και την κατανομή των κατακρήμνισεων αμέσως μετά την απελευθέρωση. Σε κάποιες περιοχές της Ευρώπης, η εναπόθεση ^{137}Cs εξαιτίας του Chernobyl, αύξησε τις προϋπάρχουσες από τις πυρηνικές δοκιμές παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs κατά μερικές τάξεις μεγέθους. Για παράδειγμα, στη Ρωσία οι παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs μετά το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl έφτασαν τα 500 kBq m^{-2} , δηλαδή μεγαλύτερα από δύο τάξεις μεγέθους. Άλλες απελευθερώσεις ^{137}Cs , που έχουν συμβεί από πυρηνικές εγκαταστάσεις, είναι πολύ μικρές συγκριτικά με αυτή στο Chernobyl και με περιορισμένες τοπικές επιπτώσεις.

Για τις τοποθεσίες εκείνες, όπου η σχετιζόμενη με το Chernobyl εναπόθεση του ^{137}Cs ήταν σημαντική, η ροή εναπόθεσης του ^{137}Cs ($\text{Bq m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) μπορεί να υπολογιστεί εάν είναι γνωστή η ροή εναπόθεσής του κατά το έτος 1986. Αναλυτικές πληροφορίες για το ατύχημα και την επακόλουθη εναπόθεση του ^{137}Cs στα εδάφη των ευρωπαϊκών χωρών παρέχονται στο «Atlas of Caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident» (De Cort, 1998). Η χαρτογράφηση της εναπόθεσης του ^{137}Cs στα εδάφη της Ελλάδας μετά το ατύχημα στο Chernobyl παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.109. Η μέση εναπόθεση του ^{137}Cs στο Ελληνικό έδαφος υπολογίστηκε ίση με 10 kBq m^{-2} ενώ, η μέγιστη τιμή ήταν 149 kBq m^{-2} (Simopoulos, 1989, Petropoulos et al., 1996, 2001).



Εικόνα 3.109

Χαρτογράφηση της επιφανειακής εναπόθεσης του ^{137}Cs (kBq m^{-2}) στα Ελληνικά εδάφη κατά το έτος 1986, μετά από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl. (Petroopoulos et al., 2001)

3.10 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα - Μελλοντικές προοπτικές

Τα κοσμικής προέλευσης ραδιενεργά ισότοπα ^7Be ($T_{1/2} = 53,3$ ημέρες), ^{10}Be ($T_{1/2} = 1,5 \times 10^6$ έτη) και ^{22}Na ($T_{1/2} = 2,6$ έτη), το γεωγενές ισότοπο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ($T_{1/2} = 22,3$ έτη) καθώς και το τεχνολογικά επαγόμενο ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,2$ έτη) έχουν χρησιμοποιηθεί ως **ιχνηλάτες ατμοσφαιρικών διεργασιών** διότι αμέσως μετά την παραγωγή τους έχουν την τάση να προσκολλώνται στα σωματίδια του ατμοσφαιρικού αεροζόλ, με αποτέλεσμα να παίρνουν μέρος στις ατμοσφαιρικές διεργασίες. Σημαντικό ρόλο στη χρήση τους ως ιχνηλάτες παίζουν επίσης οι διαφορετικές πηγές προέλευσής τους καθώς και οι διαφορετικοί χρόνοι υποδιπλασιασμού τους. Πιο συγκεκριμένα, τα κυριότερα θέματα, που συμπεριελήφθησαν στο Κεφάλαιο αυτό, είναι τα εξής:

- Τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα και στη συνέχεια εναποτίθενται στην επιφάνεια της γης με τις διεργασίες: της *ξηρής εναπόθεσης* (dry deposition) και της *υγρής εναπόθεσης* (wet deposition). Η τελευταία είναι περισσότερο σημαντική, επιτυγχάνεται με τη *σάρωση μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων* (scavenging by precipitation) και περιλαμβάνει τους μηχανισμούς της *απόπλυσης* (washout)

και της βροχόπλυσης (rainout). Η επαναιώρηση (resuspension) αποτελεί επίσης μια σημαντική διεργασία που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Μεγέθη που προσδιορίζουν τις παραπάνω διεργασίες είναι: ο συντελεστής καθαρισμού της ατμόσφαιρας (washout ratio ή precipitation ratio), η ταχύτητα εναπόθεσης (deposition velocity) και ο παράγοντας επαναιώρησης (resuspension factor).

- Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αέρα χρησιμοποιώντας ειδικές αντλίες ή/και δειγματοληψίες υγρών κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι) χρησιμοποιώντας ειδικούς δειγματολήπτες και να ακολουθεί επεξεργασία και ανάλυσή των δειγμάτων. Οι μέθοδοι και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται διαφέρουν από εργαστήριο σε εργαστήριο. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ γίνονται συνεχείς προσπάθειες για περαιτέρω βελτίωσή τους, όπως είναι ο «ημερήσιος κύκλος δειγματοληψιών φίλτρων», δηλαδή η διαδοχική δειγματοληψία φίλτρων αέρα, κάθε 4 ώρες, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας που αποσκοπεί στη μελέτη της ημερήσιας κύμανσης του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα
- Σε δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ και ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, η μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ^7Be και ^{137}Cs πραγματοποιείται με φασματοσκοπία-γ, με τα παραπάνω ραδιενεργά ισότοπα να ανιχνεύονται στα **477,6keV** και **661,7keV**, αντίστοιχα. Ο προσδιορισμός του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ πραγματοποιείται συνήθως με γ-φασματοσκοπική ανάλυση χαμηλών ενεργειών στα **46,5 keV**, εντούτοις έχουν επίσης αναφερθεί χρήσεις φασματοσκοπίας-α, καταμέτρησης-β και φασματοσκοπίας μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος. Η ανίχνευση του ^{22}Na , η οποία παρουσιάζει περιορισμούς, καθώς το ^{22}Na απαντάται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, έχει πραγματοποιηθεί με φασματοσκοπία-γ στα **1275 keV**, χρησιμοποιώντας διατάξεις πολύ χαμηλού υπόβαθρου ή / και τεχνικές φασματοσκοπικής ανάλυσης γ - γ σύμπτωσης / αντισύμπτωσης. Για τον προσδιορισμό του ^{10}Be έχει χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά η φασματοσκοπία μάζας με επιταχυντή.
- Η μελέτη της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων ^{137}Cs , ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στα νέφη και της απόδοσης σάρωσης του ατμοσφαιρικού αεροζόλ από τα σταγονίδια των νεφών, αν και χρήζει περαιτέρω διερευνήσεως, μπορεί να αποβεί πολύ χρήσιμη σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος καθώς επίσης και σε περιοχές όπου επικρατούν συνθήκες ομίχλης.
- Οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ^7Be , ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στο νερό της βροχής δεν είναι σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια ενός περιστατικού κατακρήμνισης. Οι υψηλότερες τιμές τους απαντώνται στην αρχή του περιστατικού, υποδηλώνοντας ότι η απόδοση του μηχανισμού της σάρωσης από την κατακρήμνιση (scavenging by precipitation) μειώνεται κατά τη διάρκεια ενός περιστατικού κατακρήμνισης (βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης). Επιπλέον, τα περιστατικά χιονόπτωσης είναι πιο αποδοτικά ως προς τη σάρωση των αεροζόλς - φορέων ραδιενεργών ισοτόπων σε σχέση με περιστατικά βροχόπτωσης του ίδιου ρυθμού κατακρήμνισης
- Οι συγκεντρώσεις των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων **κοσμικής προέλευσης** στον ατμοσφαιρικό επιφανειακό αέρα εξαρτώνται από την **ηλιακή δραστηριότητα**, το **γεωμαγνητικό πλάτος** και το **ύψος της τροπόπαυσης**. Ειδικότερα:
 - Ο ρυθμός παραγωγής των ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης επηρεάζεται από την ηλιακή δραστηριότητα, με αποτέλεσμα το μέγεθος της συγκέντρωσής τους στον επιφανειακό αέρα να εξαρτάται από τον 11ετή ηλιακό κύκλο, με τα μέγιστα των συγκεντρώσεων του ^7Be να συμπίπτουν με τον ελάχιστο αριθμό κηλίδων.

- Ο ρυθμός παραγωγής των ραδιενεργών ισοτόπων κοσμικής προέλευσης είναι μεγαλύτερος στα μεγάλα γεωμαγνητικά πλάτη, αλλά επειδή η ανταλλαγή σταρτοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα λαμβάνει χώρα κατά μήκος της αναδίπλωσης της τροπόπαυσης σε περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών, η ατμοσφαιρική συγκέντρωση ${}^7\text{Be}$ στον επιφανειακό αέρα παρουσιάζει υψηλότερες τιμές στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη (20-50°N) και χαμηλότερες τιμές προς τους πόλους και προς τον ισημερινό.
 - Επίσης, η ανύψωση της τροπόπαυσης, η οποία παρουσιάζει εποχιακές μεταβολές, συμπίπτει με μεγαλύτερες παρατηρούμενες συγκεντρώσεις ${}^7\text{Be}$ στον επιφανειακό αέρα.
- Οι συγκεντρώσεις των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό_επιφανειακό αέρα επηρεάζονται από διάφορες **μετεωρολογικές παραμέτρους**, όπως είναι η κατακρήμνιση, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, ο άνεμος και η ατμοσφαιρική πίεση.
- Η **κατακρήμνιση**, με κύριο είδος της τη βροχή, είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τα επίπεδα συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στον επιφανειακό αέρα διότι αποτελεί τον καθοριστικότερο παράγοντα *σάρωσης* του ατμοσφαιρικού αεροζόλ, με αποτέλεσμα να παρατηρείται γενικά μια *αρνητική συσχέτιση* μεταξύ των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισοτόπων στον επιφανειακό αέρα και της κατακρήμνισης, με τις χαμηλότερες τιμές συγκέντρωσης ραδιενέργειας ${}^7\text{Be}$ και ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ να απαντώνται κατά τη διάρκεια των βροχερών περιόδων και τις υψηλότερες τιμές κατά τη διάρκεια των ξηρών εποχών. Μια μη αναμενόμενη θετική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης π.χ. ${}^7\text{Be}$ στον επιφανειακό αέρα και της κατακρήμνισης θα μπορούσε να υποδηλώνει επιπρόσθετη εισαγωγή ${}^7\text{Be}$ λόγω ανάμιξης του επιφανειακού αέρα με αέρα από την υψηλότερη τροπόσφαιρα
 - Έχει παρατηρηθεί μια *θετική συσχέτιση* μεταξύ της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ${}^7\text{Be}$ στον επιφανειακό αέρα και της **θερμοκρασίας**, η οποία αποδίδεται αφενός στην καλύτερη ανάμιξη της τροπόσφαιρας και την ανύψωση της τροπόπαυσης κατά τις θερμές εποχές και αφετέρου στη *μεγαλύτερη ευστάθεια της ατμόσφαιρας* και το *χαμηλόωμα της τροπόπαυσης* κατά τις ψυχρές περιόδους. Επιπλέον, σε περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών, οι υψηλές θερμοκρασίες, που παρατηρούνται το καλοκαίρι, συνδυάζονται με την έλλειψη βροχοπτώσεων κι επομένως την απουσία της σάρωσης από την κατακρήμνιση. Επίσης, η *ασθενής θετική συσχέτιση* μεταξύ των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας του ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα και της θερμοκρασίας μπορεί ενδεχομένως να αντικατοπτρίζει μια *αυξημένη εκροή ${}^{222}\text{Rn}$ από το έδαφος* κατά τις θερμότερες περιόδους και αντίστροφα.
 - Η *αρνητική συσχέτιση*, που έχει παρατηρηθεί, μεταξύ των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των ${}^7\text{Be}$ και ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα και της **σχετικής υγρασίας**, είναι αποτέλεσμα της *εντονότερης συμπύκνωσης*, που λαμβάνει χώρα σε συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας και οδηγεί στο σχηματισμό σωματιδίων ατμοσφαιρικού αεροζόλ μεγαλύτερων διαστάσεων, τα οποία σαρώνονται με μεγαλύτερους ρυθμούς.
 - Η **διεύθυνση του ανέμου** επηρεάζει κυρίως τα επίπεδα συγκέντρωσης του *γεωγενούς* ραδιενεργού ισοτόπου ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα, αφού οι ηπειρωτικές αέριες μάζες χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του, σε σχέση με τις θαλάσσιες.

- Οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ${}^7\text{Be}$ και ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στον επιφανειακό αέρα παρουσιάζουν χαμηλές τιμές κατά τις περιόδους χαμηλών **ατμοσφαιρικών πιέσεων**, διότι οι χαμηλές ατμοσφαιρικές πιέσεις σχετίζονται με επεισόδια έντονων βροχοπτώσεων και κατά συνέπεια με χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας στον επιφανειακό αέρα λόγω της σάρωσης από την κατακρήμιση. Από την άλλη, κατά τη διάρκεια υψηλών ατμοσφαιρικών πιέσεων έχουν παρατηρηθεί υψηλότερες τιμές των συγκεντρώσεών τους, οι οποίες έχουν αποδοθεί στην εντονότερη κατακόρυφη προς τα κάτω ανάμιξη της ατμόσφαιρας, για την περίπτωση του ${}^7\text{Be}$, και στη στασιμότητα των προϊόντων του ${}^{222}\text{Rn}$ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, για την περίπτωση του ${}^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$.
- Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, οι **χρονικές μεταβολές** των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στον επιφανειακό αέρα μπορούν να ερμηνευθούν εξής:
 - Οι πολυετείς μεταβολές των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων **κοσμικής προέλευσης** στον επιφανειακό αέρα εξαρτώνται από τον 11ετή ηλιακό κύκλο.
 - Οι εποχιακές μεταβολές των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων **κοσμικής προέλευσης** στον επιφανειακό αέρα δεν παρουσιάζουν την ίδια τάση σε όλες τις περιοχές διότι κυβερνώνται από διαφορετικές διεργασίες και παράγοντες:
 - της υγρής σάρωσης (στις υποτροπικές περιοχές),
 - της ανταλλαγής στρατοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα και της κατακόρυφης μεταφοράς αέρα μέσα στην τροπόσφαιρα (στις περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών),
 - της οριζόντιας μεταφοράς αέρα μέσα στην τροπόσφαιρα από τα μεσαία στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη και από τα υποτροπικά στα χαμηλότερα,
 - των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών.
 - Στην Ευρώπη, όπως και σε πολλές τοποθεσίες μεσαίων γεωγραφικών πλατών στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο, οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του ${}^7\text{Be}$, όπως επίσης και των ${}^{10}\text{Be}$ και ${}^{22}\text{Na}$, είναι υψηλότερες κατά τη διάρκεια των θερμότερων καλοκαιρινών μηνών και χαμηλότερες κατά τη διάρκεια των ψυχρότερων χειμερινών, γεγονός που ερμηνεύεται από την εντονότερη κατακόρυφη μεταφορά αερίων μαζών λόγω της εντονότερης θέρμανσης, της ανύψωσης της τροπόπαυσης, της χαμηλής σχετικής υγρασίας και της έλλειψης βροχοπτώσεων. Αντίθετα, στην Ιαπωνία αύξηση της συγκέντρωσης ${}^7\text{Be}$ παρατηρείται την άνοιξη και το φθινόπωρο, ως αποτέλεσμα του ζεύγους κυκλώνα-αντικυκλώνα που διέρχεται από τη χώρα εκείνη την περίοδο, ή ακόμη και τον χειμώνα, ως αποτέλεσμα της επίδρασης του πολύ ψυχρού αέρα που πνέει από τη Σιβηρία κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ο οποίος προσκρούει στις πολύ θερμότερες αέριες μάζες που προέρχονται από τον Ειρηνικό ωκεανό.
 - Οι τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τα επίπεδα συγκέντρωσης του ${}^7\text{Be}$ στην τροπόσφαιρα σε ημερήσια κλίμακα. Έτσι, οι ισχυροί άνεμοι και οι έντονες βροχοπτώσεις επηρεάζουν σημαντικά τα επίπεδα συγκέντρωσης του ${}^7\text{Be}$, ενώ η σχετική υγρασία και η ατμοσφαιρική πίεση δεν επιδρούν ιδιαίτερα σε αυτά.

- Οι εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του **γεωγενούς $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$** δεν παρουσιάζουν την ίδια τάση σε όλες τις περιοχές, καθώς αυτές καθορίζονται από τις ατμοσφαιρικές διεργασίες και τα μετεωρολογικά φαινόμενα που επικρατούν στην κάθε περιοχή. Σε χώρες της Ευρώπης (π.χ. Φινλανδία, Γερμανία, Ελλάδα, Ιταλία) έχουν καταγραφεί μεγαλύτερες συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ το φθινόπωρο και τον χειμώνα και μικρότερες την άνοιξη και το καλοκαίρι. Αυτή η εποχιακή τάση συμβαίνει επειδή το *ύψος του στρώματος ανάμιξης* είναι χαμηλότερο κατά τους ψυχρούς μήνες και υψηλότερο κατά τους θερμούς. Κατά τη διάρκεια των ψυχρών περιόδων οι συχνές *αναστροφές θερμοκρασίας* των επιφανειακών ατμοσφαιρικών στρωμάτων έχουν ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση ραδονίου και των προϊόντων της ραδιενεργού διάσπασής του στα στρώματα αέρα που βρίσκονται πάνω από το έδαφος. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια των θερμών περιόδων, οι υψηλότερες θερμοκρασίες συνοδεύονται από *μεγαλύτερες αναταράξεις*, με αποτέλεσμα τον απεμπλουτισμό του επιφανειακού αέρα σε $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ λόγω της μεγαλύτερης ανάμιξης του αέρα μέσα στην τροπόσφαιρα. Εντούτοις, υπάρχουν περιοχές (π.χ. στην Ισπανία) όπου έχουν αναφερθεί υψηλές συγκεντρώσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ το καλοκαίρι και χαμηλότερες κατά τη διάρκεια των άλλων εποχών, γεγονός που αποδίδεται στις μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης, τις κατακρημνίσεις, την υγρασία του εδάφους και την κάλυψη του εδάφους από χιόνι και πάγο, δηλαδή σε συνδυασμό παραγόντων που επηρεάζουν τη διαφυγή ^{222}Rn από το επιφανειακό έδαφος. Από την άλλη, οι ιδιαίτερες μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην Ιαπωνία έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλότερων συγκεντρώσεων $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ την άνοιξη και το φθινόπωρο ή τον χειμώνα.
- Οι ημερήσιες μεταβολές του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ είναι τοπικής κλίμακας και οφείλονται κυρίως στη *διεύθυνση του ανέμου*, η οποία υποδηλώνει την *ηπειρωτική* ή τη *θαλάσσια* προέλευση των αερίων μαζών ή ακόμη και την άφιξη σκόνης από μακρινότερες ηπειρωτικές περιοχές.
- Οι μεταβολές της συγκέντρωσης ^{137}Cs στον επιφανειακό αέρα επηρεάζονται κυρίως από την *επαναιώρηση* σωματιδίων από το έδαφος και από την *κάυση της βιομάζας*. Έτσι, π.χ. στην Πολωνία, έχουν παρατηρηθεί μικρότερες συγκεντρώσεις κατά την περίοδο τέλη άνοιξης - αρχές καλοκαιριού, όταν η υψηλή βλάστηση περιορίζει την επαναιώρηση, ενώ οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις απαντώνται τον χειμώνα, εξαιτίας της καύσης ξύλων και βιομάζας.
- Λόγω της συνεχούς παραγωγής του, του κατάλληλου χρόνου υποδιπλασιασμού του ($T_{1/2}=53,3$ ημέρες) και της σχετικά εύκολης ανίχνευσής του, το ^7Be έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτερα σε μελέτες ατμοσφαιρικών διεργασιών και αποτελεί έναν πολύ καλό **ιχνηλάτη**:
 - της μετακίνησης αερίων μαζών και ειδικότερα:
 - της ανταλλαγής αερίων μαζών μεταξύ στρατόσφαιρας και τροπόσφαιρας ως αποτέλεσμα της αναδίπλωσης της τροπόπαυσης,
 - του ρυθμού *κατακόρυφης* ανάμειξης μέσα στην τροπόσφαιρα, που σχετίζεται με τη θερμότητα,
 - του ρυθμού *οριζόντιας* μεταφοράς αερίων μαζών από τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη προς τους πόλους,
 - της μεταφοράς αερίων μαζών οφειλόμενης σε τοπικούς παράγοντες, η οποία μπορεί να συμβαίνει σε εποχιακή ή ημερήσια κλίμακα,
 - του ατμοσφαιρικού αεροζόλ (μεταφοράς, εναπόθεσης αεροζόλ και έρευνας ρύπανσης οφειλόμενης σε ρυπαντές αεροζόλ),

- του προσδιορισμού μοντέλων ατμοσφαιρικής διάχυσης (Simon et al., 2009),
 - του προσδιορισμού μοντέλων γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας (Brost et al., 1991).
- Συγκριτικά με το ^7Be , η χρήση των υπόλοιπων ραδιενεργών ισοτόπων στη μελέτη ατμοσφαιρικών διεργασιών είναι λιγότερο εκτεταμένη και σε αρκετές περιπτώσεις γίνεται σε συνδυασμό με αυτό. Τα ισότοπα αυτά καθώς και οι λόγοι $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$, $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ και $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ έχουν χρησιμοποιηθεί ως ιχνηλάτες τέτοιων διεργασιών. Συγκεκριμένα:
- Ο λόγος $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ μπορεί να αποτελέσει έναν πολύ καλό **ιχνηλάτη στρατοσφαιρικών εισβολών** διότι δεν επηρεάζεται από τη διεργασία της υγρής σάρωσης κι επιπλέον η τιμή του είναι πολύ μεγαλύτερη στην στρατόσφαιρα απ' ό,τι στην τροπόσφαιρα εξαιτίας του πολύ μεγαλύτερου χρόνου υποδιπλασιασμού του ^{10}Be ($T_{1/2} = 1,5 \times 10^6$ έτη) έναντι του ^7Be ($T_{1/2} = 53,3$ ημέρες,. Όμως, η ανίχνευση του ^{10}Be απαιτεί τη χρήση φασματοσκοπίας μάζας με επιταχυντή, η οποία είναι μια ακριβή μέθοδος για συνεχή και συστηματική παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{10}Be .
 - Λόγω της κοινής τους κοσμικής προέλευσης, ο ρόλος του ^{22}Na αναμένεται να είναι παρόμοιος με αυτόν του ^{10}Be , με τη διαφορά ότι ο μικρότερος χρόνος υποδιπλασιασμού του ($T_{1/2}=2,6$ έτη) είναι περισσότερο κατάλληλος για τη μελέτη της κυκλοφορίας αερίων μαζών. Έτσι, ο λόγος $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ μπορεί να αποτελέσει έναν νέο πιο αποδοτικό **ιχνηλάτη της ανταλλαγής στρατοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα**. Όμως, η ανίχνευση του ^{22}Na παρουσιάζει περιορισμούς λόγω της πολύ μικρής συγκέντρωσής του στον επιφανειακό αέρα. Ένα σύστημα $\gamma - \gamma$ σύμπτωσης / αντισύμπτωσης (Zhang et al., 2014) καθιστά τις ημερήσιες μετρήσεις του ^{22}Na σε δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ μια ρεαλιστική πιθανότητα. Εντούτοις, τα συστήματα αυτά είναι εξειδικευμένα καθώς λειτουργούν μόνο με τη χρήση εξεζητημένων ηλεκτρονικών συστημάτων και συστημάτων επεξεργασίας δεδομένων. Η δημιουργία μιας καινούριας βάσης δεδομένων ^{22}Na μπορεί ενδεχομένως να αποδειχτεί πολύ χρήσιμη (Hoffman, 2016).
 - Το ^7Be και ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ αποτελούν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί ως **ιχνηλάτες της προέλευσης αερίων μαζών** λόγω των μοναδικών πηγών προέλευσής τους. Οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας του κοσμικής προέλευσης ^7Be αυξάνονται με το υψόμετρο, ενώ οι συγκεντρώσεις του γεωγενούς $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ μειώνονται με αυτό καθώς και με την απόσταση από την ξηρά. Η αντίθεση αυτή καθιστά το λόγο $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ κατάλληλο **ιχνηλάτη** της μεταφοράς που σχετίζεται με τη **δυναμική των αερίων μαζών**, επιτρέποντας την εκτίμηση της σχετικής σπουδαιότητας των στρατοσφαιρικών και τροποσφαιρικών διαδρομών μεταφοράς αερίων μαζών.
 - Η εκτίμηση της επαναιώρησης του ^{137}Cs έχει χρησιμεύσει ως **ιχνηλάτης της μεταφοράς σκόνης** απ' την έρημο Σαχάρα στον επιφανειακό αέρα Ευρωπαϊκών Μεσογειακών χωρών.
- Η εναπόθεση των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στην επιφάνεια της γης πραγματοποιείται κυρίως μέσω των βροχοπτώσεων, ωστόσο καθορίζεται από έναν σύνθετο συνδυασμό παραγόντων, που μπορούν να επηρεάζουν τα επίπεδα συγκέντρωσής τους στον επιφανειακό αέρα. Η γνώση της ροής εναπόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , καθώς και της χωρικής κατανομής της, είναι πολύ σημαντική για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων όπως θα διαπιστώσουμε στο επόμενο Κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΧΡΗΣΗ ΡΑΔΙΟΕΝΕΡΓΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΙΖΗΜΑΤΩΝ

4.1 Διάβρωση του εδάφους και απόθεση ιζημάτων: ένα παγκόσμιο πρόβλημα

Η υποβάθμιση του εδάφους εξαιτίας της διάβρωσης (**erosion**) και της συσχετιζόμενης απόθεσης ιζημάτων (**sedimentation**) αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα της σύγχρονης εποχής τόσο σε τοπική όσο και σε παγκόσμια κλίμακα. Η διάβρωση του εδάφους επιταχύνεται από διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως είναι η αποψίλωση των δασών, η υπερβολική αύξηση των βοσκότοπων, η μη ορθολογική χρήση του εδάφους και η εφαρμογή ακατάλληλων γεωργικών πρακτικών σε πολλά μέρη του κόσμου, κυρίως λόγω έλλειψης οικονομικών και τεχνικών πόρων. Οι εκτιμήσεις της έκτασης του υποβαθμισμένου εδάφους παγκοσμίως, καθώς και οι περιοχές που είναι εκτεθειμένες στην υδατική και αιολική διάβρωση φαίνονται στον πίνακα της Εικόνας 4.1 και στους χάρτες της Εικόνας 4.2, αντίστοιχα.

Οι περιοχές της Μεσογείου είναι ιδιαίτερα εκτεθειμένες στο φαινόμενο της διάβρωσης (Εικόνα 4.3) εξαιτίας των ιδιαίτερων κλιματικών και μορφολογικών/τοπογραφικών χαρακτηριστικών τους. Έντονες και συνεχείς βροχοπτώσεις ακολουθούν συχνά μεγάλες περιόδους ξηρασίας, στη διάρκεια των οποίων εκδηλώνονται και πολλές πυρκαγιές, φαινόμενα, τα οποία συνδυαζόμενα με τις μεγάλες κλίσεις της περιοχής, το ανώμαλο ανάγλυφο και την ύπαρξη μη ανθεκτικών τύπων εδαφών, οδηγούν σε εκτεταμένη διάβρωση από το νερό και τον άνεμο.

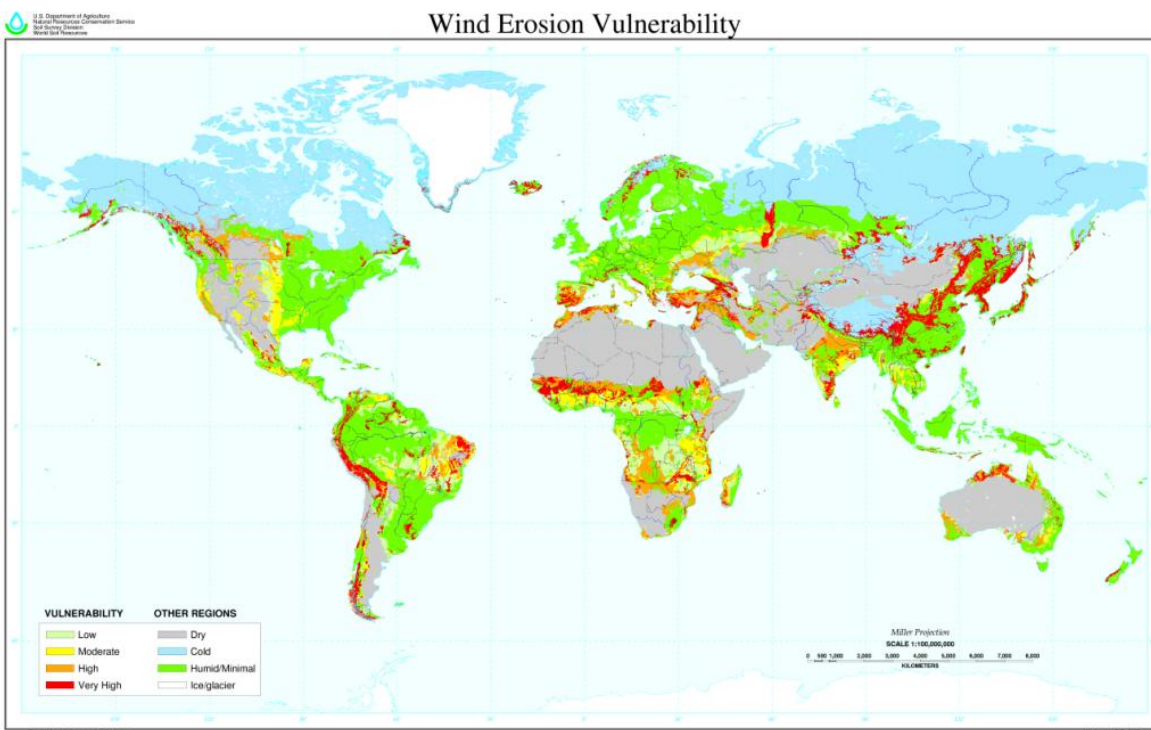
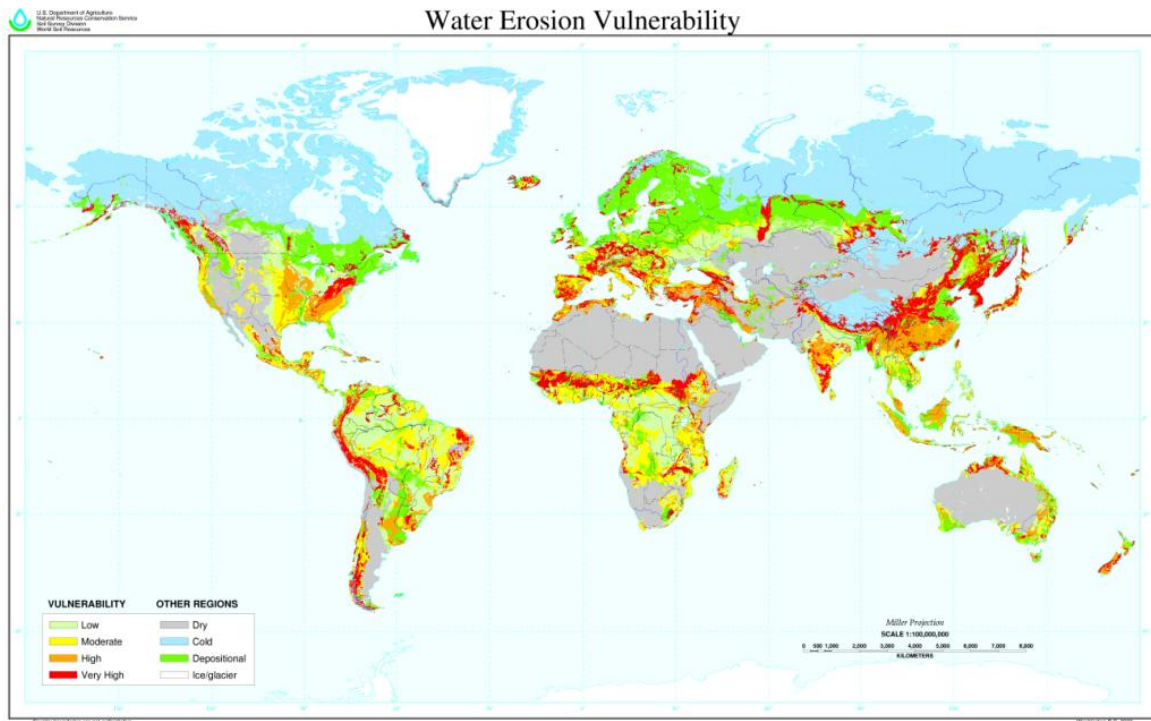
Τα ελληνικά εδάφη είναι από τα πιο ευαίσθητα στη διάβρωση εδάφη στον κόσμο, εξαιτίας των παραπάνω παραγόντων, στους οποίους μπορεί να προστεθούν η χρήση βαρέων καλλιεργητικών μηχανημάτων, η μονοκαλλιέργεια επί σειρά ετών και η υπερβόσκηση. Έτσι, μεγάλο τμήμα της χώρας μας κινδυνεύει εξαιτίας της διάβρωσης του εδάφους (Εικόνα 4.4).

Εικόνα 4.1

Πίνακας στον οποίο φαίνονται οι εκτιμήσεις της έκτασης του υποβαθμισμένου εδάφους εξαιτίας της υδατικής και αιολικής διάβρωσης. (Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 3-26)

Περιοχή	Εμβαδό επιφάνειας υποβαθμισμένων εδαφών (σε εκατομμύρια εκτάρια)		
	Υδατική διάβρωση	Αιολική διάβρωση	Συνολική διάβρωση
Αφρική	227,3	187,8	415,1
Ασία	435,2 (39,6%)	224,1 (40,7%)	659,3 (40,0%)
Κεντρική Αμερική και Μεξικό	46,5	4,4	50,9
Νότια Αμερική	124,1	41,4	165,5
Υποσύνολο χωρών του τρίτου κόσμου	833,1 (75,7%)	457,7 (83,2%)	1290,8 (78,2%)
Σύνολο παγκοσμίως	1100,0	550,0	1650,0

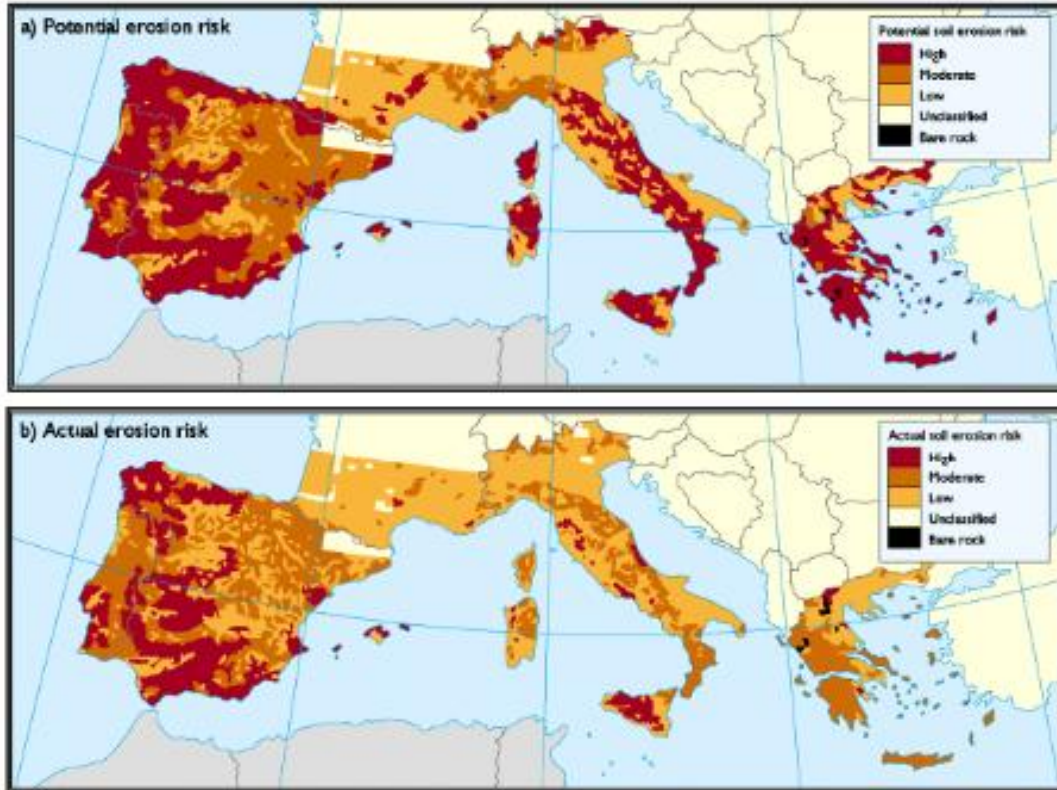
Τα δεδομένα στις παρενθέσεις δείχνουν το % ποσοστό επί του παγκόσμιου συνόλου.
1 εκτάριο (1ha) ισούται με 10.000 m², δηλ. 10 στρέμματα.



Εικόνα 4.2

Παγκόσμιοι χάρτες στους οποίους φαίνονται οι περιοχές που είναι εκτεθειμένες στην υδατική και την αιολική διάβρωση.

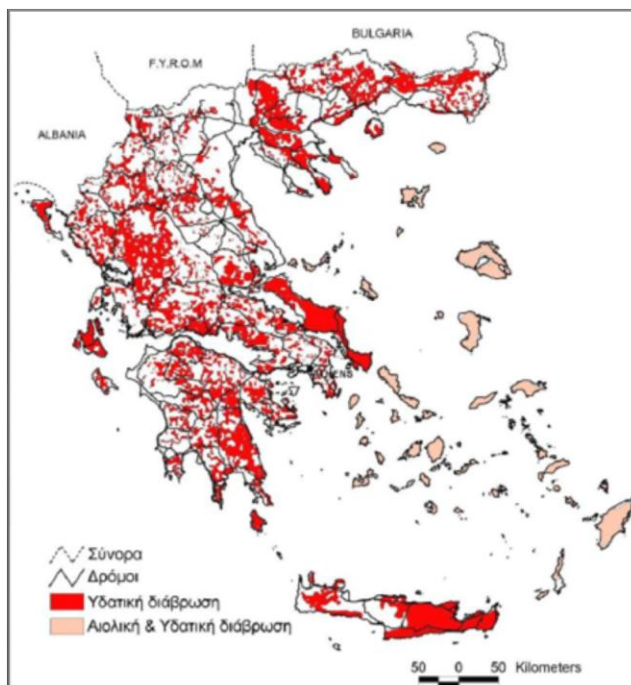
Πηγή: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/worldsoils/>
NSDA, 1998. (United States Department of Agriculture).



Εικόνα 4.3

(α) Δυνητικός κίνδυνος διάβρωσης και (β) πραγματικός κίνδυνος διάβρωσης του εδάφους στις Μεσογειακές Ευρωπαϊκές χώρες.

Πηγή: «Αειφόρες στρατηγικές για τη βελτίωση σοβαρά υποβαθμισμένων περιοχών», Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός «Δήμητρα».



Εικόνα 4.4

Περιοχές υψηλού κινδύνου υδατικής και αιολικής διάβρωσης της Ελλάδας.

Πηγή:

GNCCD (Greek National Committee Combating Desertification).

Η επιταχυνόμενη διάβρωση προκαλεί υποβάθμιση του εδάφους στις περιοχές όπου συμβαίνει (*on-site effects*). Συγκεκριμένα, η διάβρωση του εδάφους έχει τεράστια επίδραση στην ισορροπία μεταξύ της εισροής και της απώλειας άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα και είναι ιδιαίτερης σημασίας για την απώλεια οργανικής ύλης από εδάφη που καλλιεργούνται για χρονικές περιόδους δεκαετιών. Έτσι, οι ρυθμοί απώλειας χώματος ασκούν καίριο έλεγχο στη γονιμότητα του εδάφους και στην παραγωγή συγκομιδής.

Επίσης, η επιταχυνόμενη διάβρωση του εδάφους προκαλεί προβλήματα σε άλλα μέρη εκτός της περιοχής, όπου συμβαίνει, (*off-site effects*). Συγκεκριμένα, ένα σημαντικό ποσοστό χώματος, που μετακινείται λόγω διάβρωσης, μεταφέρεται σε συστήματα υδάτινων ρευμάτων και ποταμών με αποτέλεσμα η περίσσεια αποτιθέμενου χώματος να προκαλεί υποβάθμιση των υδάτινων οικοσυστημάτων και βιότοπων, αφού το προερχόμενο από διάβρωση χόμα αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό φορέα φυτοφαρμάκων και γενικότερα χημικών ουσιών, που χρησιμοποιούνται στη γεωργία.

Τα τελευταία χρόνια, μεγάλο ενδιαφέρον εστιάζεται σε θέματα αειφορίας φυσικών πόρων και στις συνεπαγόμενες οικονομικές τους επιπτώσεις. Έχουν γίνει εκτιμήσεις σε παγκόσμια κλίμακα και έχει εκτιμηθεί ότι οι οικονομικές ζημιές, που προκαλούνται από τις συνέπειες της διάβρωσης του εδάφους, είναι πολύ μεγάλες.

Στα πλαίσια του παραπάνω προβληματισμού και λαμβάνοντας υπόψη τα προβλήματα των περιορισμένων εδαφικών πόρων για να καλύψουν τις ανάγκες του συνεχώς αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού, μια αποτελεσματική περιβαλλοντική διαχείριση απαιτεί πληροφορίες, που σχετίζονται με την απόκτηση αξιόπιστων ποσοτικών δεδομένων, που αφορούν στην έκταση και τους ρυθμούς διάβρωσης, παγκοσμίως. Η κατανόηση της ανακατανομής του χώματος σε μια περιοχή είναι θεμελιώδους σημασίας για το σχεδιασμό μεθοδολογιών ελέγχου της διάβρωσης, τη δημιουργία βιώσιμων γεωργικών τεχνικών, την προστασία των κατοίκων από πλημμύρες και συσσώρευση λάσπης καθώς και την πρόγνωση μελλοντικών αλλαγών στην τοπογραφία της περιοχής.

4.2 Τεχνικές για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: εκείνες που βασίζονται σε μετρήσεις κι εκείνες που βασίζονται σε μοντέλα πρόβλεψης. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν πειραματικά αγροτεμάχια, μέθοδοι χαρτογράφησης ή/και πυρηνικές τεχνικές αναλυτικές. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τους στόχους της μελέτης και τη διαθεσιμότητα των κατάλληλων μέσων. Μελέτες της διάβρωσης του εδάφους διεξήχθησαν αρχικά στο πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα και συνήθως χρησιμοποιήθηκαν συμβατικές μετρήσεις της εξαγωγής ιζημάτων σε χωρικές κλίμακες μικρών έως και μεγάλων αγροτεμαχίων. Πιο πρόσφατα, αυτές οι μελέτες επεκτάθηκαν σε χωρικές κλίμακες λεκανών απορροής.

4.2.1 Κλασσικές τεχνικές για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων

Πολλές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως για να μετρήσουν τη διάβρωση του εδάφους. Αυτές περιλαμβάνουν καρφιά διάβρωσης (erosion pins), αγροτεμάχια διάβρωσης (erosion plots), ογκομετρικές μετρήσεις της απομάκρυνσης του χώματος, χρήση συμβατικών ιχνηθετών (π.χ. σημαδεμένες πέτρες) και μετρήσεις των παραγόμενων ιζημάτων σε λεκάνες απορροής.

Από τα τέλη της δεκαετίας του '60 μέχρι σήμερα, έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες, που βασίζονται σε μοντέλα πρόβλεψης των ρυθμών διάβρωσης. Έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμα μοντέλα, τα οποία σε συνδυασμό με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographical Information Systems, GIS) και τεχνολογίες τηλεανίχνευσης, παρέχουν εκτιμήσεις σχετικά με τη χωρική μορφή και τους ρυθμούς διάβρωσης και μεταφοράς ιζημάτων. Τέτοια μοντέλα είναι τα USLE, RULSE, SEDD, AGNPS, LASCAM καθώς επίσης και τα ANSWERS, LISEM, CREAMS, WEPP, EUROSEM, KINEROS, RUNOFF, WESP, CASC2D-SED, SEM, SHEDED, κ.ά. Το μοντέλο, που έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα για την εκτίμηση της φυλλοειδούς⁽²⁷⁾ (sheet erosion) και αυλακοειδούς⁽²⁷⁾ (rill erosion) διάβρωσης, είναι η Γενική Εξίσωση Απώλειας Χώματος (Universal Soil Loss Equation, USLE), η οποία είναι μια εμπειρική εξίσωση που περιλαμβάνει μία σειρά από παράγοντες, οι οποίοι προσδιορίζονται εμπειρικά, και αφορούν στην ένταση των βροχοπτώσεων, τις ιδιότητες του χώματος, τα είδη καλλιέργειας και τη μορφολογία του εδάφους. Αργότερα, αναπτύχθηκε η Αναθεωρημένη Γενική Εξίσωση Απώλειας Χώματος (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE), η οποία έχει μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών.

Οι υπάρχουσες κλασσικές τεχνικές συνεχούς και συστηματικής παρακολούθησης της διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης ιζημάτων απαιτούν πολύχρονες μετρήσεις και παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς που αφορούν στην αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων που παρέχουν, τη χωρική ανάλυσή τους, τη δυνατότητα να παρέχουν πληροφορίες για μακροχρόνιους ρυθμούς διάβρωσης του εδάφους, τις σχετιζόμενες χωρικές μορφές των ρυθμών διάβρωσης εκτεταμένων περιοχών καθώς επίσης και το μεγάλο κόστος που απαιτούν. Τα πειραματικά αγροτεμάχια, για παράδειγμα, είναι δαπανηρά όσον αφορά στην εγκατάσταση και τη συντήρησή τους και τα αποτελέσματα, που προκύπτουν, σχετίζονται με μια μικρή κλειστή περιοχή, η οποία μπορεί να μην αντιπροσωπεύει την ευρύτερη περιοχή.

Λόγω των περιορισμών αυτών, η αναζήτηση εναλλακτικών τεχνικών για την εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους, οι οποίες θα συμπληρώνουν τις υπάρχουσες μεθόδους και θα ανταποκρίνονται σε καινούριες απαιτήσεις, έχει κατευθυνθεί προς τη χρήση ραδιενεργών ισοτόπων ως ιχνηλατών των ρυθμών και των χωρικών μορφών ανακατανομής του χώματος σε μια περιοχή.

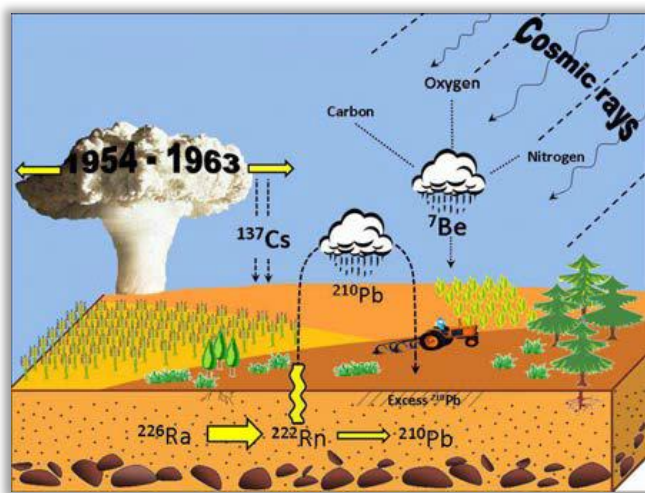
⁽²⁷⁾ Βλ. Παράρτημα Ε

4.2.2 Πυρηνικές αναλυτικές τεχνικές για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων

Οι έρευνες της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων έχουν επικεντρωθεί στη χρήση μιας συγκεκριμένης ομάδας περιβαλλοντικών ραδιενεργών ισοτόπων, τα αποκαλούμενα “fallout radionuclides”.

“Fallout radionuclides” (FRNs) ονομάζονται τα φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα που εναποτίθενται στην επιφάνεια του εδάφους από την ατμόσφαιρα.

Τα FRNs, που έχουν χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως για τη μελέτη των ρυθμών και των χωρικών μορφών διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων για διάφορες χρονικές και χωρικές κλίμακες, είναι το ανθρωπογενές ραδιενεργό ισότοπο ^{137}Cs , το οποίο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, καθώς επίσης και τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα: ο γεωγενής $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, και το κοσμογενές ^7Be , (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5

Πρόελευση των FRNs (^{137}Cs , ^7Be και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) που χρησιμοποιούνται σε μελέτες διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων.

Η μέθοδος των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be έχει αποδειχτεί ότι παρέχει έναν πολύ αποτελεσματικό τρόπο ποσοτικοποίησης των ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων, ο οποίος καλύπτει διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι παρέχει χρονικά ολοκληρωμένες εκτιμήσεις των ρυθμών διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων καθώς και των χωρικών μορφών ανακατανομής χώματος για πεδία και ευρύτερες περιοχές, αναδρομικά, με μία μόνο εκστρατεία δειγματοληψίας, χωρίς την ανάγκη εφαρμογής μακροχρόνιων και δαπανηρών εγκαταστάσεων και προγραμμάτων συστηματικής παρακολούθησης και χωρίς να προκαλείται διαταραχή της υπό μελέτη περιοχής από την εγκατάσταση του εξοπλισμού μέτρησης. Επιπλέον, οι μετρήσεις παρέχουν δεδομένα, τα οποία ενοποιούν τις επιδράσεις όλων των διεργασιών που οδηγούν σε μεταφορά χώματος μέσα σε μια ευρύτερη έκταση και προς το σύστημα υδάτινων ρευμάτων, παρέχοντας, έτσι, πληροφορίες για τους καθαρούς ρυθμούς ανακατανομής χώματος, πράγμα που δεν μπορεί να επιτευχθεί με τις παραδοσιακές μεθόδους.

4.2.3 Συγκριτική αξιολόγηση κλασσικών και πυρηνικών αναλυτικών τεχνικών για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων

Η μέθοδος των FRNs έχει συγκριθεί με άλλες συμβατικές μεθόδους, σε ένα εύρος περιβαλλόντων, και αποτελεί ένα πολύτιμο συμπλήρωμα στις παραδοσιακές τεχνικές μέτρησης. Ένα παράδειγμα συγκριτικής αξιολόγησης μελετών της διάβρωσης του εδάφους, σε χωρικές κλίμακες πεδίων και λεκανών απορροής, οι οποίες έγιναν με χρήση της μεθόδου των FRNs, καθώς και των συμβατικών μεθόδων παρουσιάζονται στον πίνακα της Εικόνας 4.6.

Εικόνα 4.6

Πίνακας με τη σύγκριση καθαρών ρυθμών διάβρωσης υπολογισμένων από τη μέθοδο των FRNs και των συμβατικών μετρήσεων (Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 3-26)

Study scale	Fallout radionuclides		Conventional measurements	
	FRN(s)	Net erosion rate (t · ha ⁻¹ · yr ⁻¹)	Method	Net erosion rate (t · ha ⁻¹ · yr ⁻¹)
Basin, 217 km ²	¹³⁷ Cs	2.8	USLE	3
Field, 1 ha	¹³⁷ Cs	12.1 to 14.3	RUSLE 2	12.1
	²¹⁰ Pb _{ex}			
Small watersheds, 1 to 2 ha	¹³⁷ Cs	8.9 to 14.7	Sediment measurements at the outlet	7.8 to 19.2

1Km² = 100 ha

4.2.4 Η εξέλιξη των πυρηνικών αναλυτικών τεχνικών για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων

Οι πρώτες ιδέες για τα τη χρήση του ¹³⁷Cs ως εργαλείου σε έρευνες διατήρησης του εδάφους εμφανίζονται από τη δεκαετία του '70 (Ritchie and McHenry, 1973, 1975). Οι πρώιμες εφαρμογές των πυρηνικών τεχνικών για τη διάβρωση του εδάφους, που επικεντρώθηκαν στη χρήση του ¹³⁷Cs, διεξήχθησαν από διάφορες ομάδες ερευνητών στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Αυστραλία, τις ΗΠΑ και τον Καναδά κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του '80 και '90. Αυτές οι πρωτοπόρες ομάδες έθεσαν τα θεμέλια για την εφαρμογή της τεχνικής του ¹³⁷Cs, προκειμένου να μετρήσουν την ανακατανομή χώματος σε αγροτικές περιοχές καθώς και φυσικά περιβάλλοντα. Το σημαντικό δίδαγμα αυτών των πρώιμων μελετών ήταν η ανάγκη καθιέρωσης εναρμονισμένων πρωτοκόλλων για την επίτευξη μιας παγκόσμιας και συνεπούς εφαρμογής αυτής της τεχνικής (Walling and Quine, 1993).

Από τα μέσα της δεκαετίας του '90, ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency, IAEA) έχει εμπλακεί δυναμικά στην ανάπτυξη των πυρηνικών τεχνικών για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων.

Με την υλοποίηση δύο συντονισμένων έργων⁽²⁸⁾ (Coordinated Research Projects, CRPs), κατά την περίοδο **1995-2001**, επιτεύχθηκε η βελτίωση και τυποποίηση των μεθόδων και πρωτοκόλλων για την εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs παγκοσμίως (Zarata, 2002), καθώς επίσης και η απόκτηση πλούσιων πληροφοριών σχετικών με ρυθμούς διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων. Συμμετείχαν επιστήμονες από ερευνητικά κέντρα 19 χωρών (Αργεντινή, Αυστραλία, Βραζιλία, Γαλλία, Ελλάδα⁽²⁹⁾, Ζιμπάμπουε, Ηνωμένο Βασίλειο, ΗΠΑ, Ισπανία, Καναδάς, Κίνα, Μαρόκο, Νέα Ζηλανδία, Πολωνία, Ρουμανία, Ρωσία, Σλοβακία, Ταϊλάνδη και Χιλή).

Πιο πρόσφατες ερευνητικές μελέτες⁽³⁰⁾, που διεξήχθησαν στα πλαίσια των CRPs του ΙΑΕΑ, κατά την περίοδο **2002-2007**, επικεντρώνονται στη συνδυασμένη χρήση FRNs, η οποία παρέχει τη δυνατότητα του καθορισμού ρυθμών διάβρωσης για διαφορετικές χρονικές κλίμακες (από βραχυχρόνιες έως μακροχρόνιες) καθώς και για διαφορετικές τοπικές συνθήκες (από πλαγιές λόφων έως μικρές λεκάνες απορροής). Μια συγκριτική έκθεση των δυνατοτήτων και περιορισμών των ραδιενεργών ισοτόπων ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be για την αξιολόγηση της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων δίνεται από τους Mabit et al. (2008). Επίσης, λεπτομερείς κατευθυντήριες γραμμές που αφορούν στην εφαρμογή της τεχνικής των FRNs περιέχονται στο ΙΑΕΑ-TECDOC-1741 (2014).

Με στόχο την περαιτέρω ανάπτυξη και διεύρυνση της τεχνικής των FRNs, ο ΙΑΕΑ προωθεί τη χρήση της πυρηνικής τεχνολογίας για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων, μέσω εθνικών και τοπικών έργων. Μέχρι σήμερα υπάρχουν 38 εθνικά και περιφερειακά συντονισμένα τεχνικά έργα (Technical Cooperation projects, TC), τα οποία κάνουν χρήση της τεχνικής των FRNs. Μερικά παραδείγματα τέτοιων περιφερειακών TC έργων είναι τα ακόλουθα (Mabit et al., ΙΑΕΑ-TECDOC-1741, 2014, pp. 3-26):

- Το περιφερειακό TC έργο⁽³¹⁾, το οποίο υλοποιήθηκε κατά την περίοδο **2005-2009**, στην Ασία και την περιοχή του Ειρηνικού, με στόχο τη βελτίωση των πρακτικών διατήρησης του εδάφους και της διαχείρισης του νερού. Η τεχνική των FRNs χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία από ερευνητικές ομάδες 13 χωρών (Αυστραλία, Βιετνάμ, Βιρμανία, Ινδία, Ινδονησία, Κίνα, Κορέα, Μαλαισία, Μογγολία, Πακιστάν, Σρι Λάνκα, Ταϊλάνδη και Φιλιππίνες).

(28) *“Assessment of soil erosion through the use of ^{137}Cs and related techniques as a basis for soil conservation, sustainable production, and environmental protection”*

“Sedimentation assessment by environmental radionuclides and their application to soil conservation measures”, 1995-2001.

(29) *Theocharopoulos et al., 2000.*

(30) *“Assessment of the effectiveness of soil conservation technologies using fallout radionuclides”, 2002-2007.*

(31) *“Sustainable Land Use and Management Strategies for Controlling Soil Erosion and Improving Soil and Water Quality”, (RAS5043), 2005-2009.*

- Το περιφερειακό TC έργο⁽³²⁾, το οποίο υλοποιήθηκε κατά την περίοδο **2009-2013**, σε περιοχές της Λατινικής Αμερικής, της Καραϊβικής και της Ανταρκτικής, με τη συμμετοχή 14 χωρών. Η τεχνική των FRNs χρησιμοποιήθηκε με στόχο τη μείωση των επιπτώσεων της υποβάθμισης του εδάφους των περιοχών αυτών.
- Το υπό υλοποίηση πενταετές (**2012-2016**) περιφερειακό TC έργο⁽³³⁾, στο οποίο συμμετέχουν 10 χώρες της Αφρικής (Ακτή Ελεφαντοστού, Αλγερία, Ζιμπάμπουε, Μαδαγασκάρη, Μαλί, Μαρόκο, Μπενίν, Ουγκάντα, Σενεγάλη και Τυνησία). Το έργο έχει επικεντρωθεί στη χρήση των FRNs (πρωτίστως του ¹³⁷Cs και δευτερευόντως των ²¹⁰Pb_{ex} και ⁷Be) και στοχεύει στην απόκτηση ποσοτικών δεδομένων που αφορούν στην υποβάθμιση του Αφρικανικού εδάφους, τους ρυθμούς διάβρωσης και τους ρυθμούς ανακατανομής ιζημάτων σε αγροτικές περιοχές για ένα εύρος διαφορετικών χρονικών κλιμάκων.

4.3 Η θεμελιώδης ιδέα και η εφαρμογή της τεχνικής των FRNs

Από τα ραδιενεργά ισότοπα που εναποτίθενται στο έδαφος από την ατμόσφαιρα, εκείνα που έχουν χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως για τη μελέτη της διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων είναι τα: ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb_{ex} και ⁷Be, διότι τα συγκεκριμένα FRNs, εκτός του ότι είναι σχετικά εύκολα ανιχνεύσιμα, παρουσιάζουν επίσης και την κατάλληλη γεωχημική συμπεριφορά ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους σε έρευνες ανακατανομής του χώματος.

4.3.1 Η γεωχημική συμπεριφορά των FRNs

Τα FRNs φτάνουν στην επιφάνεια του εδάφους από την ατμόσφαιρα μέσω των διεργασιών της υγρής και ξηρής εναπόθεσης. Η γεωχημική συμπεριφορά των ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb_{ex} και ⁷Be χαρακτηρίζεται κυρίως από τη *γρήγορη και ισχυρή προσρόφηση τους από τα λεπτά σωματίδια του χώματος*. Συγκεκριμένα:

- Η προσρόφηση του ¹³⁷Cs από τα λεπτά εδαφικά σωματίδια (αργιλώδη και οργανικά) γίνεται γρήγορα και ισχυρά, μέσω ανταλλαγής κατιόντων. Το ¹³⁷Cs, που παρεμποδίζεται από τη φυτοκάλυψη, μεταφέρεται στο χώμα όταν ξεπλένεται. Η βιολογική του πρόσληψη από τη βλάστηση θεωρείται αμελητέα και η ποσότητα, που έχει απορροφηθεί από τα φυτά, απελευθερώνεται στο χώμα με την αποσύνθεσή τους.
- Η προσρόφηση του ²¹⁰Pb_{ex} γίνεται γρήγορα από τα εδαφικά σωματίδια, σχηματίζοντας σύμπλοκα εσωτερικής σφαίρας (Εικόνα 4.7) με αργιλώδη ορυκτά, οργανική ύλη και οξείδια. Συγκρατείται στο χώμα πιο ισχυρά από το ¹³⁷Cs. Σε ασβεστούχα εδάφη επικρατούν υδροξείδια του μολύβδου και φωσφορικοί μολύβδοι. Η πρόσληψή του από τα φυτά είναι περιορισμένη.

(32) “Using Environmental Radionuclides as Indicators of Land Degradation in Latin American, Caribbean and Antarctic Ecosystems”, (RLA5051), 2009-2013.

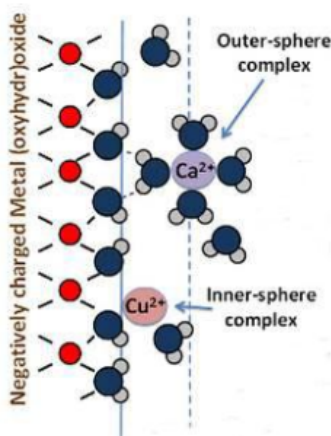
(33) “Supporting Innovative Conservation Agriculture Practices to Combat Land Degradation and Enhance Soil Productivity for Improved Food Security”, (RAF5063), 2012-2016.

- Το ${}^7\text{Be}$ φτάνει στην επιφάνεια της Γης, κυρίως, με τη μορφή κατιόντων Be^{2+} . Εξαιτίας του μεγάλου λόγου φορτίου προς ατομική ακτίνα, γίνεται γρήγορη και σταθερή προσρόφηση του με τα πολύ λεπτόκοκκα κλάσματα του χώματος (<63 μm) μέσω ανταλλαγής κατιόντων. Σχετίζεται με μέταλλα (Fe, Mn) και οργανικές συνιστώσες του χώματος. Απαντάται κυρίως σε μορφή οξειδίων αν και μπορεί να σχετίζεται με ανθρακικά σύμπλοκα κάτω από αλκαλικές συνθήκες. Κάτω από όξινες συνθήκες παρατηρείται μια μείωση της προσρόφησης του. Η βιοσυσώρευση του ${}^7\text{Be}$ στα φυτά δεν προέρχεται από τις ρίζες τους, αφού η κατακόρυφη κατανομή αυτού του ραδιενεργού ισότοπου στο έδαφος περιορίζεται σε πολύ μικρά βάθη, αλλά από την ενσωμάτωσή του στα φύλλα των φυτών. Πάντως, από τη στιγμή της ενσωμάτωσής του στα φυτά, η κινητικότητά του προς το έδαφος είναι περιορισμένη.

Εικόνα 4.7

Η χημική διεργασία της προσρόφησης.

Προσρόφηση (adsorption) ορίζεται η απομάκρυνση ενός ιόντος στην επιφάνεια ενός στερεού σωματιδίου, χωρίς τη δημιουργία μιας τυπικής τρισδιάστατης μοριακής δομής, χαρακτηριστικής για ένα ορυκτό.



Η **προσρόφηση** των ιχνοστοιχείων λαμβάνει χώρα σε αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες στερεών σωματιδίων (κυρίως αργιλικά ορυκτά και οξείδια Fe, Mn και Al) μέσω δύο μηχανισμών:

- **σύμπλοκα εξωτερικής σφαίρας (outer-sphere complexes)** = δέσμευση των ιόντων στην επιφάνεια σωματιδίων με δυνάμεις ηλεκτροστατικής φύσεως (τα ιόντα διατηρούν το νερό ενυδάτωσης).

- **σύμπλοκα εσωτερικής σφαίρας (inner-sphere complexes)** = δέσμευση απευθείας των ιόντων στις λειτουργικές ομάδες, κυρίως -OH, -O, της επιφάνειας των στερεών σωματιδίων. Αυτά τα σύμπλοκα δε χαρακτηρίζονται από μόρια νερού μεταξύ του ιόντος και της επιφάνειας με αποτέλεσμα ο δεσμός να είναι ισχυρότερος.

Επειδή η κυρίαρχη γεωχημική συμπεριφορά των FRNs: ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{210}\text{Pb}_{ex}$ και ${}^7\text{Be}$ είναι **η γρήγορη και ισχυρή προσρόφησή τους από σωματίδια του χώματος**, η θεμελιώδης υπόθεση που γίνεται είναι ότι αυτά τα ραδιενεργά ισότοπα **μετακινούνται μόνο μαζί με το χόμα** και ότι οι κυριότερες διεργασίες που προκαλούν την ανακατανομή τους στο έδαφος μιας περιοχής είναι **φυσικές διεργασίες**, όπως το νερό, ο άνεμος και το όργωμα του εδάφους. Κατά συνέπεια, τα παραπάνω ραδιενεργά ισότοπα λειτουργούν ως **ιχνηλάτες** της μετακίνησης του χώματος, έτσι ώστε, καταγράφοντας μια μεταγενέστερη ανακατανομή τους στο έδαφος, να επιτυγχάνεται η ιχνηλασία των ρυθμών και των χωρικών μορφών της διάβρωσης και της απόθεσης ιζημάτων που συμβαίνει σε μια περιοχή.

4.3.2 Η θεμελιώδης ιδέα της τεχνικής των FRNs

Η τεχνική των FRNs για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων θεμελιώνεται στην υπόθεση ότι η εναπόθεση των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be στο έδαφος θεωρείται χωρικά ομοιόμορφη, τουλάχιστον όσον αφορά σε μια σχετικά μικρή περιοχή.

Η εκτίμηση των ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων βασίζεται σε μια σύγκριση μεταξύ του “inventory” των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be ορισμένων σημείων της υπό μελέτη περιοχής και του αναμενόμενου “inventory” μιας αντιπροσωπευτικής «σταθερής» τοποθεσίας της αποκαλούμενης «τοποθεσίας αναφοράς» (“reference site”), όπου δεν έχει συμβεί ούτε διάβρωση ούτε απόθεση, οπότε το “inventory” αναφοράς των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be αντικατοπτρίζει τη συνολική εναπόθεσή τους στο έδαφος από την ατμόσφαιρα και την επακόλουθη ραδιενεργό διάσπασή τους.

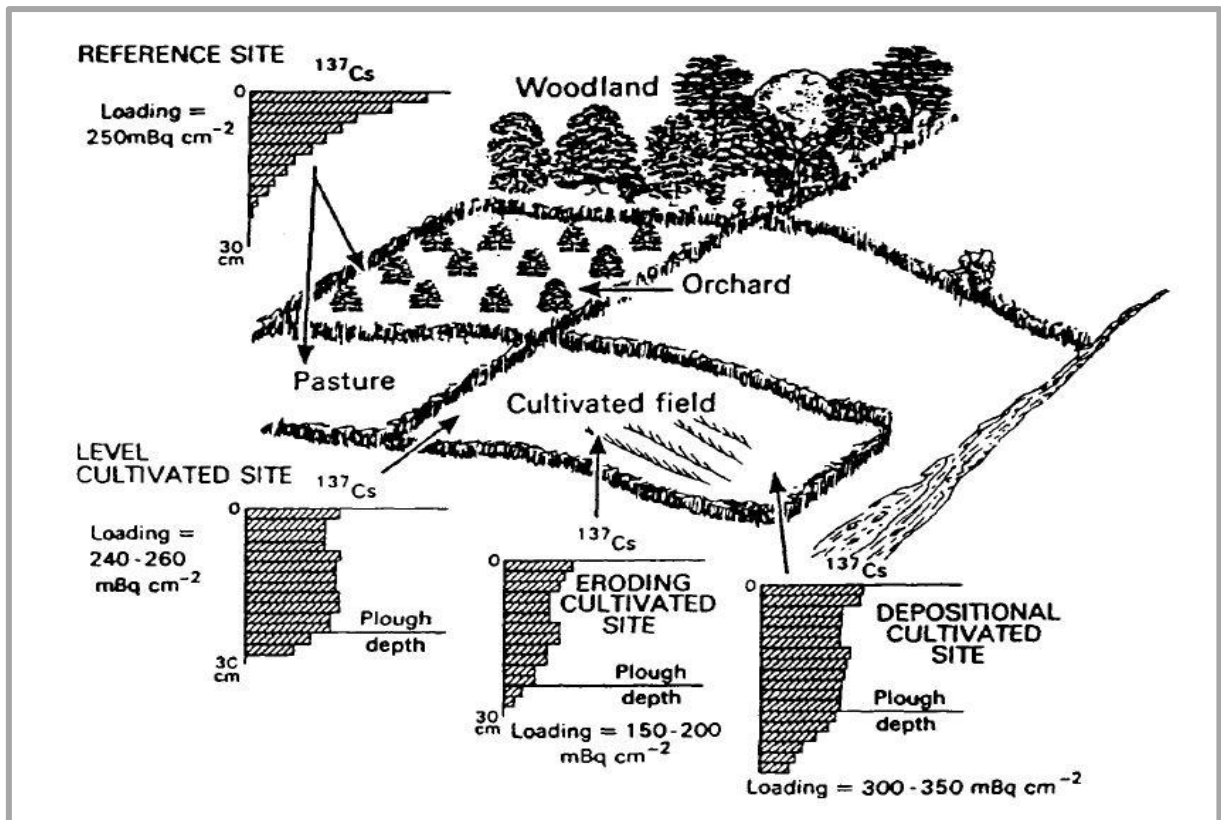
Με τον όρο “**inventory**” ή παραμένουσα απόθεση εννοούμε τη συνολική ποσότητα του ραδιενεργού ισοτόπου σε μια κάθετη στήλη (προφίλ) του εδάφους ανά μονάδα επιφάνειας. Συνήθως εκφράζεται σε Bq m^{-2} ή mBq cm^{-2} .

Η θεμελιώδης ιδέα είναι ότι η παραμένουσα απόθεση των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be μπορεί να αλλάξει είτε με *προσθήκες* ραδιενεργών ισοτόπων, μέσω υγρής και ξηρής εναπόθεσης ή μέσω απόθεσης ιζημάτων, είτε με *απώλειες* ραδιενεργών ισοτόπων λόγω ραδιενεργού διάσπασης και διάβρωσης του εδάφους. Επομένως:

➤ *Εάν η μετρούμενη παραμένουσα απόθεση σε μια τοποθεσία είναι μικρότερη από αυτήν της τοποθεσίας αναφοράς, τότε σημαίνει ότι υπάρχει απώλεια χρώματος, οπότε η τοποθεσία έχει υποστεί διάβρωση.*

➤ *Εάν η μετρούμενη παραμένουσα απόθεση σε μια τοποθεσία είναι μεγαλύτερη από αυτήν της τοποθεσίας αναφοράς, τότε σημαίνει ότι συμβαίνει απόθεση ιζημάτων.*

Η Εικόνα 4.8 δίνει μια σχηματική αναπαράσταση της θεμελιώδους ιδέας της τεχνικής των FRNs που αναπτύξαμε παραπάνω.



Εικόνα 4.8

Σχηματική αναπαράσταση της θεμελιώδους ιδέας της τεχνικής των FRNs, εφαρμοσμένης για το ^{137}Cs . (Walling and Quine, 1993)

4.3.3 Τα βήματα για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs

Τα βήματα για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , που ακολουθούνται σε μελέτες διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων, είναι τυποποιημένα. Λεπτομερής ανάπτυξη τους γίνεται στις επόμενες παραγράφους, ενώ μια περιληπτική τους παρουσίαση είναι η εξής:

1. Σχεδιασμός δειγματοληψίας (§ 4.4)

Το πρώτο βήμα της τεχνικής των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας κατάλληλης στρατηγικής δειγματοληψίας, η οποία περιλαμβάνει την επιλογή αντιπροσωπευτικών τοποθεσιών, σχεδιασμών και πυκνοτήτων δειγματοληψίας, ανάλογα με τον στόχο της μελέτης.

2. Συλλογή δειγμάτων χώματος (§ 4.5)

Για να συλλεχθούν τα δείγματα χώματος, απαιτούνται συσκευές και εργαλεία για ολική και κατά βάθος δειγματοληψία ώστε να προκύψουν οι παραμένουσες αποθέσεις των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be καθώς επίσης και πληροφορίες για την κατακόρυφη κατανομή τους στο έδαφος.

3. Προετοιμασία και προ-επεξεργασία των δειγμάτων χώματος (§ 4.6)

Η προετοιμασία και η προ-επεξεργασία των δειγμάτων είναι παρόμοια για καθένα από τα FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be . Στα δείγματα χώματος πραγματοποιείται αεροζήρανση, ζήρανση σε φούρνο, «ελαφρύ» σπάσιμο των χοντρών συσσωματωμάτων χώματος και κοσκίνισμα στα 2mm. Στο στάδιο αυτό, γίνεται ο υπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας (*bulk density*) (kg m^{-3}) του χώματος.

4. Ραδιομετρικές τεχνικές μέτρησης της ραδιενέργειας των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be στο χώμα (§ 4.7)

Στο στάδιο αυτό, επιτυγχάνεται η μέτρηση της ειδικής ραδιενέργειας (Bq kg^{-1}) των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , εφαρμόζοντας ραδιομετρικές τεχνικές και κυρίως γ-φασματοσκοπία.

5. Αποτελέσματα των μετρήσεων της ραδιενέργειας: κατακόρυφες κατανομές στο έδαφος και παραμένουσες αποθέσεις των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be (§ 4.8)

Οι μετρήσεις της ειδικής ραδιενέργειας (Bq kg^{-1}), που έχουν προκύψει από το προηγούμενο στάδιο, μετατρέπονται σε παραμένουσες αποθέσεις (Bq m^{-2}) μέσω της φαινόμενης πυκνότητας (*bulk density*) του χώματος. Επίσης, κατασκευάζονται οι κατακόρυφες κατανομές των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be στο έδαφος, η ερμηνεία των οποίων προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση μιας τοποθεσίας, δηλαδή αν είναι αδιατάρακτη, καλλιεργούμενη, έχει υποστεί διάβρωση ή απόθεση ιζημάτων.

6. Μοντέλα μετατροπής της παραμένουσας απόθεσης των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be σε ρυθμούς διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων (§ 4.9)

Οι ρυθμοί ανακατανομής χώματος μπορούν να εκτιμηθούν με τη χρήση μοντέλων μετατροπής (*conversion models*), τα οποία ορίζουν μαθηματικά τη σχέση μεταξύ της μείωσης ή της αύξησης της παραμένουσας απόθεσης των FRNs σχετικά με την παραμένουσα απόθεση αναφοράς και του ρυθμού διάβρωσης του εδάφους ή της απόθεσης ιζημάτων, αντίστοιχα.

7. Παρουσίαση των ρυθμών ανακατανομής χώματος (§ 4.10)

Η αξιοποίηση των ρυθμών ανακατανομής του χώματος γίνεται με τη βοήθεια των παραμέτρων: μέση (*mean*), μικτή (*gross*) διάβρωση (*erosion*) / απόθεση (*deposition*), καθαρή διάβρωση (*net erosion*) και ποσοστό χώματος που εγκαταλείπει το πεδίο (*sediment delivery ratio*), ενώ για την απεικόνιση της χωρικής κατανομής τους σε χάρτες επιστρατεύεται η γεωστατιστική ανάλυση.

4.4 Σχεδιασμός δειγματοληψίας για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs

Ο σχεδιασμός μιας δειγματοληψίας αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο επιλέγονται τα σημεία εκείνα από τα οποία πρόκειται να συλλεχθεί δείγμα. Η μέθοδος σχεδιασμού μιας δειγματοληψίας καθώς επίσης και η επιλογή μιας κατάλληλης και αποτελεσματικής στρατηγικής δειγματοληψίας αποτελούν ένα σημαντικό και κρίσιμο βήμα για την επιτυχή εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs ή των άλλων FRNs σε μελέτες διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων.

Όμως, πριν από το σχεδιασμό της δειγματοληψίας, απαιτείται το αναγνωριστικό στάδιο της περιοχής, που πρόκειται να μελετηθεί.

4.4.1 Στάδιο αναγνώρισης της τοποθεσίας αναφοράς και της υπό μελέτη περιοχής

Πριν από το σχεδιασμό της στρατηγικής της δειγματοληψίας στην περιοχή που πρόκειται να μελετηθεί για διάβρωση και απόθεση ιζημάτων, πρέπει να πραγματοποιηθεί μια αναγνωριστική έρευνα ώστε να συλλεχθούν και να αξιολογηθούν πληροφορίες σχετικές με το περιβαλλοντικό και κοινωνικό-οικονομικό ιστορικό της περιοχής.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη συγκέντρωση επίσημων αναφορών και εγγράφων, τα οποία πρέπει να περιλαμβάνουν: (i) κλιματικά δεδομένα (βροχόπτωση, θερμοκρασία κλπ.), (ii) γεωμορφολογικά κι εδαφικά δεδομένα (τοπογραφία, τυπική διαμόρφωση του εδάφους της περιοχής, τύπος και υφή του εδάφους), (iii) χρήση της γης (είδος χρήσης από το 1950, είδος και συχνότητα καλλιέργειας, τυχόν υπάρχουσες ειδικές πρακτικές διατήρησης του εδάφους), (iv) συμβάντα κατά το παρελθόν, που σχετίζονται με την έρευνα (διαβρώσεις, πλημμύρες, ακραία καιρικά φαινόμενα) καθώς και πληροφορίες για τη χωρική έκταση και τη χρονική τους διάρκεια.

Επίσης, πρέπει να πραγματοποιηθεί δοκιμαστική δειγματοληψία χώματος στην τοποθεσία αναφοράς και σε μία ή περισσότερες θέσεις της υπό μελέτη περιοχής. Ο σκοπός αυτής της δειγματοληψίας είναι να προσδιοριστεί η παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs ή των άλλων FRNs στην τοποθεσία αναφοράς και να διασφαλισθεί ότι έχει παραμείνει στην τοποθεσία, που έχει υποστεί διάβρωση, επαρκής ποσότητα των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή της τεχνικής.

4.4.2 Κριτήρια για την επιλογή της τοποθεσίας αναφοράς

Παρόλο που ως τοποθεσία αναφοράς επιλέγεται μια «σταθερή» αδιατάρακτη περιοχή, συνήθως παρατηρείται κάποια κύμανση στις μετρούμενες παραμένουσες αποθέσεις των FRNs. Αυτή μπορεί να οφείλεται σε μια τυχαία τοπική χωρική κύμανση των ιδιοτήτων του χώματος, τις εδαφολογικές ρωγμές και το πετρώδες του εδάφους, καθώς και σε τοπικές μεταβολές των βροχοπτώσεων και των ανέμων, που μπορεί να επηρεάσουν την αρχική εναπόθεση των FRNs.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί αυτή η κύμανση, ώστε να μεγιστοποιηθεί η αντιπροσωπευτικότητα της τιμής της παραμένουσας απόθεσης αναφοράς, θα πρέπει να εφαρμόζονται τα ακόλουθα κριτήρια για την επιλογή της τοποθεσίας αναφοράς:

- ✓ Η τοποθεσία αναφοράς δεν πρέπει να έχει καλλιεργηθεί ή διαταραχθεί για πολλά χρόνια (από το 1950 για την περίπτωση του ^{137}Cs). Αυτές οι μη καλλιεργούμενες και αδιατάρακτες τοποθεσίες πρέπει να επιλέγονται σε προστατευμένες περιοχές με μόνιμη χορτοκάλυψη (λιβάδια), οι οποίες όμως δεν πρέπει να είναι βοσκότοποι.
- ✓ Η τοποθεσία αναφοράς πρέπει να επιλέγεται μέσα στην υπό μελέτη περιοχή (πεδίο ή λεκάνη απορροής) ή κοντά σε αυτήν (π.χ. σε ακτίνα 1km). Η αδιατάρακτη τοποθεσία πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατό πλησιέστερα στην περιοχή που ερευνάται.
- ✓ Η τοποθεσία αναφοράς δεν πρέπει να επηρεάζεται από διεργασίες διάβρωσης, οπότε οι επίπεδες περιοχές είναι οι πλέον κατάλληλες.
- ✓ Περιοχές πολύ βιο-διαταραγμένες θα πρέπει να αποφεύγονται.
- ✓ Σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η εύρεση μιας τοποθεσίας που να πληροί τα παραπάνω κριτήρια, ως τοποθεσία αναφοράς μπορεί να επιλεγθεί μια δασική περιοχή με μικρή δεντροκάλυψη, αλλά απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων χώματος. Επιπλέον, κατά τη δειγματοληψία, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η θέση των δέντρων.
- ✓ Επίσης, μερικές άτυπες περιοχές, όπως κήποι, νεκροταφεία, δεντρόκηποι, αμπελώνες και έλη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τοποθεσίες αναφοράς.
- ✓ Όσον αφορά στην περίπτωση του ^{137}Cs , εάν η τοποθεσία αναφοράς βρίσκεται σε περιοχή, που επηρεάστηκε από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl, θα πρέπει αυτή να βρίσκεται όσο το δυνατό πλησιέστερα στην περιοχή, που μελετάται, να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην κατανομή και τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων κατά την περίοδο αμέσως μετά το ατύχημα (δηλαδή 26 Απριλίου – 15 Μαΐου 1986) καθώς επίσης και να πραγματοποιηθεί δειγματοληψία στην ευρύτερη περιοχή, προκειμένου να αναγνωριστεί τυχόν συστηματική τάση στη μετρούμενη παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs .

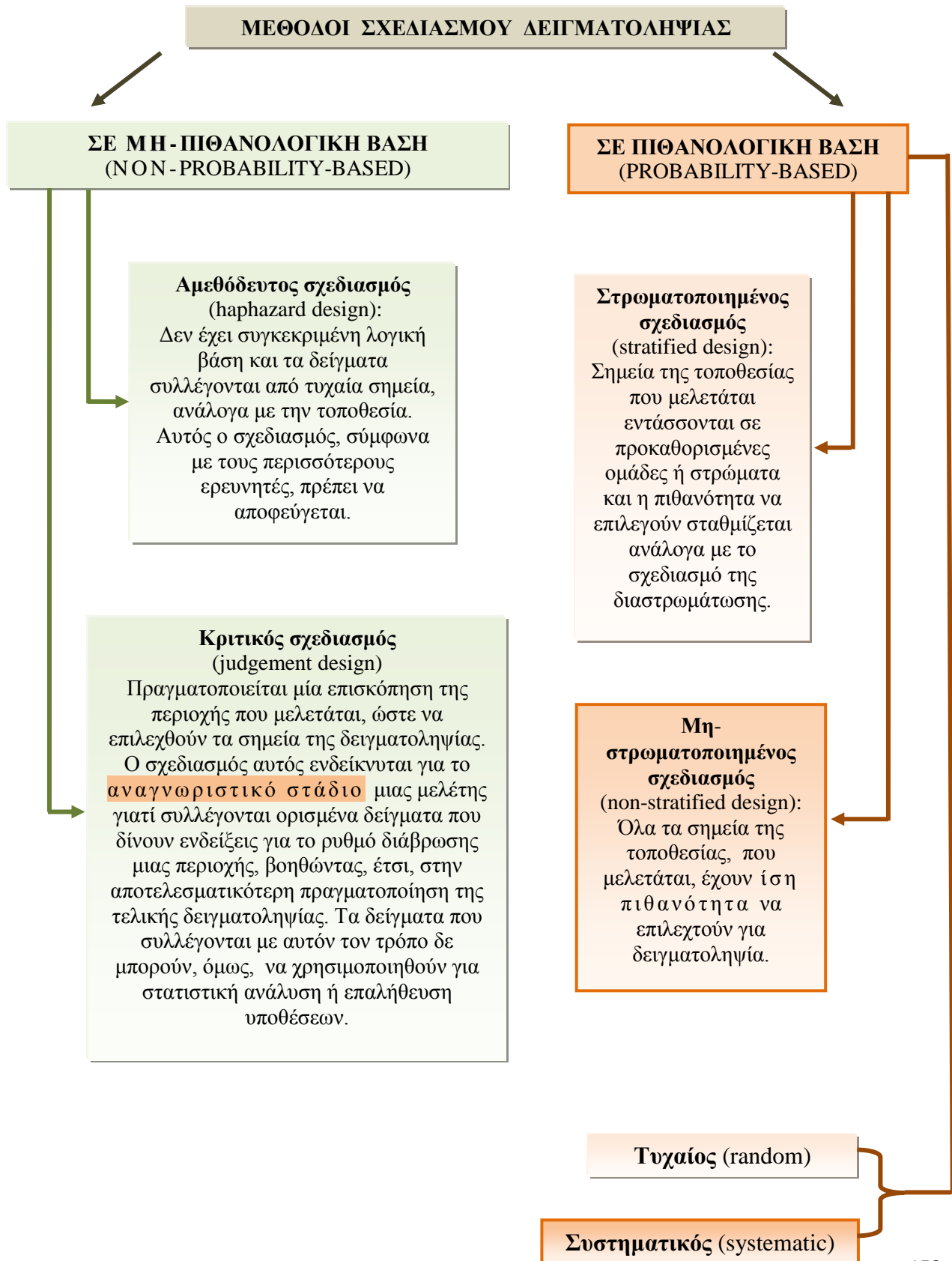
4.4.3 Μέθοδοι και στρατηγικές δειγματοληψίας

- **Μέθοδοι δειγματοληψίας**

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι σχεδιασμού δειγματοληψίας, μερικές από τις οποίες ταξινομούνται στην Εικόνα 4.9. Ο πιο συνηθισμένος σχεδιασμός δειγματοληψίας, που απαντάται σε γεωλογικές μελέτες με χρήση ραδιενεργών ισοτόπων, είναι αυτός που γίνεται σε **πιθανολογική βάση** (probability-based), εφαρμόζοντας **συστηματική** (systematic) και **μη-στρωματοποιημένη** (non-stratified) δειγματοληψία. Ο συστηματικός σχεδιασμός συχνά υφίσταται κριτική από τους επιστήμονες της στατιστικής, αλλά η ευκολία με την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η αποτελεσματικότητά του ως προς τη συλλογή πληροφοριών τον καθιστά πολύ δημοφιλή στις γεωλογικές μελέτες.

Εικόνα 4.9

Σχηματική ταξινόμηση των κυριότερων μεθόδων σχεδιασμού δειγματοληψίας χωματός.



- **Στρατηγική δειγματοληψίας**

Η επιλογή της στρατηγικής μιας δειγματοληψίας εξαρτάται από τους στόχους της μελέτης. Ανάλογα με τους στόχους μιας μελέτης, οι ερευνητές κατατάσσουν τις μελέτες της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων σε διάφορες κατηγορίες. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

- (i) *Περιγραφικές μελέτες (descriptive studies)*, στις οποίες ο σκοπός της δειγματοληψίας είναι ο προσδιορισμός της μέσης τιμής (π.χ. παραμένουσες αποθέσεις στην τοποθεσία αναφοράς) και της διασποράς ή του συντελεστή μεταβολής για όλο τον πληθυσμό. Ο αριθμός των δειγμάτων επιλέγεται για να διασφαλίσει ότι τα όρια εμπιστοσύνης γύρω από τη μέση τιμή θα είναι όσο το δυνατόν μικρότερα, ώστε να αντιπροσωπεύουν τη χωρική κύμανση μέσα στην τοποθεσία.
- (ii) *Αναλυτικές μελέτες (analytical studies)*, οι οποίες περιλαμβάνουν σύγκριση μεταξύ των ρυθμών δύο ή περισσότερων βάσεων δεδομένων, ορίζοντας μια υπόθεση που θα εξεταστεί στην έρευνα, όπως, π.χ., συγκρίσεις στους ρυθμούς ανακατανομής του χώματος ανάμεσα σε διαφορετικά σημεία μιας 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.
- (iii) *Μελέτες χωρικών μορφών πεδίων (pattern - development field studies)*, οι οποίες έχουν ως στόχο την δημιουργία χαρτών που θα απεικονίζουν τη χωρική μορφή της ιδιότητας που μελετάται (π.χ. κατανομή του ^{137}Cs , ρυθμοί ανακατανομής χώματος κλπ.). Ο αριθμός των δειγμάτων πρέπει να είναι επαρκής για τη δημιουργία αξιόπιστων και με πληροφοριακό περιεχόμενο χαρτών για τη χωρική κύμανση του ^{137}Cs , συμπεριλαμβανομένων και άλλων παραμέτρων της τοποθεσίας (τοπογραφία, τύπος εδάφους κ.ά.).

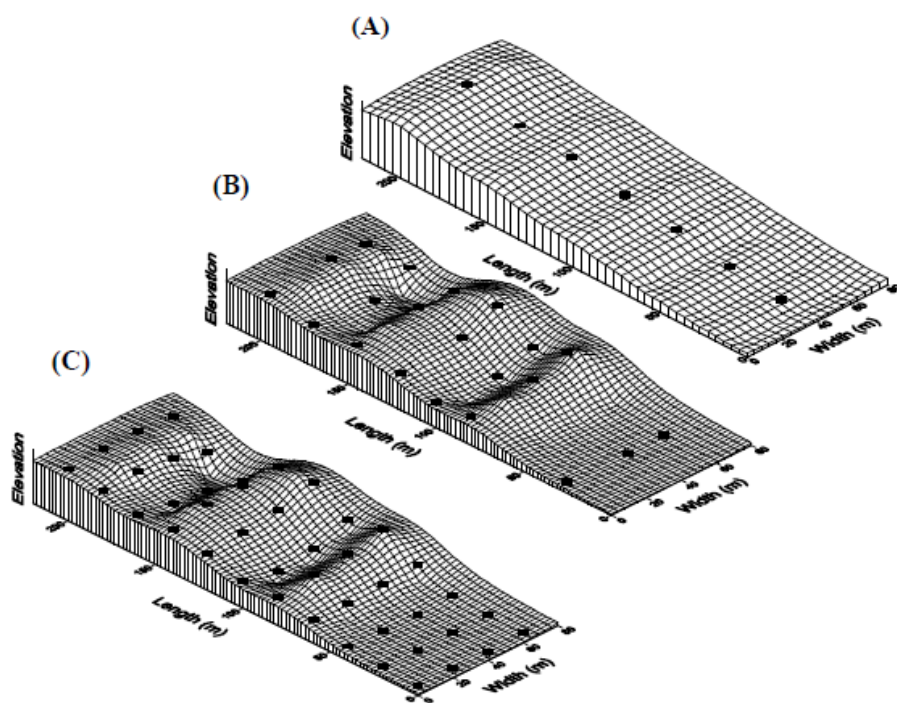
Επιπλέον, οι έρευνες που σχετίζονται με τη διάβρωση του εδάφους και την απόθεση ιζημάτων ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες:

- (i) **Μελέτες ανακατανομής χώματος (soil redistribution studies)**, οι οποίες επικεντρώνονται στην χρήση κυρίως του ^{137}Cs για την εκτίμηση των ρυθμών και των χωρικών μορφών διάβρωσης και απόθεσης λόγω φυσικών διεργασιών (νερού, ανέμου και οργώματος).
- (ii) **Μελέτες ρυθμών ιζηματογένεσης (floodplain/lake and reservoir sedimentation studies)**, με χρήση των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, σε πεδιάδες πλημμυρών, λίμνες και ταμειυτήρες.
- (iii) **Ολοκληρωμένες μελέτες λεκανών απορροής (integrated catchment studies)**, οι οποίες περιλαμβάνουν την ενοποίηση χερσαίων και υδάτινων περιβαλλόντων και επικεντρώνονται στον καθορισμό ενός πλήρους ισοζυγίου του προσχωματικού υλικού μέσα σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής.

4.4.4 Σχεδιασμός δειγματοληψίας στην τεχνική των FRNs

Για το σχεδιασμό της δειγματοληψίας στην τεχνική των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be χρησιμοποιούνται **διατομές** (transects) ή **πλέγματα** (grids) (Εικόνα 4.10). Ο σχεδιασμός δειγματοληψίας με διατομές και πλέγματα είναι πολύ χρήσιμος για τη στατιστική ανάλυση στις περιγραφικές μελέτες, ενώ ο σχεδιασμός με πλέγματα είναι ο πιο κατάλληλος για τη δημιουργία χαρτών στις μελέτες χωρικών μορφών.

Στις περισσότερες μελέτες η απόσταση μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας είναι σταθερή για όλα τα σημεία σε μία δεδομένη διατομή ή πλέγμα. Η επιλογή για το αν θα χρησιμοποιηθούν διατομές ή πλέγματα γίνεται με κριτήριο τη μορφολογική πολυπλοκότητα της προς μελέτης τοποθεσίας.



Εικόνα 4.10

Σχεδιασμοί δειγματοληψίας: (A) Απλή διατομή - (B) Πολλαπλές διατομές - (C) Πλέγμα
(Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77)

Ο αριθμός των δειγμάτων κατά μήκος **απλής διατομής** (Εικόνα 4.10A) εξαρτάται από το μήκος της κατωφέρειας και την τοπογραφία της περιοχής που μελετάται. Σε μικρά πεδία, εκτός από τον αριθμό των δειγμάτων στον κύριο κορμό του πεδίου, απαιτείται, επιπλέον, ένας ελάχιστος αριθμός τριών δειγμάτων στα ανώτερα και κατώτερα σύνορα του πεδίου. Γενικά, οι αποστάσεις που χρησιμοποιούνται μεταξύ των σημείων της δειγματοληψίας είναι από 10 έως 20m.

Κάθε δείγμα, για να θεωρηθεί χωρικά ανεξάρτητο, θα πρέπει να απέχει από τα άλλα δείγματα τουλάχιστον 10m (εύρος χωρικής ανεξαρτησίας) (Sutherland, 1994). Εάν δύο 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.

Σε περίπτωση που οι διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι, προτιμάται ο σχεδιασμός μιας δειγματοληψίας με **πολλαπλές διατομές** (Εικόνα 4.10B), αντί με πλέγματα, διότι έτσι επιτυγχάνεται μια πιο ορθολογική χρήση τους, αφού οι μεταβολές στη μορφολογία του εδάφους είναι, συνήθως, πολύ μεγαλύτερες κατά μήκος από ό,τι κατά πλάτος της πλαγιάς.

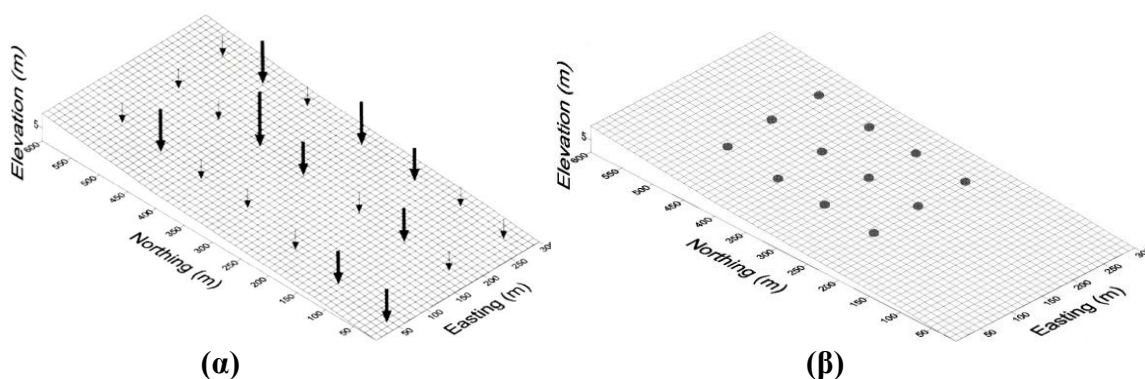
Η απόσταση μεταξύ των σημείων ενός **πλέγματος** (Εικόνα 4.10C) εξαρτάται κυρίως από το συνολικό εμβαδό της επιφάνειας όπου θα συλλεχθούν τα δείγματα. Σε δημοσιευμένες μελέτες, αναφέρεται ένα εύρος πλεγμάτων διαφορετικών διαστάσεων. Εντούτοις, οι τυπικές διαστάσεις πλεγμάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι από 10 έως 25m.

- **Σχεδιασμός δειγματοληψίας σε διαφορετικές μορφολογίες του εδάφους**

Για το σχεδιασμό ενός προγράμματος δειγματοληψίας πεδίου, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η μορφολογία του εδάφους καθώς επίσης και η θέση ενός δεδομένου σημείου στην περιοχή. Πράγματι, η μορφολογία του εδάφους αποτελεί σημαντικό ρυθμιστή της ανακατανομής νερού, ενώ η θέση ενός δεδομένου σημείου στην περιοχή είναι κεντρικής σημασίας όσον αφορά στην κατανόηση των ρυθμών, με τους οποίους λειτουργούν οι εδαφικές και οι γεωμορφολογικές διεργασίες της περιοχής.

- **Επίπεδες επιφάνειες**

Οι επίπεδες επιφάνειες έχουν πολύ μικρές κλίσεις και δεν λαμβάνουν επιφανειακό χόμα από ψηλότερα σημεία. Όταν είναι αδιατάρακτες, είναι οι πλέον κατάλληλες για τοποθεσίες αναφοράς. Για τις επίπεδες επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατομές και πλέγματα (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11

Επίπεδη επιφάνεια:

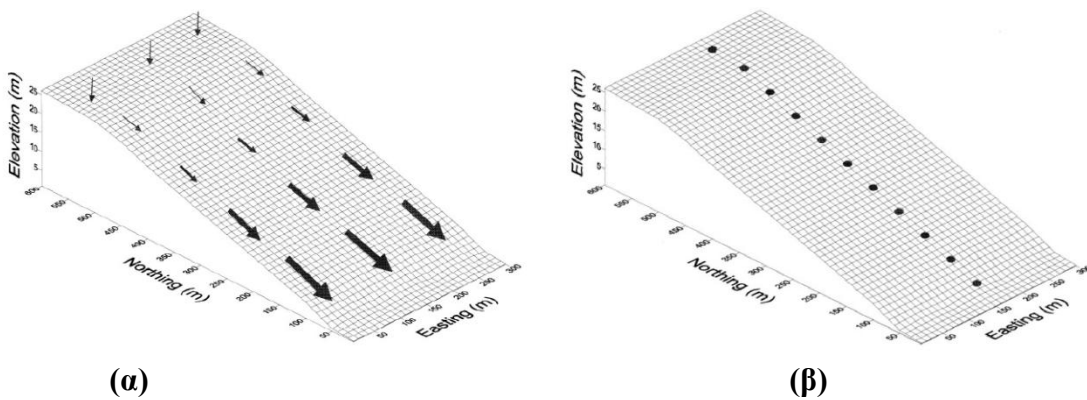
(α) Τα βέλη υποδεικνύουν την κάθετη προς το έδαφος κίνηση του νερού, το οποίο δεν παρουσιάζει σημαντική αναδιανομή. **(β)** Σχεδιασμός δειγματοληψίας με χρήση πλέγματος.

(Pennock and Appleby, In: Zapata (ed), 2002, pp. 15-40)

ο Επιφάνειες με κλίση

Στην περίπτωση των επιφανειών με κλίση, η επιφάνεια του εδάφους εμφανίζει τρεις μορφολογίες: **i)** πλαγιές με μηδενική καμπυλότητα κατά πλάτος (κεκλιμένες επιφάνειες), **ii)** πλαγιές με σημαντική καμπυλότητα κατά πλάτος και **iii)** επιφάνειες με σύνθετη διαμόρφωση. Οι μορφολογίες αυτές μπορούν να περιγραφούν μέσω τριών χαρακτηριστικών μεγεθών: την κλίση της πλαγιάς (slope gradient), την καμπυλότητα κατά μήκος (down-slope curvature) και την καμπυλότητα κατά πλάτος (across-slope curvature).

- (i) Στις πλαγιές με μηδενική καμπυλότητα κατά πλάτος (κεκλιμένες επιφάνειες) θεωρείται ότι υπάρχει ροή νερού μόνο κατά μήκος αυτών. Όταν υπάρχει μηδενική καμπυλότητα κατά πλάτος, κάθε σημείο λαμβάνει ροή μόνο από τα σημεία που είναι αμέσως πιο ψηλά από αυτό. Σε αυτήν την περίπτωση, η κύμανση της παραμένουσας απόθεσης του FRN μπορεί να καθοριστεί με μία μόνο διατομή (Εικόνα 4.12).



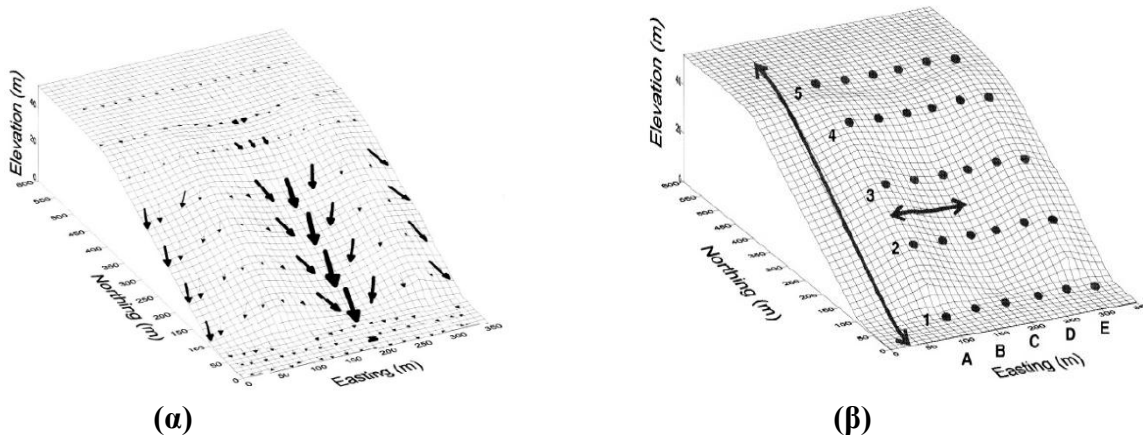
Εικόνα 4.12

Κεκλιμένη επιφάνεια με μηδενική καμπυλότητα κατά πλάτος:

- (α) Τα βέλη υποδεικνύουν αυξανόμενη ροή επιφανειακού νερού και αποτιθέμενου χόματος στο κατερχόμενο τμήμα, χωρίς σημαντική ροή κατά πλάτος.
(β) Σχεδιασμός δειγματοληψίας σε κεκλιμένη επιφάνεια με χρήση απλής διατομής.

(Pennock and Appleby, In: Zapata (ed), 2002, pp. 15-40).

- (ii) Οι πλαγιές με σημαντική καμπυλότητα κατά πλάτος δημιουργούν σύγκλιση και απόκλιση της ροής κατά πλάτος, ανάλογα με την καμπυλότητα τους. Στη μορφολογία αυτή, η χρήση μίας μόνο διατομής δεν επαρκεί. Για παράδειγμα, μία διατομή κατά μήκος από το A θα περιελάμβανε μόνο αποκλίνοντα τμήματα της πλαγιάς, ενώ μια διατομή κατά μήκος από το C θα περιελάμβανε μόνο συγκλίνοντα τμήματα. Στην περίπτωση αυτή, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας σχεδιασμός δειγματοληψίας με πολλαπλές παράλληλες διατομές ή με πλέγμα. Επειδή είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται η αντιπροσώπευση όλων των τμημάτων μέσα στο πλέγμα, θα πρέπει αυτό να εκτείνεται κατά μήκος της πλαγιάς από την κορυφή μέχρι τους πρόποδες και να περιλαμβάνει κατά πλάτος της πλαγιάς τουλάχιστο μια πλήρη διαδοχή σύγκλισης-απόκλισης (Εικόνα 4.13).



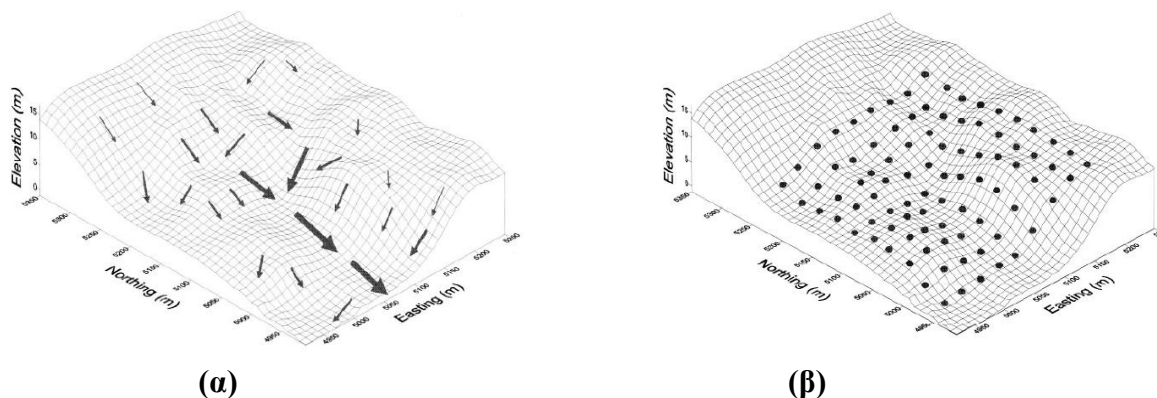
Εικόνα 4.13

Κυματοειδής ή κατάτμητη επιφάνεια.

- (α) Η εμφανής καμπυλότητα της επιφάνειας προκαλεί συγκέντρωση ροής νερού και ιζημάτων στα κοίλα τμήματα και απόκλιση της ροής στα κυρτά τμήματα.
- (β) Το διπλό βέλος κατά μήκος της πλαγιάς οριοθετεί το ελάχιστο μήκος του κατερχόμενου τμήματος της πλαγιάς του μεγάλου άξονα του πλέγματος, ενώ το διπλό βέλος κατά πλάτος της πλαγιάς υποδηλώνει το ελάχιστο μήκος κατά πλάτος του μικρού άξονα του πλέγματος.

(Pennock and Appleby, In: Zapata (ed), 2002, pp. 15-40)

- (iii) Σε μια σύνθετη διαμόρφωση επιφάνειας χωρίς κάποια κυρίαρχη κλίση και με πολλαπλές μικρές λεκάνες απορροής (Εικόνα 4.14), η πολυπλοκότητα των σχηματισμών της πλαγιάς προκαλεί τη δημιουργία πολλαπλών δρόμων ροής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μελέτη γίνεται σε ολόκληρη της επιφάνεια της πλαγιάς, ενώ σε άλλες, η μελέτη μπορεί να γίνει μόνο σε ένα τμήμα της επιφάνειας, το οποίο θεωρείται αντιπροσωπευτικό. Σε σύνθετους σχηματισμούς επιφανειών, το μεγάλο εύρος των μεγεθών των λεκανών απορροής καθώς και των σχηματισμών της πλαγιάς απαιτεί την χρήση ενός πλέγματος δειγματοληψίας. Συνήθως, χρησιμοποιούνται τετράγωνα πλέγματα, αλλά μερικές φορές έχουν χρησιμοποιηθεί και ορθογώνια.



Εικόνα 4.14

Σύνθετη διαμόρφωση επιφάνειας.

- (α) Ο μεγάλος αριθμός λεκανών απορροής δημιουργούν μια σύνθετη χωρική μορφή ροής.
- (β) Το απεικονιζόμενο πλέγμα είναι κατάλληλο για μελέτες χωρικών μορφών.

(Pennock and Appleby, In: Zapata (ed), 2002, pp. 15-40)

- **Δειγματοληψία σε μικρές λεκάνες απορροής**

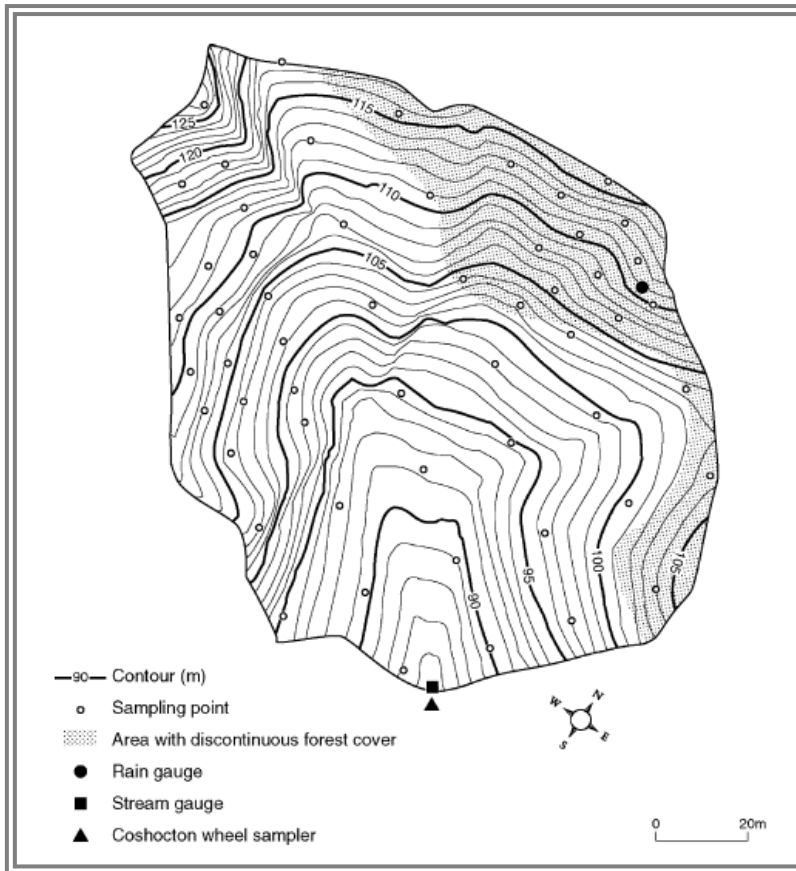
Ο αριθμός και η απόσταση των δειγμάτων είναι δυνατό να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της χωρικής μορφής της κατανομής του ^{137}Cs ή των άλλων FRNs και, κατά συνέπεια, της χωρικής μορφής της ανακατανομής του χώματος. Με τη χρήση πλεγμάτων μικρών διαστάσεων επιτυγχάνεται η απόκτηση λεπτομερέστερων πληροφοριών, αλλά αυξάνεται το κόστος των ερευνών μεγάλης χωρικής κλίμακας. Εντούτοις, είναι δυνατό να εξισορροπηθούν οι επιστημονικοί στόχοι με τους οικονομικούς περιορισμούς μέσω της αύξησης των διαστάσεων των χρησιμοποιούμενων πλεγμάτων, χωρίς σημαντική απώλεια των αποκτηθέντων πληροφοριών. Πάντως, πριν από την επιλογή των διαστάσεων ενός πλέγματος, πάντοτε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η τοπογραφία της περιοχής, που μελετάται.

Για παράδειγμα, σε έρευνα που έγινε σε λεκάνη απορροής, έκτασης 8 ha), στον Καναδά (Mabit et al., 2002), χρησιμοποιήθηκε πλέγμα διαστάσεων 25x30m και συλλέχθηκαν 539 δείγματα χώματος. Στα πλαίσια της ίδιας μελέτης δοκιμάστηκαν και πλέγματα μεγαλύτερων διαστάσεων (50 x 60 m και 100 x 120 m). Το συμπέρασμα, που προέκυψε, καθιστούσε δυνατή, έως ένα βαθμό, τη μείωση της πυκνότητας της δειγματοληψίας για το ^{137}Cs και τη συνεπαγόμενη μείωση του κόστους της έρευνας, χωρίς σημαντική απώλεια των πληροφοριών των ρυθμών ανακατανομής του χώματος και της χωρικής κατανομής του μέσα στην υπό μελέτη περιοχή. Επίσης, ο Higgitt (1995), ακολουθώντας λίγο διαφορετική μέθοδο, χρησιμοποίησε πλέγμα 20 x 20 m και από τα 83 αρχικά σημεία δειγματοληψίας αφαίρεσε τυχαία έναν αριθμό σημείων για να καταλήξει σε 70, 60, 50 και 25 σημεία. Η μείωση του αριθμού των σημείων της δειγματοληψίας (εκτός από τη δραστική μείωση στα 25 σημεία) δεν είχε σημαντική επίδραση στη χωρική κατανομή των ρυθμών μετακίνησης του χώματος ή στο ισοζύγιο ανακατανομής του.

Συμπερασματικά, λοιπόν, η δειγματοληψία σε **μικρές ομογενείς λεκάνες απορροής**, έκτασης από **μερικά εκτάρια** έως **λίγα τετραγωνικά χιλιόμετρα**, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με χρήση **πλέγματος** διαστάσεων από **50** έως **100 m** ή με χρήση **πολλαπλών διατομών** σε συνδυασμό με πληροφορίες σχετικές με την τοπογραφία, τον τύπο του εδάφους και τη χρήση της γης (Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77).

Παρόλα αυτά, η επέκταση ή η γενίκευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από μια λεκάνη απορροής σε μια άλλη είναι ένα παρακινδυνευμένο εγχείρημα. Μια πιο κατάλληλη προσέγγιση θα μπορούσε να είναι μια δειγματοληψία, η οποία θα εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους. Ο αριθμός των δειγμάτων χώματος μπορεί να μειωθεί σε περιοχές με ομοιόμορφη κλίση, αλλά πρέπει να αυξηθεί στην περίπτωση κυματοειδών τοπογραφιών.

Ένα παράδειγμα, αποτελεί η δειγματοληψία των Porto et al. (2001) σε μικρή λεκάνη απορροής (1,38 ha) στη Νότια Ιταλία, με κλίσεις εύρους 12-69% και αργιλώδη χώματα αποτελούμενα από περίπου 86% ιλύ και άργιλο ($d < 50\mu\text{m}$) (Εικόνα 4.15).



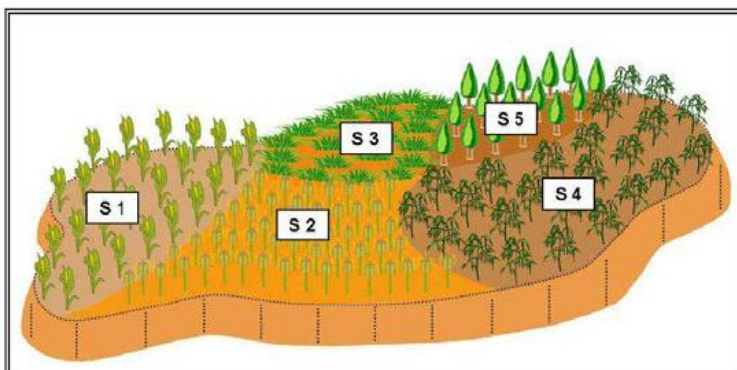
Εικόνα 4.15

Δειγματοληψία σε μικρή λεκάνη απορροής (1,38ha) στη Νότια Ιταλία.

(Porto et al., 2001)

- **Δειγματοληψία σε μεγάλες λεκάνες απορροής**

Σε μεγάλες λεκάνες απορροής (μεγαλύτερες από 100 ha), δεν είναι δυνατή η χρήση ενός κανονικού πλέγματος εξαιτίας της πολύ μεγάλης αύξησης του κόστους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ακολουθείται μια άλλη μέθοδος, κατά την οποία περιοχή που μελετάται υποδιαιρείται σε ομογενείς τομείς (isosectors) (Εικόνα 4.16). Η υποδιαίρεση επιτυγχάνεται με χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Geographical Information Systems, GIS) και λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση της γης καθώς και πληροφορίες για την τοπογραφία της περιοχής και την υφή του εδάφους.



Εικόνα 4.16

Σχηματική αναπαράσταση μιας λεκάνης απορροής υποδιαιρεμένης σε 5 τομείς (isosectors) ανάλογα με τη χρήση του εδάφους.

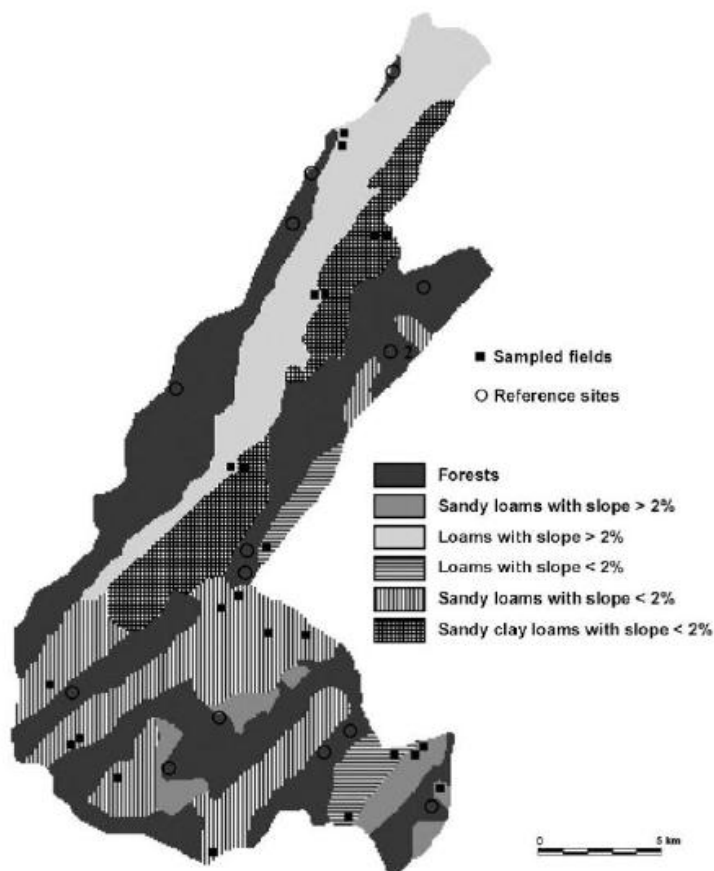
(Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77)

Για παράδειγμα, μια μεγάλη λεκάνη απορροής, έκτασης 217 km², στον Καναδά (Mabit et al., 2007), υποδιαιρέθηκε σε έξι διαφορετικούς τομείς, οι οποίοι περιελάμβαναν δύο κατηγορίες χρήσης της γης, τρεις κλάσεις υφής⁽³⁴⁾ του εδάφους και δύο κατηγορίες κλίσης του εδάφους (Εικόνα 4.17).

Εικόνα 4.17

Η κατανομή των 6 τομέων (isosectors) στη λεκάνη απορροής Boyer River στον Καναδά καθώς και τα πεδία δειγματοληψίας και οι τοποθεσίες αναφοράς.

(Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77)



Μετά την υποδιαίρεση μιας μεγάλης λεκάνης απορροής σε επιμέρους τομείς, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή αντιπροσωπευτικών πεδίων μέσα σε κάθε τομέα, στα οποία πραγματοποιείται δειγματοληψία με χρήση πλεγμάτων ή πολλαπλών διατομών ή απλών διατομών όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν, ή και συνδυασμό των παραπάνω όταν πρόκειται για αντιπροσωπευτικά πεδία του ίδιου τομέα. Τα αποτελέσματα, που προκύπτουν από τα αντιπροσωπευτικά πεδία, επεκτείνονται τότε για ολόκληρο τον τομέα, που αντιπροσωπεύουν. Πρέπει να σημειωθεί ότι για μεγάλες περιοχές με μεταβλητή ετήσια βροχόπτωση απαιτείται η επιλογή επιπρόσθετων τοποθεσιών αναφοράς, οι οποίες θα πρέπει να βρίσκονται όσο το δυνατό πιο κοντά στα αντιπροσωπευτικά πεδία της δειγματοληψίας και να πληρούν τα κριτήρια που αναπτύχθηκαν στην § 4.4.2.

Εναλλακτικά, αντί για την υποδιαίρεση σε τομείς, που περιγράφηκε παραπάνω, θα μπορούσε να ερευνηθεί μια μικρότερη λεκάνη απορροής, αντιπροσωπευτική της μεγαλύτερης, η οποία να περιλαμβάνει μικρότερο αριθμό αντιπροσωπευτικών πεδίων, χρησιμοποιώντας την κλασική στρατηγική δειγματοληψίας, που εφαρμόζεται σε κλίμακα πεδίου.

⁽³⁴⁾ Βλ. Παράρτημα Δ.3

4.5 Συλλογή δειγμάτων χώματος και εργαλεία δειγματοληψίας για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs

Οι μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των δειγμάτων χώματος προκειμένου να προσδιορίσουν τα επίπεδα ραδιενέργειας του ^{137}Cs και των άλλων FRNs: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , εξαρτώνται από τους σκοπούς της μελέτης, τα χαρακτηριστικά της περιοχής και του χώματος, που ερευνάται, τον συνολικό αριθμό των δειγμάτων, που μπορούν να αναλυθούν, και τη μάζα του δείγματος, που απαιτείται.

Επειδή για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων απαιτούνται πληροφορίες τόσο για τις *συνολικές παραμένουσες αποθέσεις* όσο και για τις *κατά βάθος κατανομές (depth distributions)* των FRNs, που εμπλέκονται στη μελέτη, δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δειγμάτων χώματος: **(i) ολική δειγματοληψία με χρήση κυλινδρικών πυρήνων («καρότων»)** (*Bulk sampling using cores*) και **(ii) κατά βάθος δειγματοληψία** (*Depth incremental sampling*).

Η ολική δειγματοληψία είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του βάθους διείσδυσης των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be στο έδαφος τόσο της τοποθεσίας αναφοράς όσο και της υπό μελέτη τοποθεσίας, ώστε ολόκληρο το προφίλ τους να εμπεριέχεται στο δείγμα του χώματος.

Η κατά βάθος δειγματοληψία είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της κατά βάθος κατανομής των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be στο έδαφος. Για την τοποθεσία αναφοράς, η μορφή της κατά βάθος κατανομής τους επιβεβαιώνει ότι η τοποθεσία δεν έχει διαταραχτεί κι επομένως είναι κατάλληλη για καθορισμό της τοπικής τιμής της εισαγόμενης εναπόθεσής τους. Για την υπό μελέτη τοποθεσία, η μορφή της κατά βάθος κατανομής των FRNs παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τον προσδιορισμό του βάθους δειγματοληψίας περιοχών, που υφίσταται διάβρωση, αλλά κι εκείνων που υφίσταται απόθεση ιζημάτων. Επίσης, η κατακόρυφη κατανομή ενός FRN στο έδαφος είναι απαραίτητη για την εφαρμογή μοντέλων μετατροπής για μη καλλιεργούμενα εδάφη, αφού προσδιορίζει παραμέτρους, που αυτά χρησιμοποιούν (Βλ. § 4.9.4. γ, στ).

Η κατακόρυφη κατανομή των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be στο έδαφος της υπό μελέτη τοποθεσίας παρουσιάζει μεγαλύτερη ποικιλομορφία σε σχέση με αυτήν της θέσης αναφοράς, αφού το βάθος του εδάφους, στο οποίο έχουν διεισδύσει, είναι μικρότερο στις τοποθεσίες, που έχουν υποστεί διάβρωση, και μεγαλύτερο στις τοποθεσίες, όπου έχει γίνει απόθεση ιζημάτων. Επίσης, το βάθος διείσδυσης των τριών FRNs εξαρτάται από τη χρήση του εδάφους. Είναι μικρότερο σε βοσκότοπους και μεγαλύτερο σε καλλιεργούμενες περιοχές, στις οποίες θα ποικίλει ανάλογα με το βάθος του οργώματος. Επομένως, θα πρέπει να γίνονται αναγνωριστικές, δοκιμαστικές κατά βάθος δειγματοληψίες, σε διάφορες θέσεις της περιοχής, που μελετάται, ώστε να προσδιορίζεται η κατακόρυφη κατανομή του υπό μελέτη FRN στο έδαφος και να καθορίζεται το βάθος της δειγματοληψίας.

- Γενικά, για τη δειγματοληψία στην περίπτωση του ^{137}Cs , πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα εξής:
 - *Τοποθεσίες αναφοράς:* Το βάθος της δειγματοληψίας πρέπει να είναι περίπου 30cm.
 - *Μη καλλιεργούμενες περιοχές:* Σε τοποθεσίες διάβρωσης, είναι επαρκές ένα βάθος δειγματοληψίας 30cm. Σε τοποθεσίες απόθεσης, τα δείγματα πρέπει να συλλέγονται από βάθη 40-60cm ή και βαθύτερα, ανάλογα με το μέγεθος της απόθεσης.
 - *Καλλιεργούμενες περιοχές:* Εάν πρόκειται για ζώνες που έχουν υποστεί διάβρωση, τότε το ^{137}Cs έχει αναμιχθεί με το οργωμένο στρώμα του εδάφους σε βάθος 20-40cm. Εάν

πρόκειται για ζώνες, όπου έχει γίνει απόθεση ιζημάτων, τότε τα δείγματα πρέπει να συλλέγονται σε βάθη 40-60cm ή και βαθύτερα, ανάλογα με το βάθος του οργώματος και το μέγεθος της απόθεσης.

Για τον προσδιορισμό της κατά βάθος κατανομής του ^{137}Cs , απαιτούνται αυξανόμενου βάθους τμηματικά δείγματα χώματος, συνήθως **2-5cm** ή κατά προτίμηση 2cm για έναν πιο ακριβή προσδιορισμό του προφίλ του.

- Ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, που εναποτίθεται στο έδαφος από την ατμόσφαιρα, έχει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του ^{137}Cs , με αποτέλεσμα να παρουσιάζει παρόμοιες κατακόρυφες κατανομές. Επομένως, οι κατευθυντήριες γραμμές για τη δειγματοληψία του ^{137}Cs , που δόθηκαν παραπάνω, θα ισχύουν και για την περίπτωση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Επιπλέον, για την επίτευξη ενός αποδοτικού σχεδιασμού συλλογής δειγμάτων χώματος θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξής δυσκολίες:

- ο Επειδή ο προσδιορισμός του ^{210}Pb σε δείγματα χώματος με γ-φασματοσκοπικές μεθόδους πραγματοποιείται μέσω των φωτονίων χαμηλής ενέργειας (46,52 keV), που εκπέμπει, παρουσιάζει προβλήματα λόγω της ισχυρής αυτοαπορρόφησης των φωτονίων αυτών, ειδικά σε δείγματα χώματος μεγάλου όγκου.
- ο Η ύπαρξη στο δείγμα άλλων ραδιενεργών ισοτόπων, τόσο φυσικών (π.χ. της σειράς του ^{238}U , της σειράς του ^{232}Th , του ^{40}K) όσο και τεχνητών (π.χ. του ^{137}Cs), οδηγεί στην αύξηση του συνεχούς υποστρώματος στην ενεργειακή περιοχή ανίχνευσης των φωτονίων του ^{210}Pb , με αποτέλεσμα την αύξηση του κατώτερου επιπέδου ανίχνευσής του καθώς και της αβεβαιότητας στον ποσοτικό προσδιορισμό του.

- Όσον αφορά στην περίπτωση του ^7Be , απαιτείται η συλλογή ολικών δειγμάτων χώματος από μικρά βάθη διότι η ύπαρξή του περιορίζεται στο άμεσο επιφανειακό στρώμα του εδάφους. Εάν το δείγμα δεν συλλεχθεί από επαρκές βάθος, δεν θα περιέχει τη συνολική παραμένουσα απόθεση του ^7Be , με αποτέλεσμα η διάβρωση του εδάφους να υπερεκτιμηθεί. Από την άλλη, εάν το βάθος της δειγματοληψίας είναι πολύ μεγάλο, η συγκέντρωση του ^7Be στο συνολικό δείγμα θα μειωθεί, με αποτέλεσμα το δείγμα να περιλαμβάνει χόμα με ^7Be ραδιενέργειας κάτω από το όριο ανίχνευσης. Απαιτείται, λοιπόν, προσεκτικός σχεδιασμός, ο οποίος στην ιδανική περίπτωση θα πρέπει να συνοδεύεται από ήδη υπάρχουσα γνώση του προφίλ του ^7Be στο έδαφος της περιοχής, που μελετάται.

Η μεγαλύτερη πρόκληση στη χρήση της τεχνικής του ^7Be είναι η επίτευξη κατάλληλης κατακόρυφης δειγματοληψίας για το προσδιορισμό της κατακόρυφης κατανομής του. Οι διαδικασίες και οι διατάξεις δειγματοληψίας μπορεί να αποτελέσουν ένα σημαντικό περιορισμό για την επίτευξη αυτού του στόχου. Απαιτείται είτε ο τεμαχισμός του χώματος του κυλινδρικού πυρήνα («καρότου») σε μικρά τμήματα είτε η συλλογή δειγμάτων με μικρά βήματα αυξανόμενου βάθους. Όμως, μικρότερο βήμα κατά τη δειγματοληψία συνεπάγεται και μικρότερη ποσότητα συλλεγόμενου χώματος, κάτι που εισάγει μεγαλύτερες αβεβαιότητες κατά τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων. Για το ^7Be , τα βήματα θα πρέπει να είναι περίπου 2mm, αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει η μάζα του δείγματος να είναι επαρκής ώστε η γ-φασματοσκοπία να παρέχει αξιόπιστες μετρήσεις της ραδιενέργειάς του. Μία μέθοδος για να ξεπεραστούν τα παραπάνω προβλήματα είναι να γίνουν δοκιμαστικές κατά βάθος δειγματοληψίες με διαφορετικά βήματα και στο τέλος να επιλεγεί η δειγματοληψία εκείνη με το μικρότερο βήμα, που παρέχει αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Έτσι, διάφορες μέθοδοι κι εργαλεία δειγματοληψίας έχουν χρησιμοποιηθεί προκειμένου να ανταποκριθούν στις διαφορετικές απαιτήσεις των τριών FRNs.

4.5.1 Ολική δειγματοληψία με χρήση κυλινδρικών πυρήνων («καρότων»)

Όταν απαιτείται μόνο ο καθορισμός της παραμένουσας απόθεσης κάποιου FRN, τότε αρκεί η συλλογή ενός δείγματος χώματος, που θα εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το κατάλληλο για κάθε ραδιενεργό ισότοπο βάθος.

Για την περίπτωση του ^{137}Cs χρησιμοποιείται, γενικά, ένας κύλινδρος από ατσάλι, εσωτερικής διαμέτρου 7-10cm και πάχους τοιχώματος 2-5mm, ο οποίος διαθέτει αιχμηρό και αμβλυμμένο άκρο. Όσο μικρότερη είναι η διάμετρός του τόσο πιο εύκολη είναι η διείσδυση του κυλίνδρου στο χώμα, ενώ όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του στην κάμψη λόγω καταπόνησης. Έτσι, για την περίπτωση πετρώδους και ανθεκτικού εδάφους απαιτείται κύλινδρος πάχους 5mm, ενώ για την περίπτωση συμπαγούς και αργιλώδους εδάφους, όπου το χώμα μπορεί να κολλήσει μέσα στον κύλινδρο, απαιτείται το αιχμηρό του άκρο να έχει λίγο μικρότερη εσωτερική διάμετρο από αυτή του ίδιου του κυλίνδρου, ώστε να διευκολύνεται η εισαγωγή του κυλίνδρου στο χώμα καθώς επίσης και η εξαγωγή του δείγματος χώματος (Walling and Quine, 1993).

Ο κύλινδρος μπορεί να εισάγεται στο έδαφος χειροκίνητα (π.χ. με χρήση βαριοπούλας). Στην περίπτωση αυτή, συνήθως χρησιμοποιείται και μια προστατευτική χαλύβδινη πλάκα που τοποθετείται στο επάνω μέρος του κυλίνδρου. Για την εξαγωγή του κυλίνδρου από το έδαφος, απαιτείται, ενδεχομένως, πρώτα η αφαίρεση χώματος γύρω από τον κύλινδρο καθώς και η τοποθέτηση ενός μεταλλικού ελάσματος στο κάτω μέρος του, ώστε, κατά την εξαγωγή του κυλίνδρου από το έδαφος, να συγκρατηθεί το χώμα στο εσωτερικό του. Εντούτοις, όταν πραγματοποιείται δειγματοληψία σε συμπαγή χώματα δεν είναι αναγκαίο να σκαφτεί το χώμα μέχρι τη βάση του κυλίνδρου, ώστε να συγκρατηθεί από κάτω το χώμα που έχει συλλεχθεί, διότι το χώμα είναι απίθανο να διαφύγει. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όμως, είναι συχνά αναγκαία η χρήση φορητού βαρούλκου (Εικόνα 4.18 πάνω) για να εξαχθεί ο κύλινδρος από το έδαφος. Πάντως, πρέπει να επισημανθεί ότι η εξαγωγή του χώματος από τον κύλινδρο με τρόπο, που να εξασφαλίζει τη μη ανάμιξη των διαφόρων στρωμάτων, είναι μια δύσκολη διαδικασία.



Όταν απαιτείται η δειγματοληψία μεγάλου αριθμού δειγμάτων ή όταν το χώμα είναι ξηρό, η διείσδυση του κυλίνδρου στο έδαφος παρουσιάζει δυσκολία. Ερευνητές από το Πανεπιστήμιο του Έξετερ στο Ηνωμένο Βασίλειο χρησιμοποιούν ένα μηχανοκίνητο κρουστικό σφυρί για να διεισδύει ευκολότερα ο κύλινδρος μέσα στο έδαφος (Walling and Quine, 1993). Το κρουστικό σφυρί προσαρμόζεται στην κορυφή του κυλίνδρου και η διείσδυσή του στο χώμα γίνεται με μεγάλη ταχύτητα. Ένας τέτοιος μηχανικός εξοπλισμός μπορεί να κάνει τη δειγματοληψία ευκολότερη και γρηγορότερη. Παράδειγμα αποτελεί το «Κυλινδρικό Τρυπάνι Στήλης Χώματος» (“Soil Cylinder Column Auger»), το οποίο χρησιμοποιείται από τα μέλη και το προσωπικό του ΙΑΕΑ (Εικόνα 4.18 κάτω).



Εικόνα 4.18

Συλλογή δειγμάτων χώματος από μέλη και προσωπικό του ΙΑΕΑ με χρήση ενός χειροκίνητου κι ενός μηχανοκίνητου κυλινδρικού τρυπανιού στήλης χώματος. (Mabit et al., ΙΑΕΑ-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77)

4.5.2 Κατά βάθος δειγματοληψία: μέθοδοι και εργαλεία

Η κατά βάθος δειγματοληψία παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την κατά βάθος κατανομή του FRN, που μελετάται. Επειδή η κατά βάθος κατανομή κάθε ραδιενεργού ισότοπου διαφέρει, διαφορετικές μέθοδοι και διαφορετικά βήματα κατά βάθος δειγματοληψίας απαιτούνται όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικά FRNs.

- **Κυλινδρικός σωλήνας με τομή κατά μήκος (Sectioned cores)**

Το απλούστερο εργαλείο αυτής της μεθόδου δειγματοληψίας είναι ένας κυλινδρικός σωλήνας από ατσάλι με τομή κατά μήκος του (Εικόνα 4.19 πάνω). Η διάμετρος του πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο του κυλίνδρου, που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της παραμένουσας απόθεσης των FRNs, προκειμένου η μάζα του δείγματος από κάθε τμήμα βάθους να είναι επαρκής για επακόλουθη ραδιομετρική ανάλυση. Το αιχμηρό άκρο του κυλινδρικού σωλήνα πρέπει και σε αυτήν την περίπτωση να έχει λίγο μικρότερη εσωτερική διάμετρο από αυτή του ίδιου του σωλήνα. Για την περίπτωση του ^{137}Cs , χρησιμοποιούνται, συνήθως, κυλινδρικοί σωλήνες διαμέτρων 10-15cm. Όταν συλλεχθεί ολόκληρο το δείγμα του χώματος, τότε τεμαχίζεται σε αυξανόμενου βάθους τμηματικά δείγματα, συνήθως 2-5cm (Εικόνα 4.19 κάτω). Πάντως, για έναν ακριβή προσδιορισμό του προφίλ του ^{137}Cs είναι προτιμότερος ο τεμαχισμός του δείγματος του χώματος σε τμήματα των 2cm.



Εικόνα 4.19

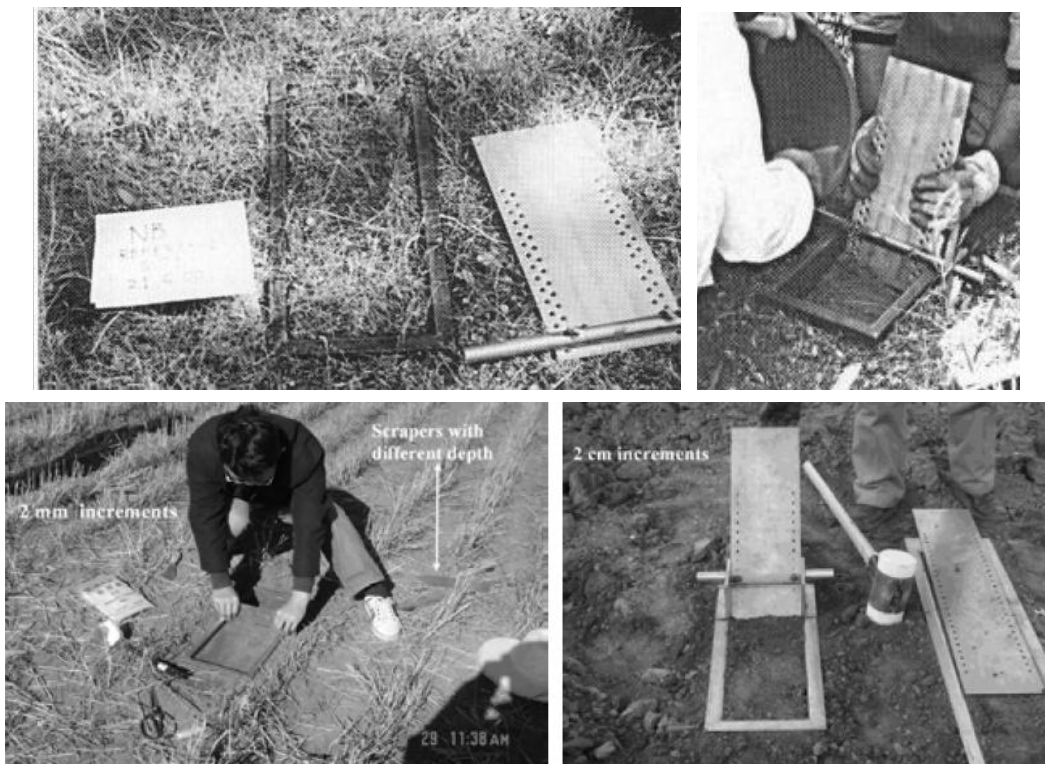
*Κυλινδρικός δειγματολήπτης
χώματος και τεμαχισμός
δειγμάτων χώματος από μέλη και
προσωπικό του ΙΑΕΑ.*

**(Mabit et al., IAEA-TECDOC-
1741, 2014, pp. 27-77)**

- **Έλασμα απόξεσης (scarp plate)**

Μια εναλλακτική μέθοδος για την απόκτηση αυξανόμενου βάθους δειγμάτων χώματος είναι η χρήση του «ελάσματος απόξεσης» (“scarp plate”). Πρόκειται για μια συσκευή δειγματοληψίας που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την περίπτωση του ^{137}Cs (Walling and Quine, 1993). Αποτελείται από δύο εξαρτήματα: (i) ένα μεταλλικό πλαίσιο (εσωτερικών διαστάσεων 50 x 20 cm, συνήθως) κατασκευασμένο από χάλυβα ή αλουμίνιο, το οποίο μπορεί να διεισδύει στο έδαφος και (ii) ένα προσαρμόσιμο μεταλλικό έλασμα (διαστάσεων 18 x 40cm, συνήθως), το οποίο μπορεί να απομακρύνει με απόξεση χώμα σταθερού πάχους (Εικόνα 4.20). Στο μεταλλικό έλασμα υπάρχουν οπές, οι οποίες ισαπέχουν κατά 1cm κι επιτρέπουν σε μια ράβδο να προσαρμόζεται πάνω τους έτσι ώστε να είναι δυνατή η συλλογή χώματος μέσα στο πλαίσιο σε διάφορα βάθη, με βήμα 1cm (ή 2cm προκειμένου να συλλέγεται επαρκής ποσότητα χώματος για ανάλυση).

Τα πλεονεκτήματα αυτής της συσκευής είναι ότι μπορεί να αφαιρέσει μεγάλη ποσότητα χώματος από μια μεγάλη επιφάνεια, αποτελείται από λίγα κομμάτια που μεταφέρονται εύκολα, είναι ανθεκτική και απλή στην κατασκευή της. Πιθανές δυσκολίες κατά τη χρήση της συσκευής αποτελούν η βλάστηση, οι πέτρες, η επιφάνεια του εδάφους όταν είναι κεκλιμένη ή έχει προεξοχές καθώς και τα τοιχώματα του λάκκου όταν είναι ασταθή κι ένα τμήμα τους μπορεί να καταρρεύσει. Έτσι, κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας, μπορεί να χρειαστούν βοηθητικά εργαλεία, όπως μαχαίρια (για την κοπή ριζών), μεταλλικοί ξύστες (για να βγάλουν το χώμα από τις γωνίες), δοχεία νερού με ψεκασμό (για τη σταθεροποίηση των τοιχωμάτων του λάκκου) κ.ά. Πάντως η συσκευή δεν είναι κατάλληλη για πολύ πετρώδη εδάφη (Εικ.4.21).



Εικόνα 4.20

Δειγματοληψία χώματος με χρήση ελάσματος απόξεσης (scarp plate). Loughran et al. (In: Zapata (ed), 2002, pp. 41-57) - Mabit et al. (IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77)



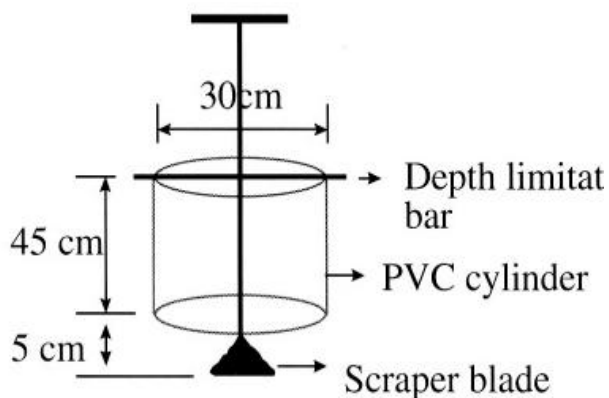
Εικόνα 4.21

Πολύ πετρώδες έδαφος που καθιστά ακατάλληλη τη χρήση του ελάσματος απόξεσης (scraper plate).

Loughran et al. (In: Zapata (ed), 2002, pp. 41-57)

- **Κύλινδρος PVC**

Όταν το χώμα είναι πολύ αμμώδες, η κατάρρευση των τοιχωμάτων είναι πολύ πιθανή. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μία εναλλακτική μέθοδος αντί του ελάσματος απόξεσης. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση ενός κυλίνδρου από PVC διαμέτρου 30cm και ενός κυκλικού εργαλείου συλλογής χώματος, το οποίο τοποθετείται μέσα στον κύλινδρο PVC και περιστρέφεται χειροκίνητα για να αποκολλήσει το χώμα. Η διάταξη είναι κατασκευασμένη έτσι ώστε να συλλέγει τμηματικά δείγματα με βήμα 5cm για συνολικό βάθος έως 40cm. Ο όγκος κάθε τμηματικού δείγματος είναι 3.500cm^3 (Εικόνα 4.22).



Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ο κύλινδρος από PVC διεισδύει διαδοχικά όλο και πιο βαθιά στο χώμα, κάθε φορά που συλλέγεται ένα δείγμα, προστατεύοντας τα τοιχώματα από κατάρρευσή τους και εμποδίζοντας την ανάμιξη των δειγμάτων με χώμα από τα άλλα στρώματα.

Ένα μειονέκτημα είναι ότι το βήμα της τμηματικής δειγματοληψίας είναι μεγάλο με συνέπεια να παρέχονται περιορισμένες πληροφορίες για τον προσδιορισμό της κατά βάθος κατανομής των ραδιενεργών ισοτόπων, ιδίως του ^{210}Pb και του ^7Be . Με προσαρμογή αυτής της διάταξης θα μπορούσαν να συλλεχθούν τμηματικά δείγματα χώματος με μικρότερο βήμα (π.χ. 1cm). Πάντως, το κυριότερο, μειονέκτημα είναι ότι ο κύλινδρος από PVC μπορεί να διεισδύει μόνο σε συγκεκριμένου τύπου χώματα (π.χ. αμμώδη).



Εικόνα 4.22

Κύλινδρος PVC.

Loughran et al. (In: Zapata (ed), 2002, pp. 41-57)

- **Μεταλλικοί δακτύλιοι**

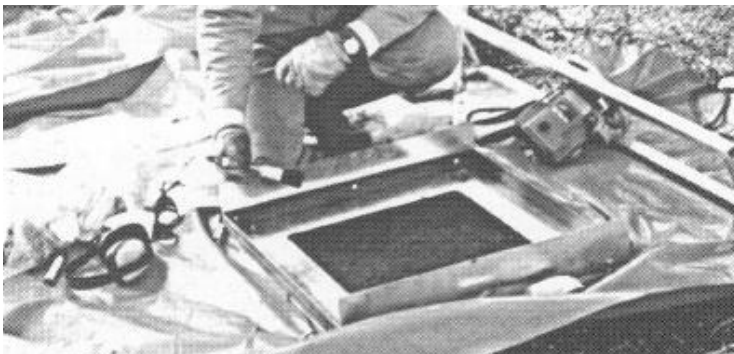
Πρόκειται για μια κατασκευή η οποία αποτελείται από μία σειρά μεταλλικών δακτυλίων μικρού ύψους, που χρησιμοποιούνται διαδοχικά κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας. Ο πρώτος μεταλλικός δακτύλιος είναι ύψους 30mm και διαμέτρου 100mm και καρφώνεται στο έδαφος. Ο δακτύλιος διεισδύει μέχρι βάθους 20mm και 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 και συλλέγει το χώμα από τα 20-50mm με την βοήθεια ενός διαφορετικού τρυπανιού που είναι σχεδιασμένο για αυτό το βάθος. Αντί για χειροκίνητο τρυπάνι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μηχανοκίνητο για μεγαλύτερη ταχύτητα και απόδοση. Για σαθρά χώματα (π.χ. αμμώδη) είναι συχνά δύσκολη η συλλογή χώματος μέχρι συγκεκριμένου βάθους.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι με την ίδια δειγματοληψία μπορούν να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας και των τριών ραδιενεργών ισοτόπων, ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^{137}Cs , εάν η αλληλουχία των δακτυλίων φτάσει έως τα 20cm περίπου, για να περιλαμβάνει σχεδόν και όλο το ^{137}Cs . Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι πρόκειται για χρονοβόρα διαδικασία σε σχέση με την απλή δειγματοληψία μέσω ενός κυλινδρικού δειγματολήπτη.

- **Τροποποιημένο ρούτερ ξύλου (wood router)**

Το τροποποιημένο ρούτερ ξύλου, που περιγράφεται από τους διαθέτει βραχίονες επέκτασης που του επιτρέπουν να παραμένει πάνω σε ένα πλαίσιο 50 x 50 cm, το οποίο στερεώνεται στο έδαφος ώστε να ορίζει την επιφάνεια μέσα στην οποία θα γίνει η δειγματοληψία (Εικόνα 4.23). Το βάθος της φρέζας (router bit) ελέγχεται ώστε να καλύπτει κατακόρυφη απόσταση 30 mm περίπου, με μικρό βήμα έως και 1 mm. Ο χειριστής, κρατώντας το ρούτερ από τους βραχίονες επέκτασης, τον κινεί τριγύρω μέσα την περιοχή που οριοθετείται από το πλαίσιο, με αποτέλεσμα να εκτοπίζεται ή να χαλαρώνει το χώμα μέχρι ένα προκαθορισμένο βάθος. Το χώμα που εκτοπίζεται ή χαλαρώνει απορροφάται σε ξεχωριστή σακούλα ή απομακρύνεται με χρήση βούρτσας ή ελάσματος.

Το πλεονέκτημα είναι ότι καθίσταται δυνατή η λήψη δειγμάτων χώματος με πολύ μικρό βήμα αυξανόμενου βάθους. Το μειονέκτημα είναι ότι παράγεται μεγάλος αριθμός δειγμάτων, με αποτέλεσμα η εργασία της δειγματοληψίας να γίνεται επίπονη και χρονοβόρα και οι απαιτήσεις των αναλυτικών εγκαταστάσεων να αυξάνονται.



Εικόνα 4.23

Ρούτερ ξύλου με βραχίονες επέκτασης από αλουμίνιο και ασάλινο πλαίσιο τοποθετημένο στο έδαφος της Τασμανίας.

Loughran et al. (In: Zapata (ed), 2002, pp. 41-57)

- «Προσαρμοσμένος/τροποποιημένος» κύλινδρος φαινόμενης πυκνότητας (“adapted/modified” bulk density cylinder)

Πρόκειται για μια συσκευή, που σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία για την περίπτωση του ^{7}Be (Schuller et al., 2006) και χρησιμοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο, το Μαρόκο, και τη Χιλή (Sepulveda et al., 2008). Περιλαμβάνει έναν σωλήνα κι ένα έμβολο ίδιας διαμέτρου με αυτή του σωλήνα, η κίνηση του οποίου ελέγχεται από ένα σπείρωμα. Το έμβολο εισέρχεται στη βάση του σωλήνα και χρησιμοποιείται για να εξάγει κομμάτι χώματος πάχους 1mm σε κάθε πλήρη περιστροφή του σπειρώματος. Επομένως, η εξαγωγή χώματος πάχους 2mm γίνεται περιστρέφοντας το σπείρωμα δύο φορές. Τα κομμάτια του χώματος διαχωρίζονται από το υπόλοιπο χρώμα του κυλίνδρου χρησιμοποιώντας ένα αιχμηρό και πλατύ, σαν σπάτουλα, μαχαίρι (Εικόνα 4.24).



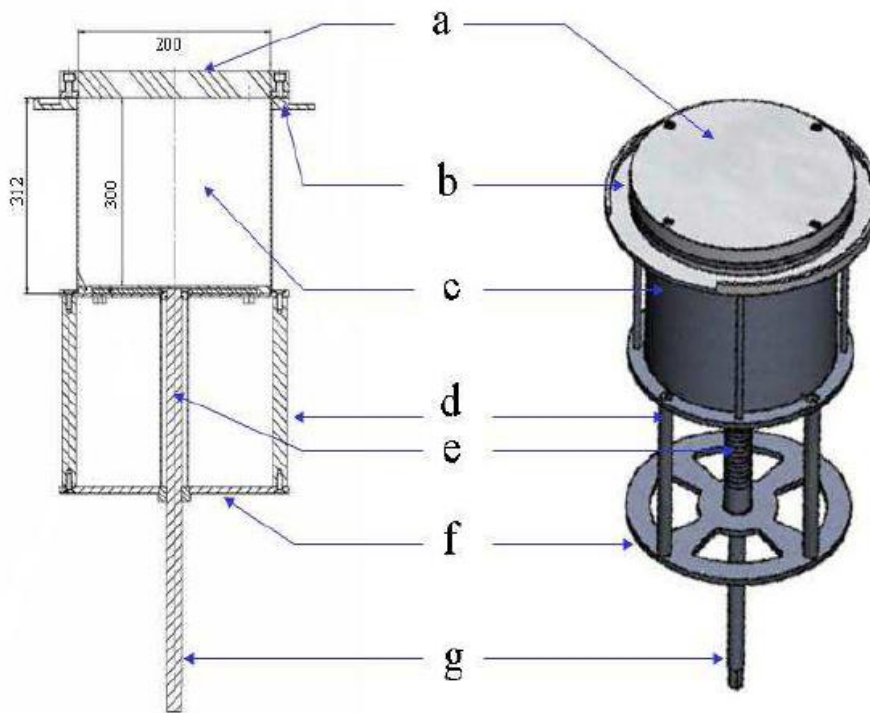
Εικόνα 4.24

Δειγματοληψία επιφανειακού χώματος και ο «τροποποιημένος» κύλινδρος φαινόμενης πυκνότητας (“modified” bulk density cylinder), που χρησιμοποιήθηκε σε έρευνες με χρήση ^{7}Be στο Μαρόκο.

(Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 105-124)

- Δειγματολήπτης χώματος για κατά βάθος δειγματοληψία πολύ μικρού βήματος (Fine Soil Increment Collector, FSIC)

Με σκοπό να αντιμετωπιστούν οι απαιτήσεις που επιβάλλει η περίπτωση του ^7Be για κατά βάθος δειγματοληψία με πολύ μικρό βήμα, η Μονάδα Εδαφολογίας του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency, IAEA) σε συνεργασία με το εργαστήριο μηχανικής Seibersdorf έχουν αναπτύξει ένα πρωτότυπο δειγματολήπτης χώματος (Εικόνες 4.25 και 4.26) για κατά βάθος δειγματοληψία πολύ μικρού βήματος (Fine Soil Increment Collector, FSIC) (Mabit et al., 2008a). Ο δειγματολήπτης αυτός επιτυγχάνει μεγάλο έλεγχο του μεγέθους του βήματος δειγματοληψίας και διευκολύνει τον τεμαχισμό του χώματος, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα σπειρώματος.



Εικόνα 4.25

The Fine Soil Increment Collector (FSIC)

- (a) Teflon/plastic cover
- (b) Teflon/plastic guide to collect soil
- (c) Stainless steel body cylinder
- (d) Cylinder metal frames
- (e) Graduated scale
- (f) Circular metal maintain frame
- (g) Screw thread.

(Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 105-124)



Εικόνα 4.26

Χρήση του “Fine Soil Increment Collector” (FSIC) σε εργασία πεδίου.

(Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 105-124)

Συγκριτικά με τα ήδη υπάρχοντα εργαλεία δειγματοληψίας, ο FSIC έχει τα εξής πλεονεκτήματα: (i) επιτρέπει τη δειγματοληψία επιφανειακών αδιατάρακτων εδαφών, (ii) προσαρμόζεται εύκολα ώστε να μπορεί να συλλέγει χώμα με μεγάλη ακρίβεια (της τάξης των mm), (iii) χειρίζεται εύκολα από ένα μόνο άτομο, (iv) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πεδίο ή στο εργαστήριο, (v) επιτρέπει τον υπολογισμό της φαινόμενης πυκνότητας (bulk density) με υψηλή κατακόρυφη ανάλυση, (vi) το μέγεθος του δείγματος μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τις απαιτήσεις και (vii) τα δείγματα επιφανειακού χώματος μπορούν να μεταφερθούν με ασφάλεια και χωρίς διαταραχή.

4.6 Προετοιμασία και προ-επεξεργασία των δειγμάτων χώματος για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs

Η διαδικασία της προετοιμασίας και προ-επεξεργασίας ενός δείγματος χώματος, που πρόκειται να αναλυθεί με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας-γ, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τόσο τη μετρούμενη ειδική ραδιενέργεια όσο και την ολική αβεβαιότητα της μέτρησης. Για το λόγο αυτό, έχει υιοθετηθεί μια τυποποιημένη διαδικασία, ώστε να εφαρμόζονται αντικειμενικά κριτήρια κατά την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be σε μελέτες διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων.

Στο στάδιο της προετοιμασίας και προ-επεξεργασίας, το οποίο περιλαμβάνει τις διαδικασίες: (i) της **ξήρανσης** και (ii) του **κοσκινίσματος**, τα δείγματα χώματος ετοιμάζονται και συσκευάζονται για την πραγματοποίηση *γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης*. Επιπλέον, γίνεται ο υπολογισμός της *φαινόμενης πυκνότητας (bulk density)*⁽³⁵⁾ του χώματος, η οποία είναι απαραίτητη για τη μετατροπή της μετρούμενης, από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, ειδικής ραδιενέργειας ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) των FRNs σε παραμένουσα απόθεση ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$)⁽³⁶⁾ καθώς και τη μετατροπή του γραμμικού βάθους (m) του προφίλ σε κατά μάζα βάθος ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)⁽³⁶⁾.

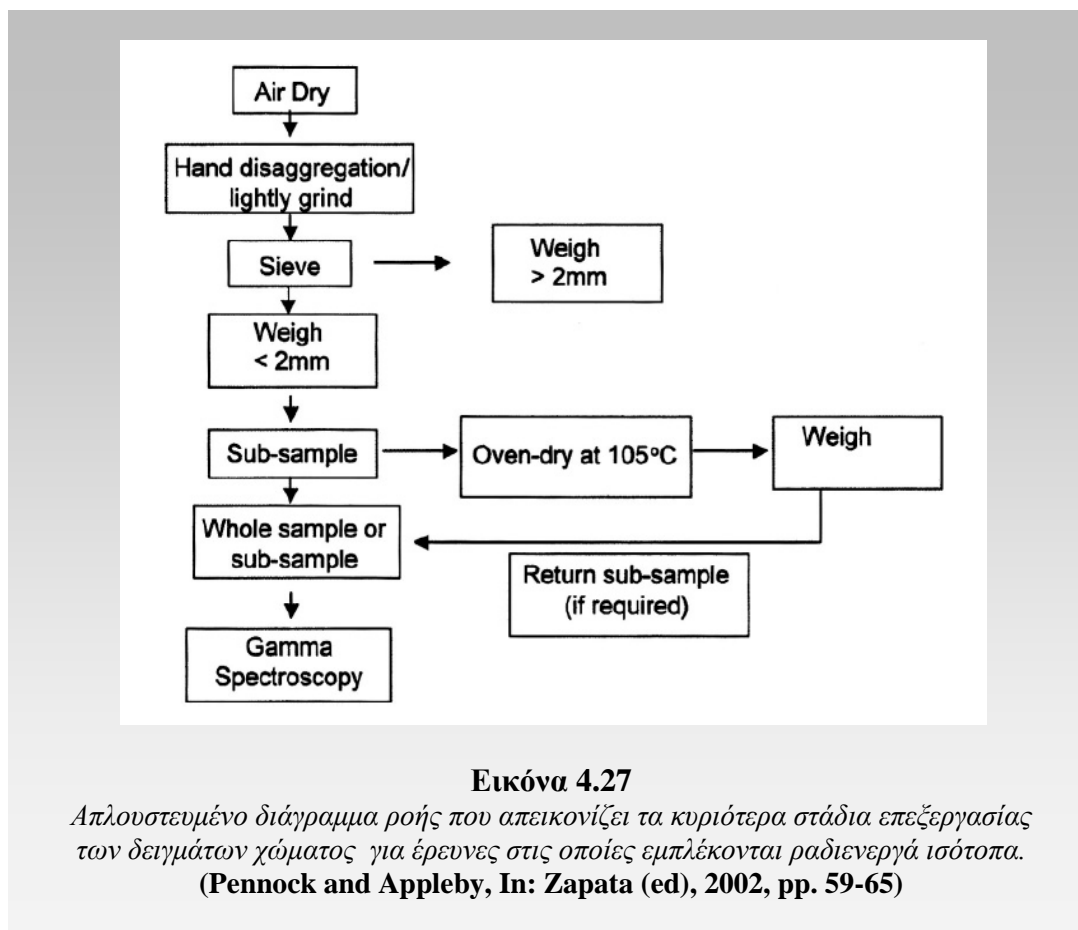
(i) Η διαδικασία της **ξήρανσης** θεωρείται απαραίτητη, ως πρώτο βήμα επεξεργασίας δειγμάτων χώματος, που πρόκειται να υποστούν γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων κάθε ισότοπου γίνεται ανά μονάδα μάζας ξηρού υλικού, ώστε τα δείγματα που συλλέγονται από την ίδια θέση δειγματοληψίας, αλλά κατά διαφορετικά χρονικά διαστήματα, να μπορούν να θεωρηθούν συγκρίσιμα. Παράλληλα, μέσω της ξήρανσης δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες για την προετοιμασία δειγμάτων υψηλότερης ειδικής ραδιενέργειας ανά μονάδα μάζας υλικού, διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό τη γ-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 «αυτοαπορρόφησης», τα οποία επηρεάζονται από τη χημική σύσταση του δείγματος και από το ποσοστό υγρασίας, που περιέχει. Η ξήρανση δειγμάτων χώματος πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (αεροξήρανση), μπορεί όμως να επιτευχθεί και με θέρμανση σε φούρνο. 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: Στο εγχειρίδιο MARLAP, το οποίο εκδίδεται από το US-EPA (United States Protection Agency), προτείνεται η θέρμανση σε φούρνο στους 60 – 110 °C (EPA, 2004). Στο εγχειρίδιο HASL-300, το οποίο εκδίδεται από το US-DOE (United States Department of Energy), προτείνεται θέρμανση σε φούρνο στους 100 °C, για όλη τη νύχτα (DOE, 1997). Ο IAEA προτείνει τη θέρμανση σε φούρνο στους 50 – 105 °C (IAEA, 1989).

(ii) Η διαδικασία του **κοσκινίσματος** αποτελεί μία από τις πλέον συνηθισμένες μεθόδους επεξεργασίας δειγμάτων χώματος. Το κοσκίνισμα του χώματος εφαρμόζεται για πολλούς και διαφορετικούς λόγους. Στην περίπτωση των FRNs, ο σημαντικότερος λόγος είναι ότι το χονδρόκοκκο κλάσμα χώματος, που πιθανότατα αποτελείται από πέτρες και άλλα ξένα υλικά και έχει μικρότερη ειδική επιφάνεια, αναμένεται να παρουσιάζει χαμηλότερη ειδική ραδιενέργεια από το λεπτόκοκκο κλάσμα του χώματος, αλλοιώνοντας έτσι τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

⁽³⁵⁾ Βλ. Παράρτημα Δ.2

⁽³⁶⁾ Βλ. § 4.8

Σύμφωνα με τα πρωτόκολλα που εισήχθησαν από τους Walling and Quine (1993) και Pennock and Appleby (In: Zapata (ed), 2002, pp. 59-65), η προετοιμασία και η επεξεργασία των δειγμάτων χώματος, για μελέτες διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων με χρήση FRNs, περιλαμβάνει τα βήματα που φαίνονται στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 4.27.



Εικόνα 4.27

Απλουστευμένο διάγραμμα ροής που απεικονίζει τα κυριότερα στάδια επεξεργασίας των δειγμάτων χώματος για έρευνες στις οποίες εμπλέκονται ραδιενεργά ισότοπα. (Pennock and Appleby, In: Zapata (ed), 2002, pp. 59-65)

- Καταγράφεται ο όγκος V κάθε δείγματος χώματος.
- Σε κάθε δείγμα χώματος, πραγματοποιείται αεροξήρανση ή ξήρανση σε φούρνο σε θερμοκρασία περίπου 60°C για 48 ώρες.
- Καταγράφεται η συνολική (total) μάζα του ξηρού δείγματος (M_t).
- Αφαιρούνται με το χέρι μεγάλες πέτρες, ρίζες και άλλα ξένα υλικά κι επίσης πραγματοποιείται «ελαφρύ» σπάσιμο με το χέρι ή με γουδί των χοντρών συσσωματωμάτων χώματος. Το χώμα δεν πρέπει να υπόκειται σε μεγάλη τριβή, ώστε να μην προκαλείται θρυμματισμός μεμονωμένων σωματιδίων.
- Το δείγμα κοσκινίζεται, ώστε να διαχωριστούν οι λεπτότεροι κόκκοι του χώματος (διαμέτρων $< 2\text{mm}$) από τα χονδρότερα πετρώδη κομμάτια (διαμέτρων $> 2\text{mm}$) και καταγράφονται οι μάζες τους: $M_{<2AD}$ και $M_{>2AD}$, αντίστοιχα.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται όταν τα δείγματα χώματος περιέχουν μεγάλη ποσότητα λίθων. Στην περίπτωση αυτή, ο διαχωρισμός και η ανάλυση του λεπτόκοκκου κλάσματος (<2mm) είναι δυνατόν να εισάγει μεγάλη αβεβαιότητα στην εκτίμηση της ειδικής ραδιενέργειας των FRNs στο αρχικό δείγμα, και κατά συνέπεια στον υπολογισμό της διάβρωσης του εδάφους, εάν αγνοηθούν η ανομοιογένεια του χώματος και η προσκόλληση μικρών αργιλωδών σωματιδίων στους λίθους. Στην περίπτωση, που η μάζα των λίθων $M_{>2AD}$, αποτελεί ποσοστό μεγαλύτερο από το 5%, της συνολικής μάζας του δείγματος, τότε οι λίθοι πρέπει να ξεπλένονται και το χώμα, που αφαιρείται από αυτούς, πρέπει να προστίθεται στο δείγμα, που θα αναλυθεί.

Επίσης, όσον αφορά στην οργανική ύλη, τα λεπτά οργανικά υλικά (διαμέτρων < 2mm) αναμιγνύονται με τα ανόργανα κατά τη διαδικασία του κοσκινίσματος, ενώ τα οργανικά υλικά διαμέτρων > 2mm είναι κυρίως ρίζες και απορρίμματα, τα οποία αφού δεν μπορούν να διαπεράσουν το κόσκινο, δεν χρησιμοποιούνται περαιτέρω.

- Το άθροισμα των μαζών των δύο κλασμάτων ($M_{<2AD} + M_{>2AD}$) συγκρίνεται με τη συνολική μάζα (M_t) του ξηρού δείγματος. Εάν το σπάσιμο των χοντρών συσσωματωμάτων χώματος έχει γίνει με προσοχή, τότε κάθε απόκλιση στις μάζες οφείλεται μόνο σε αερομεταφερόμενη απώλεια του λεπτόκοκκου κλάσματος. Επομένως, η διορθωμένη μάζα του λεπτόκοκκου κλάσματος μπορεί να υπολογιστεί αφαιρώντας τη μάζα του χονδρόκοκκου κλάσματος από τη συνολική μάζα του ξηρού δείγματος:

$$M_{<2AD} = M_t - M_{>2AD} \quad (4.1)$$

Εικόνα 4.28

Πίνακας με τους συμβολισμούς των φυσικών ιδιοτήτων των δειγμάτων και υπο-δειγμάτων χώματος, που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς των φυσικών μεγεθών στα στάδια επεξεργασίας των δειγμάτων χώματος.

(Pennock and Appleby, In: Zapata (ed), 2002, pp. 59-65)

<i>Symbol</i>	<i>Property</i>	<i>Unit</i>
V	Volume of sample	cm ³
M>2 _{AD}	Air-dry mass of rock fragments (> 2mm)	g
M<2 _{AD}	Air-dry mass of soil (< 2mm)	g
MSS _{AD}	Air-dry mass of sub-sample used for bulk density	g
MSS _{OD}	Oven-dry mass of sub-sample used for bulk density	g
M<2 _{OD}	Oven-dry mass of soil	g
M>2 _{OD}	Oven-dry mass of rock fragments	g
Db<2	Bulk density of soil	g cm ⁻³
Db>2	Bulk density of rock fragments	g cm ⁻³
Vbk>2	Bulk volume of rock fragments	g cm ⁻³
Vbk<2	Bulk volume of soil	g cm ⁻³

- Στη συνέχεια, λαμβάνεται ένα αντιπροσωπευτικό υπο-δείγμα⁽³⁷⁾ του λεπτόκοκκου κλάσματος και, αφού καταγραφεί η μάζα του (MSS_{AD}), ξηραίνεται σε φούρνο στους 105 °C μέχρι η μάζα του να καταστεί σταθερή (MSS_{OD}) και καταγράφεται. Η μάζα του χώματος θεωρείται σταθερή όταν, μέσα σε μία περίοδο 6 ωρών μέσα στον φούρνο, η μάζα του έχει μειωθεί λιγότερο από το 0,1% και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η ξήρανση διαρκεί 2-3 ημέρες.
- Τέλος, υπολογίζονται η σταθμισμένη υγρασία h (gravimetric soil moisture) του χώματος, η μάζα του ξηρού δείγματος ($M_{<2OD}$) και η **φαινόμενη πυκνότητα** $D_{b<2}$ (**bulk density**) του χώματος:

$$h = \frac{MSS_{AD} - MSS_{OD}}{MSS_{OD}} \quad (4.2)$$

$$M_{<2OD} = M_{<2AD} - (M_{<2AD} \cdot h) \quad (4.3)$$

$$\boxed{D_{b<2} = \frac{M_{<2OD}}{V}} \quad (4.4)$$

Στις πετρώδεις περιοχές, όπου ο όγκος των δειγμάτων διαφέρει, απαιτούνται διορθώσεις στον τρόπο υπολογισμού της φαινόμενης πυκνότητας του λεπτόκοκκου κλάσματος (Βλ. Pennock and Appleby, In: Zapata (ed), 2002, pp. 59-65).

⁽³⁷⁾ Το αντιπροσωπευτικό υπο-δείγμα δημιουργείται, γιατί σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαία η ανάλυση ενός υλικού, το οποίο 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 μέθοδος κώνου και υποδιαίρεσης στα τέσσερα “*Coning and quartering*” (η οποία χρησιμοποιείται στη μέθοδο επεξεργασίας δείγματος των Pennock and Appleby, In: Zapata (ed), 2002, pp. 59-65). 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. Τα δύο αντίθετα τέταρτα του κώνου απομακρύνονται, ενώ το υπόλοιπο αναμιγνύεται και διαμορφώνεται ξανά σε κώνο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το υπο-δείγμα να αποκτήσει το επιθυμητό μέγεθος.

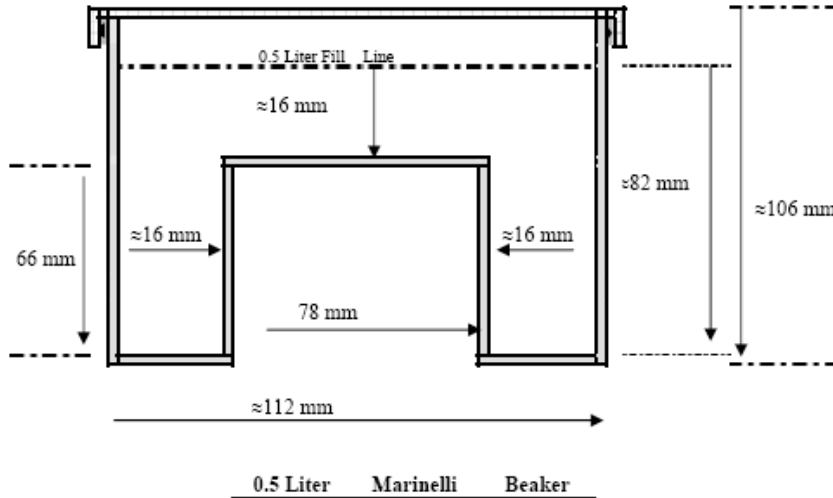
- **Συσκευασία δειγμάτων χώματος για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση**

Για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, λαμβάνεται και συσκευάζεται είτε ολόκληρο το λεπτόκοκκο κλάσμα (οπότε το αντιπροσωπευτικό υπο-δείγμα, που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της φαινόμενης πυκνότητας, επιστρέφεται σε αυτό), είτε ένα αντιπροσωπευτικό υπο-δείγμα του (π.χ. 50-1500g, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη γεωμετρία συσκευασίας).

- Τα δείγματα, που έχουν ληφθεί με βήμα αυξανόμενου βάθους, περιέχουν **μικρή ποσότητα χώματος**, οπότε μπορούν να τοποθετηθούν σε κυλινδρικά δοχεία μικρού όγκου (50-200ml) ή “Petri dishes” (Εικόνα 4.29).
- Τα δείγματα, που έχουν προκύψει από ολική δειγματοληψία «καρότων», περιέχουν **πολύ μεγάλη ποσότητα χώματος** και γι’ αυτό τοποθετούνται σε δοχεία Marinelli των 500-1500ml (Εικόνα 4.30).



Εικόνα 4.29
“Petri dish”:
ρηχό κυλινδρικό δοχείο.



Εικόνα 4.30

Δοχείο Marinelli. Χάρη στο \square σχήμα του, μπορεί να περιβάλλει τον ανιχνευτή.

Πηγή: http://www.ntsincorg.com/m_beakers_dimensions.htm

Η προετοιμασία και προ-επεξεργασία των δειγμάτων χώματος, που περιγράφηκε παραπάνω, είναι ίδια και για τα τρία FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be . Στην περίπτωση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, όμως, μετά την τυπική προ-επεξεργασία των δειγμάτων χώματος, αυτά πρέπει να τοποθετηθούν σε κυλινδρικά δοχεία ή δοχεία Marinelli, να **σφραγιστούν αεροστεγώς** (π.χ. με ταινία PVC ή ρητίνη) και να αποθηκευτούν για τουλάχιστον 21 ημέρες έτσι ώστε να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ του ^{226}Ra ($T_{1/2}=1602$ έτη) και του θυγατρικού του ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,8$ ημέρες). Για να ελαχιστοποιηθεί η διαφυγή ^{222}Rn , χρησιμοποιούνται δοχεία από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας ή από αλουμίνιο, τα οποία σφραγίζονται καλά. Επίσης, ο όγκος του αέρα πάνω από τα δείγματα χώματος θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, ώστε να μην συσσωρευτεί ραδόνιο σ’ αυτόν τον χώρο και αλλάξει η τελική απόδοση της ανίχνευσης των φωτονίων, που ενδιαφέρουν.

4.7 Ραδιομετρικές τεχνικές μέτρησης της ραδιενέργειας των FRNs στο χώμα

- Μέτρηση ραδιενέργειας του ^{137}Cs στο χώμα

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει (§ 2.4.1), οι μετρήσεις ραδιενέργειας του ^{137}Cs στο χώμα λαμβάνονται συνήθως με φασματοσκοπία- γ χρησιμοποιώντας έναν κλασσικό κυλινδρικό ομοαξονικό ανιχνευτή γερμανίου «τύπου p», με εύρος ενεργειών από 40 keV έως 10 MeV και το ^{137}Cs να ανιχνεύεται στα 661,7 keV. Ο χρόνος ανάλυσης πρέπει να είναι επαρκής ώστε να δίνει μια αποδεκτή αναλυτική ακρίβεια μικρότερη από $\pm 10\%$ και με 95% επίπεδο εμπιστοσύνης. Γενικά, για ανιχνευτές ακτινοβολίας- γ με μια 30% σχετική απόδοση, οι απαιτούμενοι χρόνοι ανάλυσης κυμαίνονται από 20000 έως 80000s, ανάλογα με τη ραδιενέργεια του δείγματος και τη γεωμετρία της μέτρησης.

Η ραδιενέργεια του ^{137}Cs μπορεί επίσης να εκτιμηθεί επί τόπου “*in situ*”, μέσα στο πεδίο, χωρίς να απαιτείται η συλλογή δείγματος, χρησιμοποιώντας ένα φορητό γ -φασματογράφο (Εικόνα 4.31). Οι χρόνοι ανάλυσης των επιτόπιων μετρήσεων είναι συνήθως σημαντικά μικρότεροι από αυτούς των εργαστηριακών μετρήσεων, όπως επίσης μικρότερη είναι και η προκαλούμενη διαταραχή του εδάφους. Επιπλέον, μετρώντας μεγαλύτερο όγκο χώματος, τα αποτελέσματα επηρεάζονται λιγότερο από την κύμανση της μικρής κλίμακας δειγματοληψίας. Η ακρίβεια των μετρήσεων της επιτόπιας φασματοσκοπίας- γ εξαρτάται από τη γνώση της κατά βάθος κατανομής του ^{137}Cs στο έδαφος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου της αναμενόμενης κατά βάθος κατανομής του ραδιενεργού ισότοπου στο έδαφος ή με την ερμηνεία του σχήματος του φάσματος- γ (He and Walling, 2000, Benke and Kearfott, 2001, Li et al., 2010).



Εικόνα 4.31

Επιτόπιες γ -μετρήσεις από τα μέλη και το προσωπικό του IAEA κατά τη διάρκεια πειραμάτων πεδίου στη λεκάνη απορροής Mistelbach της Αυστρίας. (Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77)

Είναι επίσης σημαντική η γνώση των ιδιοτήτων εξασθένησης, που παρουσιάζει το έδαφος, οι οποίες εξαρτώνται από τη σύσταση του εδάφους, την περιεκτικότητα σε υγρασία και την πυκνότητα του χώματος, παρόλο που μια τέτοια γνώση είναι πιο σημαντική για ραδιενεργά ισότοπα με γ -ενέργειες χαμηλότερες από 100 keV.

Η χρήση του εδάφους και οι διεργασίες διάβρωσης συχνά οδηγούν σε πολυπλοκότητες όσον αφορά στη συνάρτηση της κατά βάθος κατανομής του υπό μελέτη ραδιενεργού ισότοπου. Η επιτόπια φασματοσκοπία- γ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη μεγάλων περιοχών σε σχετικά μικρό χρόνο, παρόλο που οι προαναφερθέντες παράμετροι θα πρέπει να είναι προσδιορισμένες για να είναι τα αποτελέσματα αξιόπιστα.

Για παράδειγμα, για να αποκτηθεί μια αποδεκτή επί τόπου μέτρηση της ραδιενέργειας του ^{137}Cs ($\pm 6\%$ σφάλμα μέτρησης στο 1σ) στη λεκάνη απορροής Mistelbach στην Αυστρία, όπου η παραμένουσα απόθεση αναφοράς πλησίαζε τα 1900 Bq m^{-2} , απαιτήθηκαν χρόνοι ανάλυσης μόνο 3600 s, συγκρινόμενοι με τα 10000 s στο εργαστήριο (Mabit et al., 2008).

- **Μέτρηση ραδιενέργειας του ^{210}Pb στο χώμα**

- ο Φασματοσκοπία γάμμα

Εφόσον ο ^{210}Pb εκπέμπει φωτόνια μικρής ενέργειας 46,5keV και με μικρό ποσοστό εκπομπής $\sim 4\%$, ένας τυπικός γ -ανιχνευτής, όπως αυτός που συνήθως χρησιμοποιείται για να μετρήσει ^{137}Cs , δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, διότι το χαμηλότερό του εύρος ενέργειας δεν εκτείνεται σε αυτήν την τιμή (§ 2.4.1). Ένας ομοαξονικός «τύπου N» ανιχνευτής με εύρος ενεργειών από 3keV έως 10MeV χρησιμοποιείται γενικά, εάν μετριοούνται και το ^{137}Cs και ο ^{210}Pb .

Ο προσδιορισμός της ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ δεν μπορεί να γίνει άμεσα διότι στα δείγματα χώματος υπάρχει και ο supported ^{210}Pb . Ο ανιχνευτής μετρά τη ραδιενέργεια του συνολικού ^{210}Pb , ενώ η μέτρηση της ραδιενέργειας του supported ^{210}Pb μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μέτρησης της ραδιενέργειας του ^{226}Ra , η οποία είναι ισοδύναμη με τη ραδιενέργεια του supported ^{210}Pb λόγω της ραδιενεργού τους ισορροπίας⁽³⁸⁾. Από την άλλη, η ραδιενέργεια του ^{226}Ra μπορεί να μετρηθεί με γ -φασματοσκοπία μέσω της γ -ακτινοβολίας των θυγατρικών του ^{214}Bi και ^{214}Pb στα 609keV και 351keV, αντίστοιχα⁽³⁹⁾.

Έτσι, έχοντας μετρήσει τη ραδιενέργεια του συνολικού ^{210}Pb καθώς και τη ραδιενέργεια του ^{226}Ra , η ραδιενέργεια του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στα δείγματα χώματος προσδιορίζεται αφαιρώντας το supported ^{210}Pb , που βρίσκεται σε ισορροπία με το ^{226}Ra , από τη συνολική ραδιενέργεια του ^{210}Pb :

$$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra} \quad (4.5)$$

⁽³⁸⁾ Θεωρητικά το ^{226}Ra και ο ^{210}Pb θα έπρεπε να βρίσκονται σε αιώνια ισορροπία, αλλά εξαιτίας της διάχυσης του θυγατρικού ευγενούς αερίου ^{222}Rn , η ισορροπία αυτή μπορεί να διαταραχθεί. Για το λόγο αυτό, τα δείγματα χώματος σφραγίζονται αεροστεγώς και αποθηκεύονται για τουλάχιστον 21 ημέρες έτσι ώστε να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ του ^{226}Ra και του θυγατρικού του ^{222}Rn ($T_{1/2}=3,8$ ημέρες).

⁽³⁹⁾ Η ραδιενέργεια του ^{226}Ra θα μπορούσε να μετρηθεί άμεσα στα 186 keV, αλλά στην περίπτωση αυτή εμπλέκεται και η συνεισφορά του ^{235}U , το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία- γ στην ίδια περιοχή με αυτή του ^{226}Ra , οδηγώντας σε παρεμβολή των ακτίνων γάμμα των δύο ραδιενεργών ισότοπων.

Εάν τα δείγματα χώματος, που αναλύονται, έχουν συλλεχθεί αρκετά χρόνια πριν, πρέπει η προκύπτουσα τιμή του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ να προσαρμοστεί για να διορθωθεί η ραδιενεργός διάσπαση. Αυτή η έμμεση διαδικασία προσδιορισμού της ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ από το συνολικό ^{210}Pb και το ^{226}Ra εισάγει ενδεχόμενα σφάλματα σχετιζόμενα με τη μέτρηση του ^{210}Pb και του ^{226}Ra και έχει ως αποτέλεσμα μικρή ακρίβεια στην τελική εκτίμηση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Η αβεβαιότητα στην εκτίμηση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ μπορεί να είναι υψηλή 30-50%, ειδικά όταν οι συγκεντρώσεις του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ είναι χαμηλές.

Οι επιτόπιες “*in situ*” μετρήσεις ραδιενέργειας $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ χρησιμοποιώντας φορητούς ανιχνευτές-γ είναι πολύ αναξιόπιστες για τη μέτρηση του συνολικού ^{210}Pb , δια μέσου της ακτινοβολίας-γ του στα 46.5 keV (με ποσοστό εκπομπής ~4%), διότι οι ανιχνευτές αυτοί είναι ευαίσθητοι μόνο στη ραδιενέργεια του ^{210}Pb που προέρχεται από το επιφανειακό έδαφος ή τα πρώτα λίγα εκατοστά (<5cm ανάλογα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους). Επομένως, δεν μπορούν να ποσοτικοποιήσουν τη συνολική ραδιενέργεια του ^{210}Pb στο προφίλ του εδάφους (0 - 40 cm). Επίσης, τα φαινόμενα αυτοαπορρόφησης εισάγουν επιπλέον προβλήματα.

ο Εναλλακτικές μέθοδοι προσδιορισμού του συνολικού ^{210}Pb

Άλλες μέθοδοι προσδιορισμού του συνολικού ^{210}Pb , είναι: η φασματοσκοπία-α (§ 2.4.2), την καταμέτρηση σωματιδίων-β (§ 2.4.3), τη φασματοσκοπία του υγρού σπινθηρισμού (§ 2.4.4) και τη φασματοσκοπία μάζας πλάσματος (§ 2.4.5), οι οποίες είναι πιο ευαίσθητες και μπορούν να παρέχουν βελτιωμένη αναλυτική ακρίβεια. Εντούτοις, είναι επίπονες και δαπανηρές, με αποτέλεσμα να μην συνηθίζεται η χρήση τους για μετρήσεις ^{210}Pb σε δείγματα χώματος που προορίζονται για μελέτες της διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων.

● **Μέτρηση ραδιενέργειας του ^7Be στο χώμα**

Η ραδιενέργεια του ^7Be μπορεί να προσδιοριστεί με φασματοσκοπία-γ, όπως γίνεται και στην περίπτωση του ^{137}Cs , χρησιμοποιώντας έναν κυλινδρικό ομοαξονικό ανιχνευτή HPGc «τύπου p» και μετρώντας τις καταμετρήσεις στα 477,6 keV με ποσοστό εκπομπής 10,3% (βλ. §2.4.1). Όμως, η ανίχνευση του ^7Be , συγκρινόμενη με αυτή του ^{137}Cs , παρουσιάζει μεγαλύτερα επίπεδα αβεβαιότητας και όρια ανίχνευσης για τις ίδιες συνθήκες καταμέτρησης. Οι διαβρωμένες τοποθεσίες με χαμηλή ειδική ραδιενέργεια αποφέρουν ακόμα μεγαλύτερες αβεβαιότητες στην καταμέτρηση, με αποτέλεσμα η συνολική αβεβαιότητα συχνά να ξεπερνά το 10%.

Επιπλέον, επειδή το ^7Be έχει μικρό χρόνο υποδιπλασιασμού (53,3 ημέρες), πρέπει να υπολογίζεται η ραδιενεργός διάσπασή του κατά το χρονικό διάστημα, που μεσολαβεί από τη συλλογή των δειγμάτων χώματος έως την καταμέτρηση της ραδιενέργειάς του. Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων χώματος θα πρέπει να ξεκινά όσο το δυνατό συντομότερα όχι μόνο λόγω του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού του, αλλά και λόγω της πιθανής χαμηλής ραδιενέργειάς του στο νερό της βροχής και το χώμα, που εξαρτάται από τη θέση της υπό μελέτη τοποθεσίας και τις κλιματικές παραμέτρους. Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην επιλογή του μεγέθους του δείγματος ώστε να επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση του αριθμού των καταμετρήσεων (Komura et al., 2007).

Η διαδικασία των επιτόπιων (“*in situ*”) μετρήσεων θα μπορούσε να είναι πιο αποτελεσματική για την περίπτωση του ^7Be . Παρόλα αυτά, οι λιγότερες μελέτες, που επιχειρήθηκαν, υπέδειξαν ότι οι χρόνοι ανάλυσης πρέπει να είναι τουλάχιστο διπλάσιοι απ’ αυτούς που απαιτούνται για το ^{137}Cs και αυτό αποτελεί ένα σημαντικό περιορισμό (Mabit et al., 2008).

4.8 Κατακόρυφες κατανομές και παραμένουσες αποθέσεις των FRNs στο έδαφος

Η εφαρμογή των ραδιομετρικών τεχνικών, με κυριότερη τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση όσον αφορά στα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , παρέχει μετρήσεις της ειδικής ραδιενέργειας (Bq kg^{-1}) τους στα δείγματα του χώματος. Η παρουσίαση και η ερμηνεία των μετρήσεων διευκολύνεται μέσω γραφικών παραστάσεων της ειδικής ραδιενέργειας (Bq kg^{-1}) κάθε ραδιενεργού ισότοπου συναρτήσει του βάθους (m) από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτές οι γραφικές παραστάσεις αποτελούν τις κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) των τριών ραδιενεργών ισότοπων στο έδαφος.

Η μετρούμενη ειδική ραδιενέργεια (Bq kg^{-1}) των ραδιενεργών ισότοπων των δειγμάτων χώματος μετατρέπεται σε συνολική παραμένουσα απόθεση A (Bq m^{-2}), χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n C_i \cdot BD_i \cdot DI_i \quad (4.6)$$

όπου

- i : ο αριθμός του δείγματος χώματος της κατά βάθος δειγματοληψίας (η αρίθμηση αρχίζει από την επιφάνεια του εδάφους και συνεχίζει κατακόρυφα προς τα κάτω)
- n : ο αριθμός του δείγματος χώματος στο μέγιστο βάθος με ανιχνεύσιμη ειδική ραδιενέργεια
- C_i : η ειδική ραδιενέργεια του υπό μελέτη ραδιενεργού ισότοπου στο δείγμα χώματος i (Bq kg^{-1})
- BD_i : η φαινόμενη πυκνότητα (Bulk Density) του δείγματος i (kg m^{-3})
- DI_i : το μήκος του βήματος (Depth Increment) για το δείγμα i (m)

Πολλές φορές, στις κατακόρυφες κατανομές της ειδικής ραδιενέργειας των παραπάνω ισότοπων, αντί του γραμμικού βάθους (linear depth) (m), χρησιμοποιείται το κατά μάζα βάθος z_i (mass depth) (kg m^{-2}), το οποίο υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το μήκος του βήματος DI_i (m) της κατά βάθος δειγματοληψίας επί τη φαινόμενη πυκνότητα BD_i (bulk density) (kg m^{-3}) του αντίστοιχου δείγματος χώματος:

$$z_i = DI_i \cdot BD_i \quad (4.7)$$

Με αυτόν τον τρόπο *περιορίζεται η επίδραση των μεταβολών της φαινόμενης πυκνότητας του χώματος, οι οποίες μπορεί να συμβαίνουν εξαιτίας πιθανής συμπίεσης του χώματος κατά τη διείσδυση του κυλινδρικού δειγματολήπτη στο έδαφος*. Για το λόγο αυτό, στις κατακόρυφες κατανομές των ραδιενεργών ισοτόπων, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται το κατά μάζα βάθος (kg m^{-2}) αντί του βάθους (m) (Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 105-124). Πάντως, στη βιβλιογραφία, συναντάμε δύο τρόπους παρουσίασης των κατακόρυφων κατανομών του ^7Be : (i) ^7Be mass activity concentration (Bq kg^{-1}) vs. depth (m) και (ii) ^7Be areal activity density (Bq m^{-2}) vs. depth (m).

Η συνολική παραμένουσα απόθεση A (Bq m^{-2}) του υπό μελέτη ραδιενεργού ισοτόπου προκύπτει ολοκληρώνοντας την ειδική ραδιενέργειά του $C(z)$ (Bq kg^{-1}) σε όλο το κατά μάζα βάθος z (kg m^{-2}):

$$A = \int_0^{\infty} C(z) \cdot dz \quad (4.8)$$

4.8.1 Συγκριτική περιγραφή κι ερμηνεία των κατακόρυφων κατανομών στο έδαφος και της παραμένουσας απόθεσης των FRNs

Οι διαφορετικοί χρόνοι υποδιπλασιασμού των τριών ραδιενεργών ισοτόπων και οι διαφορετικές χρονικές κατανομές της εναπόθεσής τους στο έδαφος από την ατμόσφαιρα έχουν ως συνέπεια οι παραμένουσες αποθέσεις τους να παρουσιάζουν διαφορετική χρονική συμπεριφορά.

Στην περίπτωση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ($T_{1/2} = 22,3$ έτη), η σταθερή εναπόθεσή του στο έδαφος σημαίνει ότι και η παραμένουσα απόθεση ενός αδιατάρακτου εδάφους, που δεν επηρεάζεται από διάβρωση ή απόθεση ιζημάτων, θα παραμένει σταθερή σε κατάσταση ισορροπίας, με την απώλεια λόγω ραδιενεργού διάσπασης να αντισταθμίζεται από τις νέες εναποθέσεις.

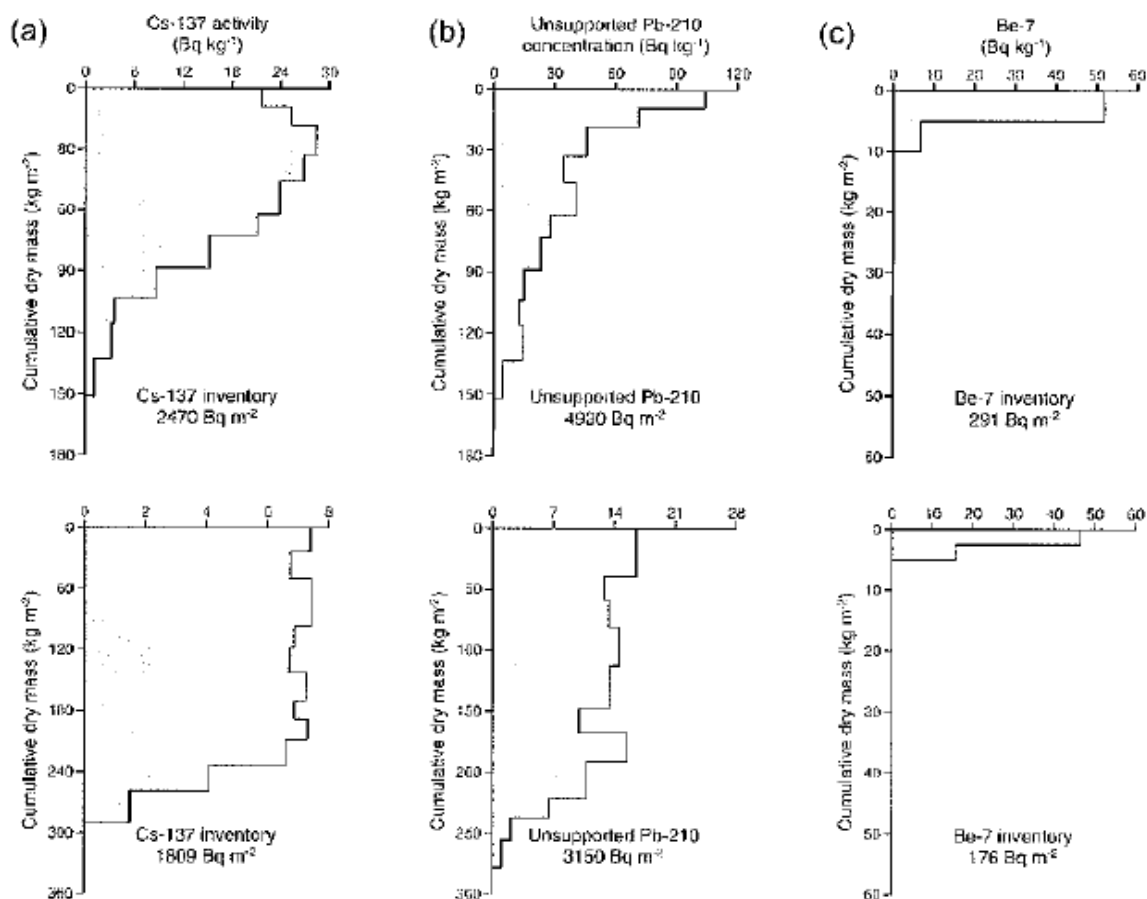
Αντίθετα, στην περίπτωση του ^{137}Cs , η παραμένουσα απόθεση ενός αδιατάρακτου εδάφους θα είναι μηδενική πριν από την έναρξη της εναπόθεσής του στα μέσα της δεκαετίας του '50. Στη συνέχεια θα αυξάνεται μέχρι τα μέσα ή τα τέλη της δεκαετίας του '60, που είναι και η περίοδος της κύριας εισαγωγής του στην ατμόσφαιρα και της συνεπαγόμενης εναπόθεσής του στο έδαφος. Σε τοποθεσίες, που επηρεάστηκαν από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl το έτος 1986, θα υπάρχει επίσης επιπρόσθετη εναπόθεση ^{137}Cs στο έδαφός τους. Μετέπειτα, η παραμένουσα απόθεσή του σε θα μειώνεται αφού ο ρυθμός της ραδιενεργού του διάσπασης ξεπερνά το ρυθμό αναπλήρωσής του από νέες εναποθέσεις. Παρόλα αυτά, λόγω του σχετικά μεγάλου χρόνου υποδιπλασιασμού του (30,2 έτη), σημαντικές ποσότητες ^{137}Cs θα παραμένουν ακόμη και 40 χρόνια μετά από την περίοδο της κύριας εναπόθεσής του.

Ως αποτέλεσμα του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού του (53,2 ημέρες), η παραμένουσα απόθεση του ^7Be ενός αδιατάρακτου εδάφους παρουσιάζει σημαντική βραχυχρόνια κύμανση. Κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων, η παραμένουσα απόθεση μειώνεται ραγδαία λόγω ραδιενεργού διάσπασης και αυξάνεται κατά τη διάρκεια περιόδων βροχοπτώσεων λόγω της σχετιζόμενης υγρής εναπόθεσης.

Με βάση τα παραπάνω, και παρατηρώντας τις τυπικές κατακόρυφες κατανομές των ειδικών ραδιενεργειών των ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , που απεικονίζονται *συγκεντρωτικά* στις Εικόνες 4.32 και 4.34 και περιλαμβάνουν διαφορετικές περιπτώσεις εδαφών (αδιατάρακτα,

καλλιεργούμενα, διαβρωμένα ή εδάφη που έχουν υποστεί απόθεση ιζημάτων), επισημαίνουμε τα εξής:

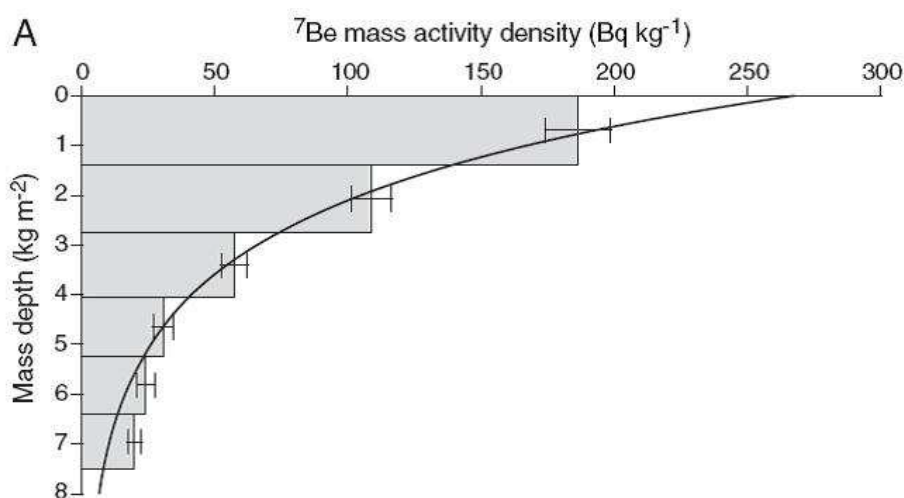
- Σε **αδιατάρακτα εδάφη** (Εικόνα 4.32 πάνω), τα παραπάνω ραδιενεργά ισότοπα είναι συγκεντρωμένα στην επιφάνεια του εδάφους, με το 90% της συνολικής παραμένουσας απόθεσης των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ να απαντάται στα ανώτερα 15cm του εδάφους και τις συγκεντρώσεις τους να παρουσιάζουν μια εκθετική μείωση με το βάθος⁽⁴⁰⁾. Παρόλο που η εναπόθεση των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ γίνεται στην επιφάνεια του εδάφους από την ατμόσφαιρα, η ύπαρξη αυτών των ραδιενεργών ισωτόπων σε βάθη 0-30cm αντικατοπτρίζει την κατακόρυφη προς τα κάτω διάχυση και μετανάστευσή τους. Οι μικροδιαφορές, που παρατηρούνται στις κατακόρυφες κατανομές των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, οφείλονται, κατά κύριο λόγο, στη διαφορετική χρονική μορφή της εναπόθεσής τους στο έδαφος από την ατμόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα, η εναπόθεση του ^{137}Cs ουσιαστικά σταμάτησε στη δεκαετία του '80 χωρίς να αναπληρώνεται από εκείνη την περίοδο και μετά, οπότε η μέγιστη συγκέντρωσή του απαντάται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Αντίθετα, στην περίπτωση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ η εναπόθεση είναι συνεχής και η μέγιστη συγκέντρωσή του βρίσκεται στην επιφάνεια, όπως είναι αναμενόμενο.



Εικόνα 4.32 Τυπικές κατανομές των ισωτόπων ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be σε αδιατάρακτα (πάνω) και σε καλλιεργούμενα εδάφη (κάτω), κοντά στο Devon, UK. (Walling, 2003)

⁽⁴⁰⁾ Για την περίπτωση του ^{137}Cs , η θεωρία αυτή βασίζεται στο ότι η επίπτωση από το Chernobyl μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σχέση με την επίπτωση εξαιτίας των πυρηνικών δοκιμών.

Σε αδιατάρακτα εδάφη (Εικόνα 4.32 πάνω), η κατακόρυφη κατανομή του ^7Be διαφέρει σημαντικά από αυτή των άλλων δύο ραδιενεργών ισοτόπων, ως άμεση απόρροια του πολύ μικρότερου χρόνου υποδιπλασιασμού του. Το ^7Be απαντάται μόνο στην επιφάνεια του εδάφους ή πολύ κοντά σ' αυτήν, όπου η εναπόθεσή του αναπληρώνεται συνεχώς, και σύντομα εξαφανίζεται λόγω της γρήγορης ραδιενεργού του διάσπασης, ενώ στο ίδιο χρονικό διάστημα τα άλλα δύο ραδιενεργά ισότοπα κινούνται προς τα κάτω μέσα στο προφίλ του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρουμε ότι οι σημαντικές συγκεντρώσεις του ^7Be περιορίζονται σε βάθος περίπου 2cm και η ειδική ραδιενέργειά του μειώνεται απότομα και εκθετικά με το βάθος (Βλ. § 4.9.4 στ). Η εκθετική μορφή της κατακόρυφης κατανομής του (Εικόνα 4.33) έχει επιβεβαιωθεί από πολυάριθμες μελέτες σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου (π.χ. Schuller et al., 2006, Sepulveda et al., 2008, Lohaiza et al., 2014).



Εικόνα 4.33

Εκθετική μορφή τυπικής κατακόρυφης κατανομής του ^7Be σε σταθερό αδιατάρακτο έδαφος, σε τοποθεσία της Χιλής. (Schuller et al., 2006)

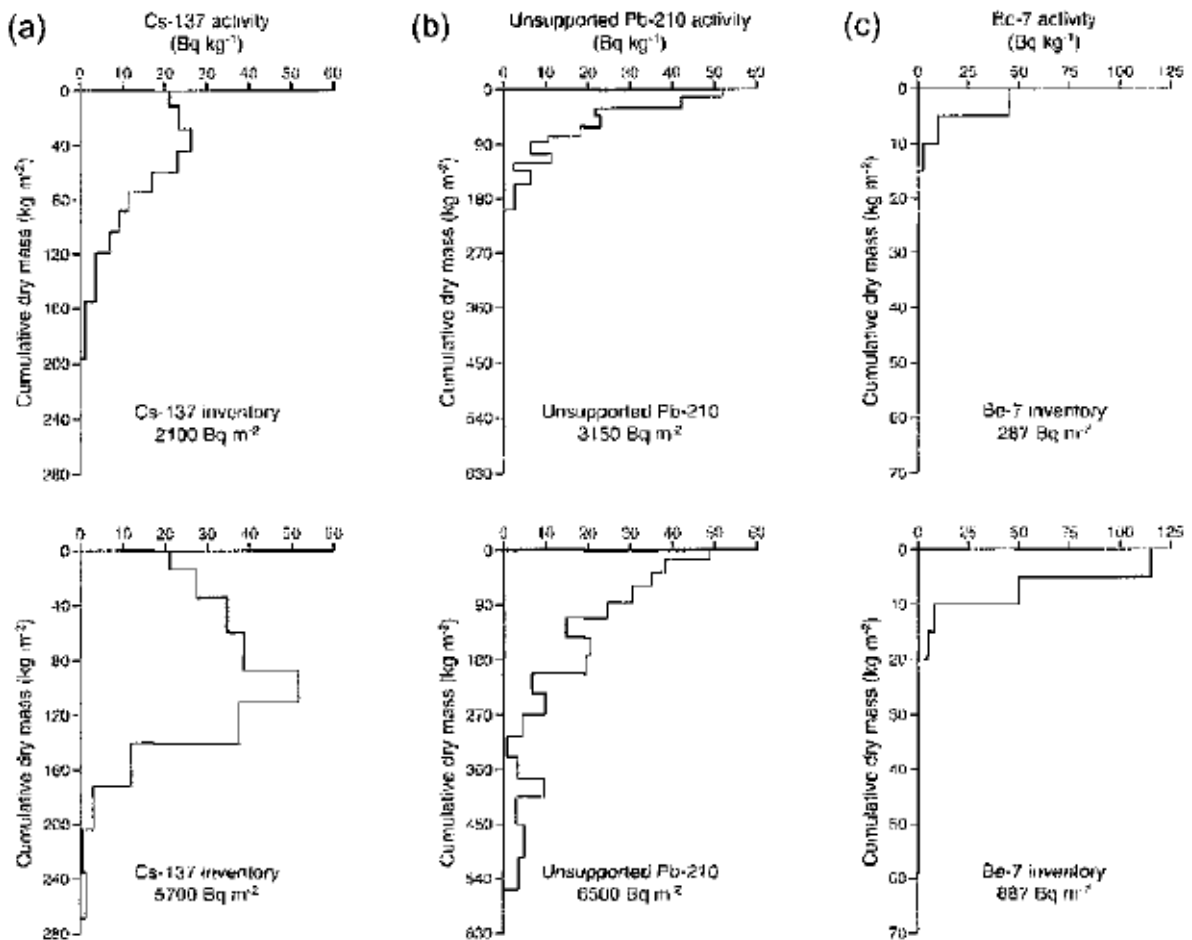
- Σε **καλλιεργούμενα εδάφη** (Εικόνα 4.32 κάτω), οι ειδικές ραδιενέργειες των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ είναι, όπως αναμένεται, σχεδόν ομοιόμορφες μέσα στο στρώμα του οργώματος, το οποίο εκτείνεται σε βάθος 25cm περίπου, λόγω της ανάμιξης του χώματος από τις πρακτικές της καλλιέργειας.

Παρατηρούμε ότι οι παραμένουσες αποθέσεις των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ των καλλιεργούμενων εδαφών (Εικόνα 4.32 κάτω) είναι μικρότερες από αυτές των γειτονικών αδιατάρακτων τοποθεσιών, γεγονός που υποδεικνύει ότι έχει συμβεί απομάκρυνση χώματος, δηλαδή ότι τα εδάφη αυτά έχουν υποστεί διάβρωση.

Σε καλλιεργούμενα εδάφη (Εικόνα 4.32 κάτω), η συμπεριφορά του ^7Be αντικατοπτρίζει και πάλι τον μικρό χρόνο υποδιπλασιασμού του, εξαιτίας του οποίου η παραμένουσα απόθεση παραμένει συνεχώς χαμηλή και, όταν το έδαφος καλλιεργείται, η ανάμιξη του μέσα στο στρώμα της καλλιέργειας προκαλεί, σε συνδυασμό με τη γρήγορη

ραδιενεργό του διάσπαση, ραγδαία μείωση της ειδικής του ραδιενέργειας, η οποία σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να βρίσκεται κάτω από το όριο ανίχνευσης. Ως αποτέλεσμα, η παρουσία του ^7Be περιορίζεται σε ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα του εδάφους λόγω των νέων εναποθέσεων του στο έδαφος από την ατμόσφαιρα. Η παραμένουσα απόθεση του ^7Be στα καλλιεργούμενα εδάφη είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή των γειτονικών αδιατάρακτων τοποθεσιών, υποδηλώνοντας τη διάβρωση που έχει συμβεί καθώς και τη μείωση του βάθους, στο οποίο απαντάται.

- Σε τοποθεσίες, στις οποίες συμβαίνει **απόθεση ιζημάτων**, παρατηρείται όχι μόνο αύξηση του βάθους, στο οποίο βρίσκονται τα ραδιενεργά ισότοπα ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , αλλά και της παραμένουσας απόθεσης αυτών. Αυτή η κατάσταση απεικονίζεται στην Εικόνα 4.34 κάτω, η οποία συγκρίνει τις κατακόρυφες κατανομές των τριών ραδιενεργών ισωτόπων σε κοίτες πλημμυρών ποταμού με αυτές γειτονικών αδιατάρακτων τοποθεσιών, που βρίσκονται πάνω από το επίπεδο των νερών των πλημμυρών.

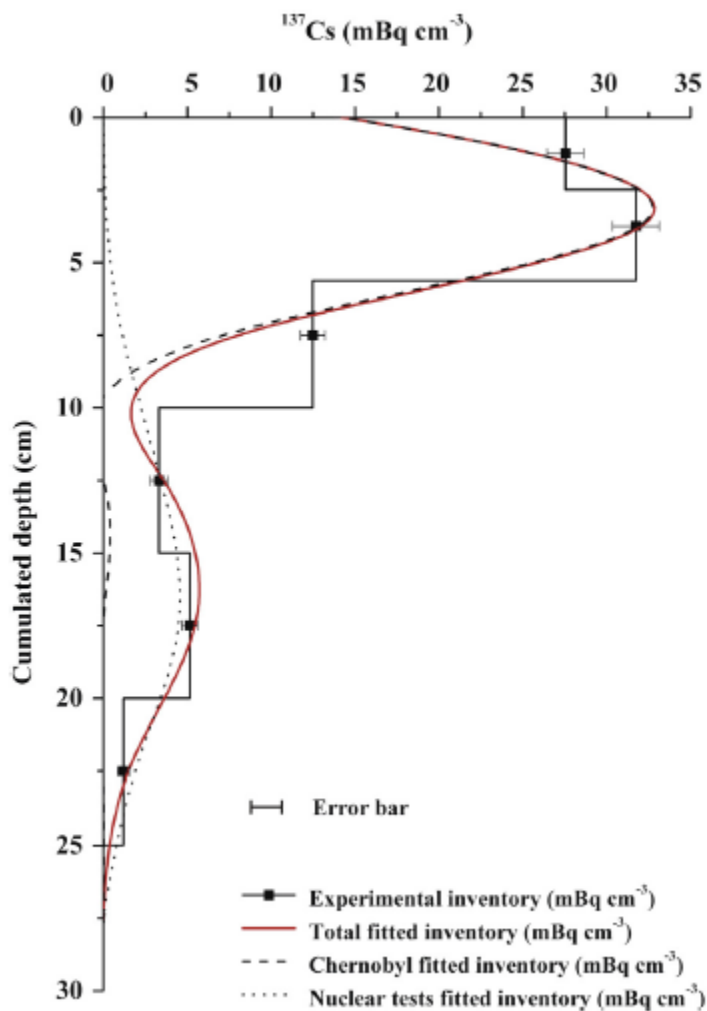


Εικόνα 4.34

Τυπικές κατανομές των ισωτόπων ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be σε κοίτες πλημμυρών ποταμού στο Devon, UK, όπου συμβαίνει απόθεση ιζημάτων (κάτω), και σε εδάφη γειτονικών αδιατάρακτων τοποθεσιών, που βρίσκονται πάνω από το επίπεδο των νερών των πλημμυρών (πάνω).

(Walling, 2003)

Στην περίπτωση του ^{137}Cs , οι κατακόρυφες κατανομές του, τόσο σε αδιατάρακτες τοποθεσίες όσο και σε τοποθεσίες απόθεσης ιζημάτων, δείχνουν την προοδευτική συσσώρευσή του, με τη μέγιστη ειδική ραδιενέργεια να παρατηρείται σε επίπεδο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το μέγιστο αυτό, το οποίο είναι περισσότερο εμφανές στην τοποθεσία που υφίσταται απόθεση ιζημάτων, αντιπροσωπεύει το επιφανειακό επίπεδο στα μέσα της δεκαετίας του '60. Σε τοποθεσίες που επηρεάστηκαν από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl, διακρίνεται, επίσης, κι ένα δεύτερο μέγιστο, το οποίο αντιπροσωπεύει το επιφανειακό επίπεδο κατά το έτος 1986 (Εικόνα 4.35). Η μείωση της ειδικής ραδιενέργειας του ^{137}Cs προς την επιφάνεια του εδάφους είναι απόρροια της μειωμένης εναπόθεσής του από την ατμόσφαιρα μετά τα μέσα της δεκαετία του '60 καθώς και της ραδιενεργού του διάσπασης.



Εικόνα 4.35

Κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs σε αδιατάρακτη τοποθεσία αναφοράς, που επηρεάστηκε από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl, σε πεδιάδα της Τρανσυλβανίας στη Ρουμανία. Είναι φανερό ότι το προερχόμενο από το Chernobyl ^{137}Cs είναι επικρατέστερο απ' αυτό που προέρχεται από τις πυρηνικές δοκιμές (αναλογία 4:1). Η κατά βάθος δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε το Νοέμβριο 2010 χρησιμοποιώντας κυλίνδρους από ασάλι εσωτερικής διαμέτρου 5,5cm. Για την κατακόρυφη κατανομή, τα δείγματα χόματος τεμαχίστηκαν σε τμήματα των 2,5 ή 5cm. (Iurian et al., 2014)

Οι κατακόρυφες κατανομές του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε τοποθεσίες απόθεσης ιζημάτων διαφέρουν και πάλι από αυτές του ^{137}Cs (Εικόνα 4.34), λόγω της συνεχούς εναπόθεσής του στο έδαφος από την ατμόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουν μια πιο βαθμιαία εκθετική μείωση με το βάθος, με το προφίλ του στην τοποθεσία απόθεσης ιζημάτων να εκτείνεται σε πολύ μεγαλύτερο βάθος σε σχέση με αυτό της γειτονικής αδιατάρακτης τοποθεσίας πάνω από το επίπεδο των νερών των πλημμυρών.

Στην περίπτωση του ^7Be , οι κατακόρυφες κατανομές θα αντικατοπτρίσουν μόνο πολύ πρόσφατη συσσώρευση ιζημάτων λόγω πλημμυρών (Εικόνα 4.34). Εάν δεν έχει συμβεί απόθεση ιζημάτων μέσα στους τελευταίους 6 μήνες, το πιο πιθανό είναι να μην εμφανίζεται διαφορά ανάμεσα στα προφίλ των δύο τοποθεσιών. Η επίδραση της απόθεσης ιζημάτων πέραν της σύντομης αυτής χρονικής περιόδου στην παραμένουσα απόθεση του ^7Be θα είναι αμελητέα, εξαιτίας της γρήγορης ραδιενεργού του διάσπασης, με αποτέλεσμα και τα δύο προφίλ του να απεικονίζουν απλά την εναπόθεσή του στην επιφάνεια του εδάφους από την ατμόσφαιρα. Επισημαίνουμε ότι το προφίλ του ^7Be στην κοίτη πλημμυρών ποταμού, στην Εικόνα 4.34, απεικονίζει την κατακόρυφη κατανομή της ειδικής του ραδιενέργειας, η οποία μετρήθηκε *αμέσως μετά* από μια μεγάλη πλημμύρα, που προκάλεσε σημαντική απόθεση ιζημάτων. Η απόθεση ιζημάτων γίνεται εμφανής τόσο από την αύξηση της παραμένουσας απόθεσης του ^7Be όσο και το μεγαλύτερο βάθος, στο οποίο βρίσκεται.

Σύμφωνα με αυτά που αναλύσαμε παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

Η διακριτή συμπεριφορά των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be αποτελεί τη βάση για τη χρήση των ραδιενεργών αυτών ισοτόπων σε έρευνες διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων. Συγκεκριμένα, η χρήση του ^{137}Cs , με χρόνο υποδιπλασιασμού 30,2 έτη, παρέχει τη δυνατότητα να μελετηθεί η διάβρωση του εδάφους και η απόθεση ιζημάτων, που έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια **50 περίπου ετών**⁽⁴¹⁾ μετά από την περίοδο της σημαντικής εναπόθεσής του στο έδαφος από την ατμόσφαιρα. Η χρήση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, με χρόνο υποδιπλασιασμού 22,3 έτη και συνεχή εναπόθεση στο έδαφος, παρέχει τη δυνατότητα τέτοιων μελετών για χρονικές περιόδους που εκτείνονται στα προηγούμενα **100 περίπου έτη**, δηλαδή για χρονική περίοδο 4-5 χρόνων υποδιπλασιασμού του. Τέλος, η χρήση του ^7Be , με χρόνο υποδιπλασιασμού 53,2 ημέρες και συνεχή εναπόθεση στο έδαφος, μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο για **μεμονωμένα περιστατικά**, όταν δεν έχει συμβεί διάβρωση ή απόθεση ιζημάτων κατά τους προηγούμενους 6 περίπου μήνες.

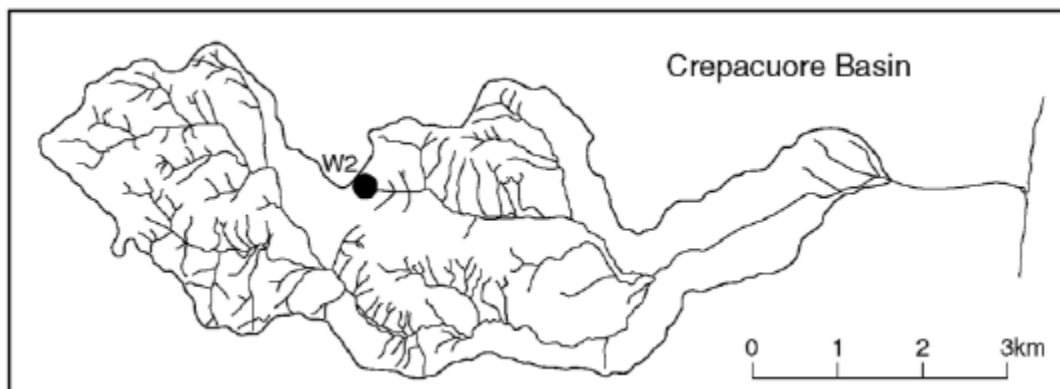
⁽⁴¹⁾ Παρόλο που δεν είναι πολύ διαδεδομένη, υπάρχει μια μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί το ^{137}Cs για να παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης των ρυθμών ανακατανομής του χρώματος για συγκεκριμένες μικρότερες χρονικές περιόδους. Η μέθοδος (*re-sampling technique*) εφαρμόζεται συλλέγοντας δείγματα χρώματος από τα ίδια σημεία δειγματοληψίας κατά τη διάρκεια εκστρατειών, οι οποίες πρέπει να απέχουν μεταξύ τους χρονικά τουλάχιστον 10 έτη προκειμένου να υπάρχει σημαντική ανιχνεύσιμη διαφορά στις παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs που προκύπτουν από τις εκστρατείες (Loughran and Balog, 2006, Porto et al., 2014). Πάντως, η τυπική τεχνική του ^{137}Cs (καθώς και των άλλων δύο FRNs: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be), που εφαρμόζεται ευρέως, βασίζεται στη μέθοδο της σύγκρισης της μετρούμενης παραμένουσας απόθεσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων με την παραμένουσα απόθεση αναφοράς.

4.8.2 Μελέτες περιπτώσεων κατακόρυφων κατανομών στο έδαφος και παραμένουσας απόθεσης των FRNs

Ακολουθούν μερικά ενδεικτικά παραδείγματα κατακόρυφων κατανομών στο έδαφος των ραδιενεργών ισοτόπων ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , τα οποία έχουν προκύψει από τις κατά βάθος δειγματοληψίες, που διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια σχετικών ερευνητικών μελετών. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι κατακόρυφες κατανομές των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος μπορούν να ερμηνευθούν με βάση το περιεχόμενο του παραπάνω σχολιασμού.

- Χρήση της τεχνικής του ^{137}Cs για τη μελέτη της διάβρωσης σε μικρή λεκάνη απορροής

Επειδή υπάρχουν μετρήσεις της ποσότητας των εξερχόμενων ιζημάτων στις εκβολές W₂ (Εικόνα 4.36) της υπό μελέτη λεκάνης απορροής στη Νότια Ιταλία, επιχειρείται η αξιολόγηση της τεχνικής του ^{137}Cs , συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής με τα υπάρχοντα δεδομένα των μετρήσεων (Porto et al., 2001).



Εικόνα 4.36

*Η υπό μελέτη λεκάνη απορροής στη Νότια Ιταλία.
(Porto et al., 2001)*

Τοποθεσία: Calabria, **Νότια Ιταλία.**

Περιοχή έρευνας: **Μικρή λεκάνη απορροής.**

Έκταση: **1,38 ha.**

Κλίση: 12-69%.

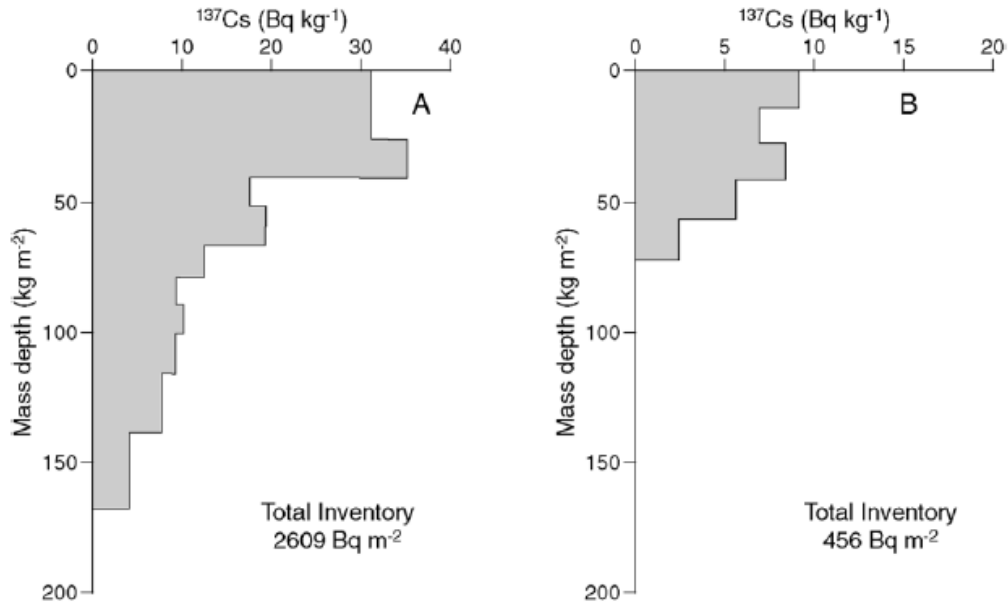
Υψόμετρο: 85-128m a.s.l.

Μέση ετήσια βροχόπτωση: 670mm
(περισσότερη από την οποία συμβαίνει από τον
Οκτώβριο έως τον Μάρτιο).

Κλίμα: Τυπικό Μεσογειακό.

Υφή εδάφους: 86% Ιλύς + Αργίλος.

*Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε κατά τα έτη 1998 και 1999. Η κατά βάθος δειγματοληψία έγινε με χρήση ελάσματος απόξεσης "scraper plate", με βήμα που κυμαίνεται από **1-4 cm**.*



Εικόνα 4.37

Κατά βάθος κατανομές και παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs (α) στην αδιατάρακτη τοποθεσία αναφοράς (αριστερά) και (β) σε τοποθεσία που υφίσταται διάβρωση μέσα στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής (δεξιά). (Porto et al., 2001)

- Χρήση της τεχνικής του ^{137}Cs για τη μελέτη της χωρικής μορφής της διάβρωσης σε αναχώματα με αναβαθμίδες

Προκειμένου να μελετηθεί η χωρική μορφή της διάβρωσης της υπό μελέτη περιοχής (Εικόνα 4.38), συλλέχθηκε ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων χώματος (Zhang et al., 2014).



Εικόνα 4.38

Άποψη της υπό μελέτη περιοχής στη Βόρεια Κίνα. (Zhang et al., 2014)

Τοποθεσία: Βουνά Yimeng, **Βόρεια Κίνα**, (~ 34-36° S, 117-119° E).

Περιοχή μελέτης: **Σύστημα 7 αναβαθμίδων**, κατασκευασμένων από το 1952 (πριν από την απελευθέρωση ^{137}Cs στο περιβάλλον).

Εκταση: **18 km²** (=1800 ha).

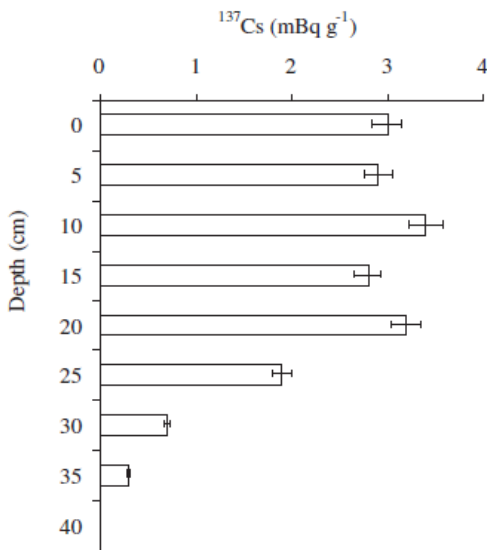
Μέση Κλίση: 12°.

Υψόμετρο: 156-166 m a.s.l.

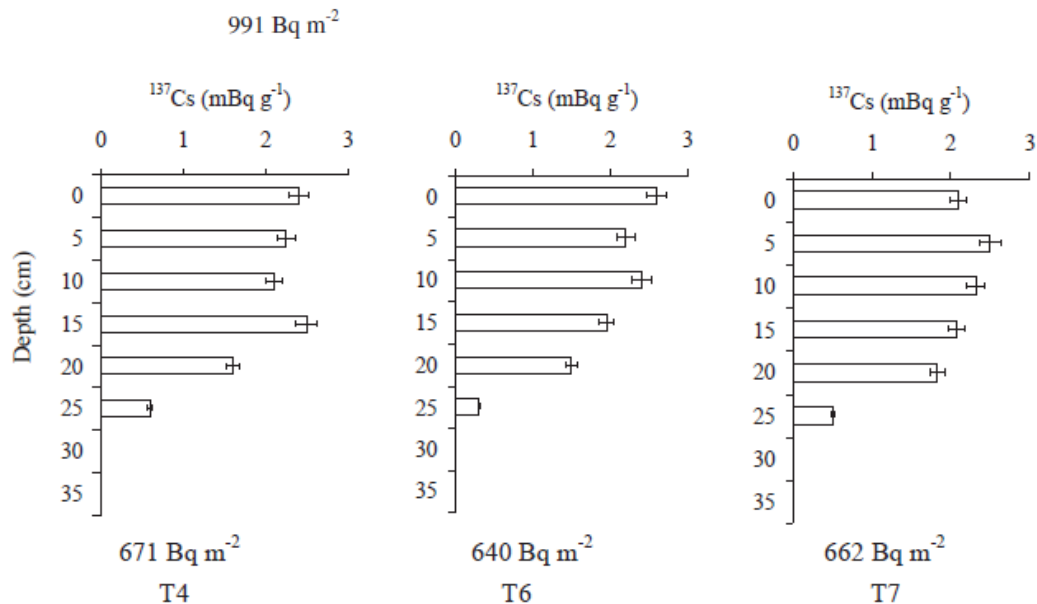
Μέση ετήσια βροχόπτωση: 800-900 mm (70% Ιούλ.-Σεπτ.).

Μέση ετήσια θερμοκρασία: 13,6°C.

Κλίμα: Ηπειρωτικό με μουσόνες στη θερμή εύκρατη ζώνη.



Πραγματοποιήθηκε ολική δειγματοληψία (μέχρι το βάθος των 30cm περίπου), χρησιμοποιώντας χειροκίνητο κρουστικό κυλινδρικό δειγματολήπτη (διαμέτρου 5cm), καθώς και κατά βάθος δειγματοληψία (μέχρι το βάθος των 40cm περίπου), χρησιμοποιώντας κυλινδρικό πυρήνα από ασάλι (διαμέτρου 10cm). Για τις κατά βάθος κατανομές, τα δείγματα χώματος τεμαχίστηκαν σε τμήματα των 5 cm.

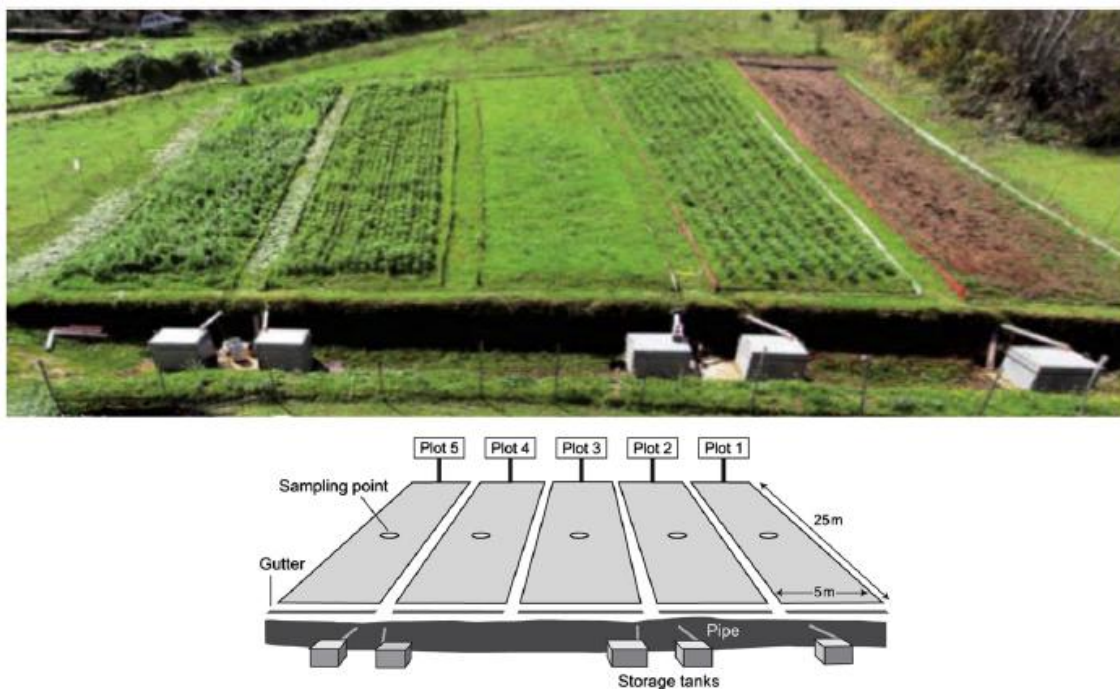


Εικόνα 4.39

Κατακόρυφες κατανομές και παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs (α) στην τοποθεσία αναφοράς (πάνω) και (β) σε μερικές αναβαθμίδες της υπό μελέτη τοποθεσίας (κάτω), οι οποίες έχουν υποστεί διάβρωση. (Zhang et al., 2014)

- Συνδυασμένη χρήση της τεχνικής των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ για τη μελέτη της διάβρωσης σε καλλιεργούμενα εδάφη

Εξετάζεται η δυνατότητα, που μπορεί να προσφέρει ένα μικρό πειραματικό αγροτεμάχιο στη Νότια Ιταλία (Εικόνα 4.40), ως προς την αξιολόγηση της συνδυασμένης τεχνικής των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε μελέτες διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων σε καλλιεργούμενα εδάφη, μέσω της σύγκρισης μεταξύ των μετρούμενων ρυθμών απώλειας χώματος, που προκύπτουν από τη συλλογή ιζημάτων σε αποθηκευτικά δοχεία κατάλληλα τοποθετημένα έξω από το πειραματικό αγροτεμάχιο και των εκτιμήσεων που παρέχονται από τις μετρήσεις των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Porto and Walling, 2012).



Εικόνα 4.40

Το πειραματικό αγροτεμάχιο και ο σχεδιασμός της δειγματοληψίας. (Porto and Walling, 2012)

Τοποθεσία: 40km βόρεια της Calabria, **Νότια Ιταλία.**

Περιοχή έρευνας: **Πειραματικό Αγροτεμάχιο 5m x25m** (κατασκευής 2005).

Διάρκεια πειραματικής μελέτης: 4 χρόνια (2006-2009).

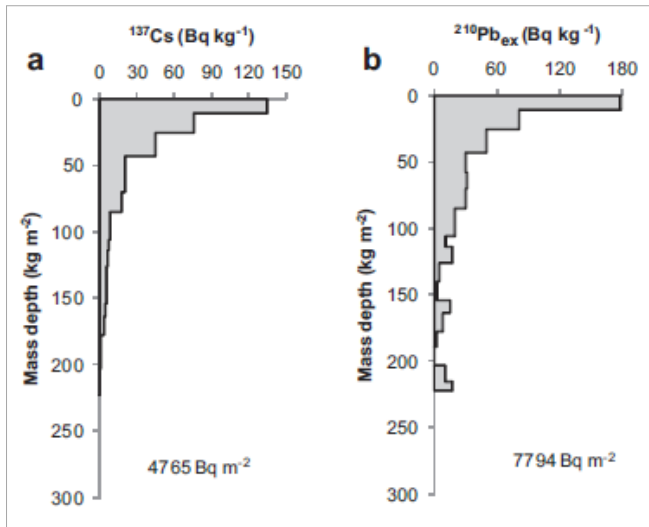
Κλίση: 10%.

Μέση ετήσια βροχόπτωση: 1100 mm (μέγιστη το Δεκέμβριο, ελάχιστη τον Ιούλιο).

Κλίμα: Τυπικό Μεσογειακό.

Υφή εδάφους: Ιλλο-πηλώδης (4% άργιλος, 76% ιλύς, 20% άμμος).

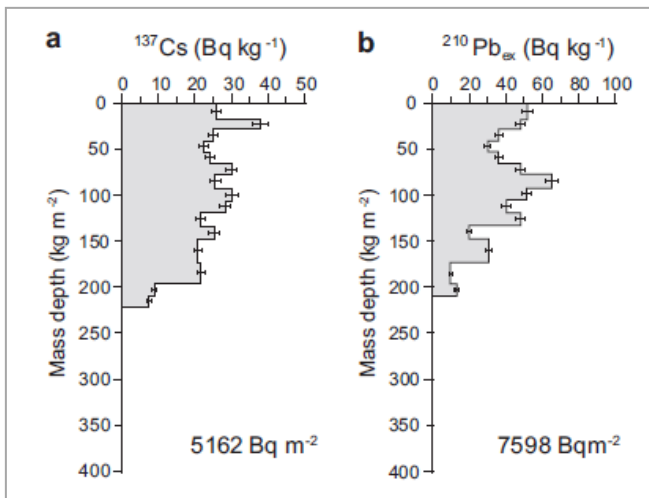
Η κατά βάθος δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε με κυλινδρικό πυρήνα από ασάλι (εσωτερικής διαμέτρου 11cm), του οποίου η εισαγωγή στο έδαφος έγινε με μηχανοκίνητο κρουστικό σφυρί ενώ, η εξαγωγή του επιτεύχθηκε με χειροκίνητο βαρούλκο. Το βάθος της δειγματοληψίας στο πειραματικό αγροτεμάχιο ήταν 50cm περίπου. Για τις κατά βάθος κατανομές, τα δείγματα χώματος τεμαχίστηκαν σε τμήματα των 2-4 cm.



Εικόνα 4.41

Κατά βάθος κατανομές και παραμένουσες αποθέσεις των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{ex}$ σε αδιατάρακτη περιοχή, σε απόσταση 2km περίπου από το πειραματικό αγροτεμάχιο.

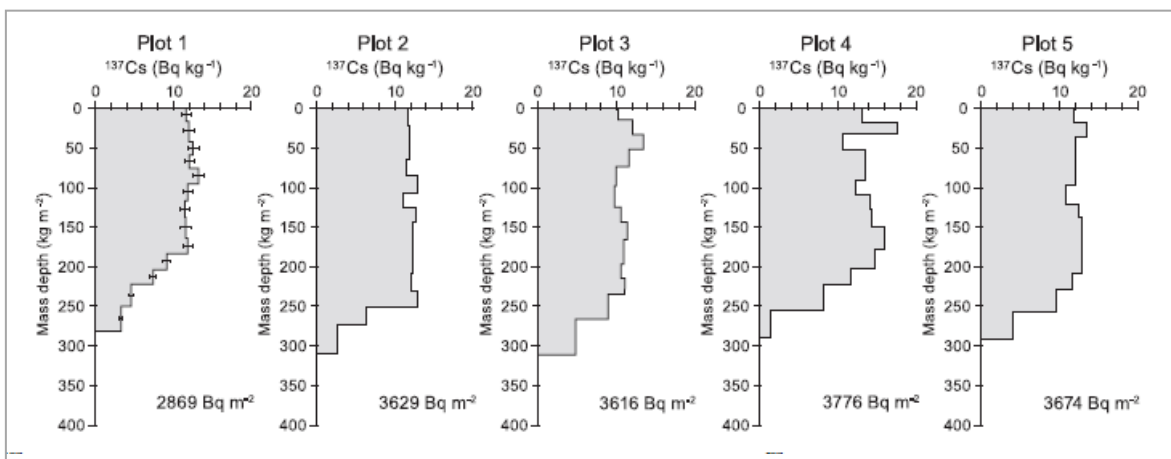
(Porto and Walling, 2012)



Εικόνα 4.42

Κατά βάθος κατανομές και παραμένουσες αποθέσεις των ^{137}Cs (αριστερά) και $^{210}\text{Pb}_{ex}$ (δεξιά) σε καλλιεργούμενη περιοχή, σε απόσταση 100m περίπου από το πειραματικό αγροτεμάχιο.

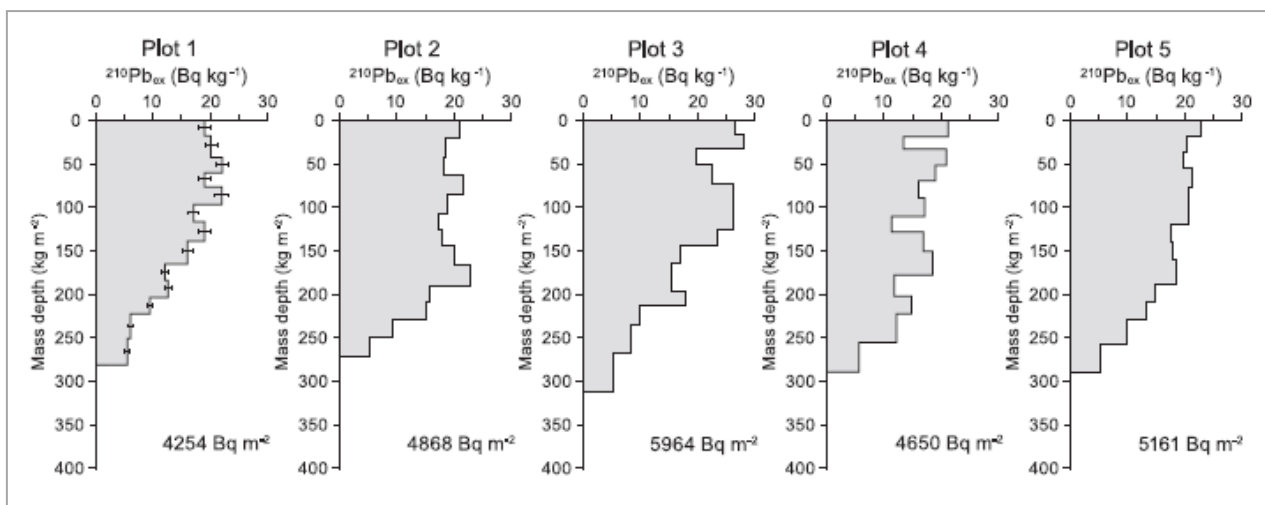
(Porto and Walling, 2012)



Εικόνα 4.43

Κατά βάθος κατανομές και παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs στο έδαφος του πειραματικού αγροτεμαχίου για καθένα από τα 5 επιμέρους τμήματά του (plots).

(Porto and Walling, 2012)



Εικόνα 4.44

Κατά βάθος κατανομές και παραμένουσες αποθέσεις του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στο έδαφος του πειραματικού αγροτεμαχίου για καθένα από τα 5 επιμέρους τμήματά του (plots). (Porto and Walling, 2012)

- Συνδυασμένη χρήση της τεχνικής των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ για τη μελέτη της διάβρωσης σε καλλιεργούμενα εδάφη

Στο Μαρόκο (Εικόνα 4.45), η υποβάθμιση του εδάφους προκαλείται κυρίως από τη διάβρωση του εδάφους και αποτελεί μία από τις σοβαρότερες απειλές για τη γεωργία. Η συνδυασμένη εφαρμογή της τεχνικής των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ έρχεται να καλύψει την έλλειψη διαθέσιμων δεδομένων για την εκτίμηση του μεγέθους του προβλήματος (Benmansour et al., 2013).



Εικόνα 4.45

Άποψη της καλλιεργούμενης τοποθεσίας καθώς και της τοποθεσίας αναφοράς στην περιοχή Marchouch του Μαρόκου. (Benmansour et al., 2013)

Τοποθεσία: *Marchouch* (~ 33°N, 6° W),
68 km νοτιοανατολικά από το *Rabat*, **Μαρόκο**.

Περιοχή έρευνας: **Αγροτικό πεδίο**

Έκταση: **1ha**.

Μέση κλίση: 17%.

Υψόμετρο: 350-400m *asl*.

Μέση ετήσια βροχόπτωση: 405mm (50% Δεκέμβριο -Μάρτιο).

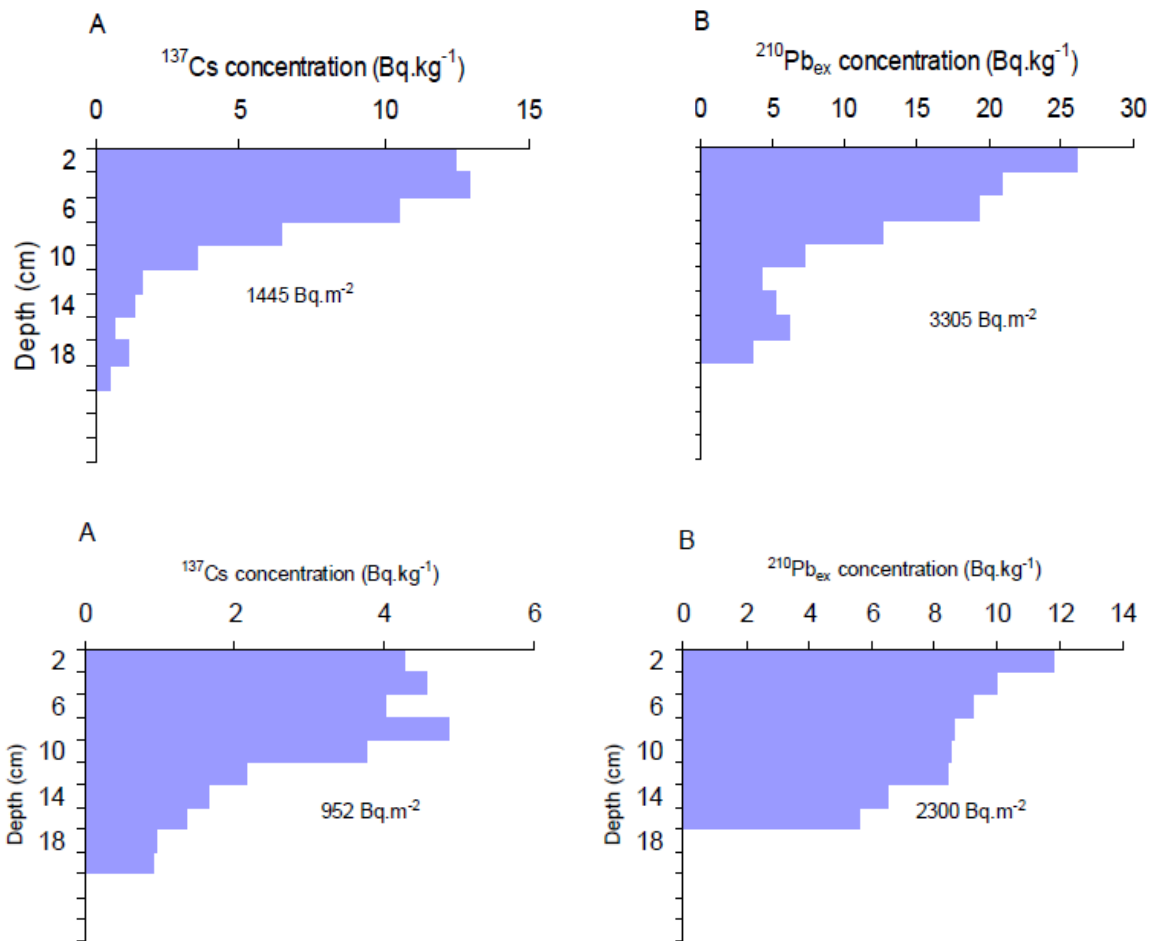
Μέση μηνιαία θερμοκρασία: 10-23°C.

Κλίμα: *Ημίξηρο*.

Υφή εδάφους: *Αργιλώδης*.

Σύσταση εδάφους: 2,5% οργανικό υλικό.

Η κατά βάθος δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε με χρήση ενός μηχανοκίνητου «Κυλινδρικού Τρυπανιού Στήλης Χώματος» (“*Soil Cylinder Column Auger*”) μέχρι το βάθος των 40cm περίπου. Για τις κατά βάθος κατανομές, τα δείγματα χώματος τεμαχίστηκαν σε τμήματα των **1-2 cm**.



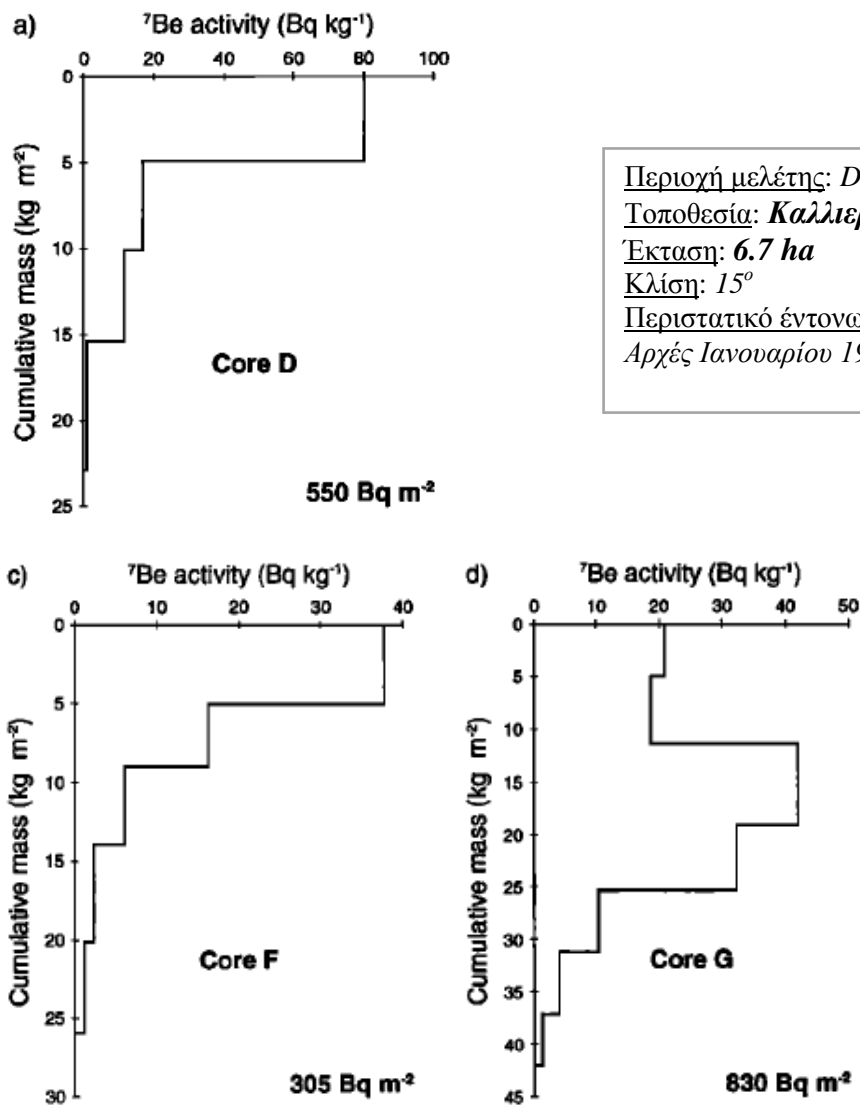
Εικόνα 4.46

Κατά βάθος κατανομές και παραμένουσες αποθέσεις των ¹³⁷Cs και ²¹⁰Pb_{ex} στην τοποθεσία αναφοράς (πάνω) και στο καλλιεργούμενο αγροτικό πεδίο (κάτω).

(Benmansour et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 149-160)

- Χρήση της τεχνικής του ^7Be για τη μελέτη της διάβρωσης και της απόθεσης ιζημάτων σε καλλιεργούμενα εδάφη

Η μελέτη των Walling et al. (1999) αποτελεί μια από τις πρώιμες έρευνες, όπου επιχειρήθηκε η χρήση της τεχνικής του ^{137}Cs συνδυαστικά με μετρήσεις του ^7Be για να εκτιμηθούν μεσοπρόθεσμοι, αλλά και βραχυπρόθεσμοι ρυθμοί υδατικής διάβρωσης σε καλλιεργούμενο πεδίο στο Devon, UK. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις του ^7Be πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά από ένα περιστατικό έντονων βροχοπτώσεων διάρκειας μερικών ημερών, το οποίο συνέβη μετά τη συγκομιδή, σε καλλιεργούμενο έδαφος που είχε παραμείνει χωρίς φυτοκάλυψη εκείνη την περίοδο με αποτέλεσμα να είναι ευαίσθητο στη διάβρωση.



Περιοχή μελέτης: *Devon, UK.*
 Τοποθεσία: **Καλλιεργούμενο πεδίο**
 Έκταση: **6.7 ha**
 Κλίση: 15°
 Περιστατικό έντονων βροχοπτώσεων:
 Αρχές Ιανουαρίου 1997 (για 7 ημέρες περίπου).

Η κατά βάθος δειγματοληψία για το ^7Be πραγματοποιήθηκε στο καλλιεργούμενο πεδίο καθώς και σε γειτονική αδιατάρακτη τοποθεσία κάνοντας χρήση πλαστικού κυλίνδρου διαμέτρου 15cm μέχρι το βάθος των 3-5cm. Για τις κατά βάθος κατανομές τα δείγματα χώματος τεμαχίστηκαν σε τμήματα 3mm.

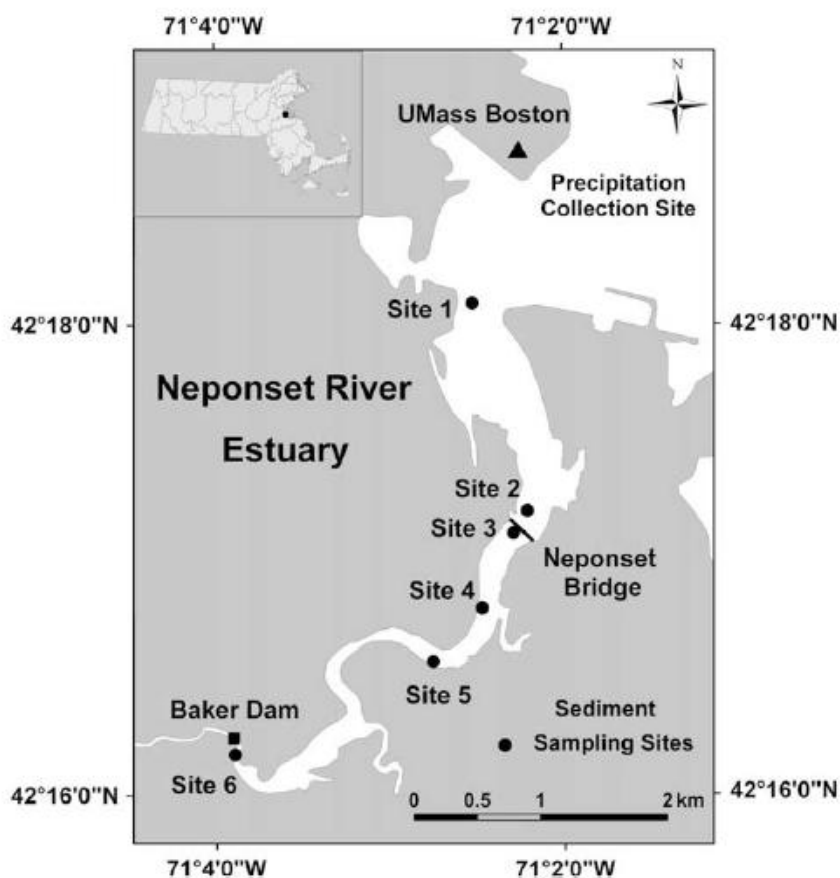
Εικόνα 4.47

Τυπικές κατακόρυφες κατανομές του ^7Be στο Devon, UK, που σχετίζονται με: **a)** αδιατάρακτη τοποθεσία αναφοράς, **c)** τοποθεσία μέσα στο υπό μελέτη καλλιεργούμενο πεδίο, η οποία έχει υποστεί διάβρωση και **d)** τοποθεσία μέσα στο υπό μελέτη καλλιεργούμενο πεδίο, η οποία έχει υποστεί απόθεση ιζημάτων. (Walling et al., 1999)

- Χρήση της τεχνικής του ^7Be για τη μελέτη βραχυχρόνιας δυναμικής ιζημάτων σε κοίτες ποταμού

Ο ποταμός Neponset βρίσκεται νοτιοανατολικά της Μασαχουσέτης, ΗΠΑ (Εικόνα 4.48). Τα φυσικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του ποταμού προκαλούν μεταφορά και ανάμιξη του νερού σε κλίμακα μικρής χρονικής διάρκειας. Η δυναμική των ιζημάτων στον ποταμό, σχετίζεται όχι μόνο με φυσικές διεργασίες (π.χ. παλίρροιες), αλλά και με ανθρωπογενείς δραστηριότητες (π.χ. το φράγμα που υπάρχει στις εκβολές).

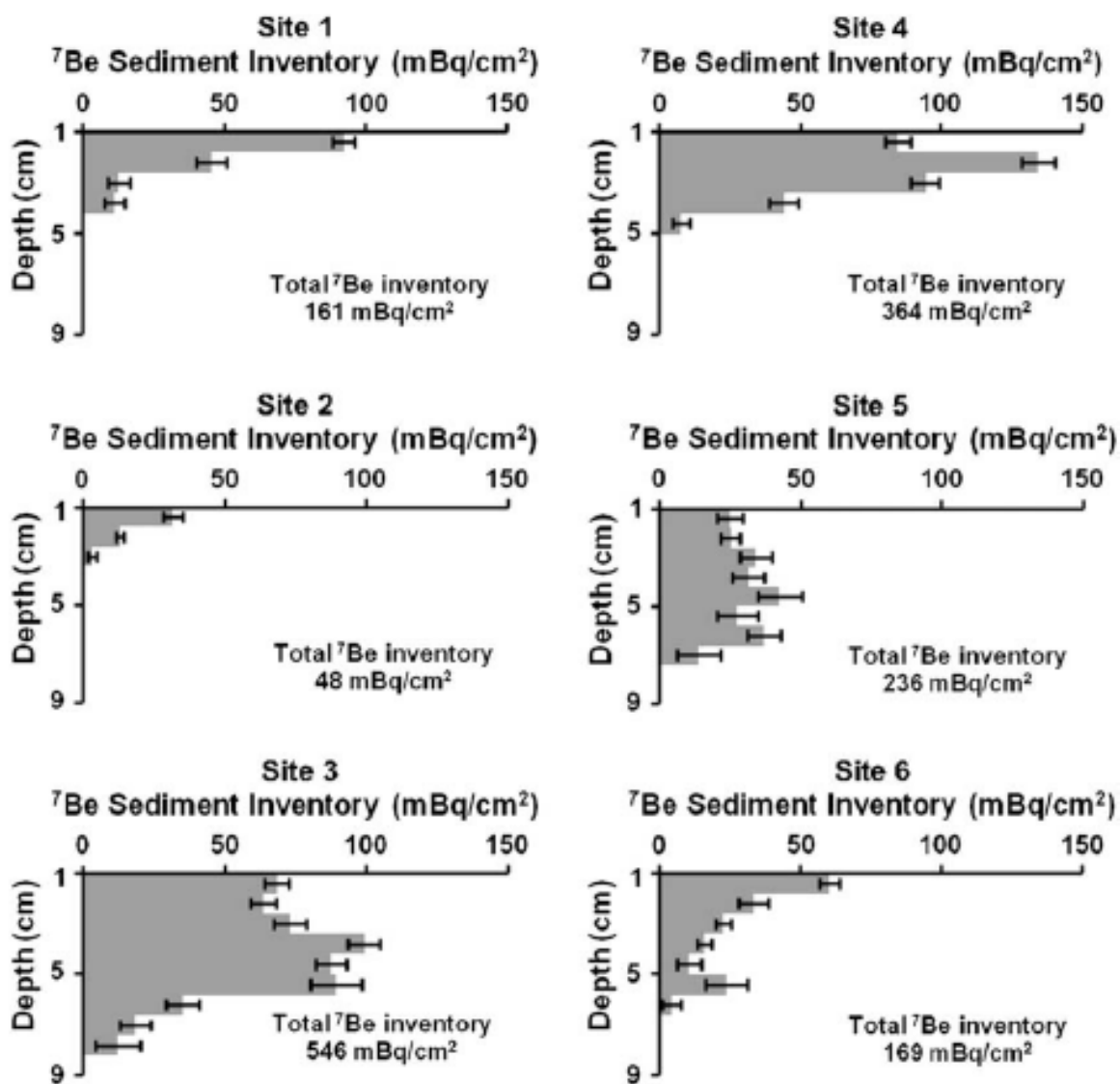
Τα παραπάνω χαρακτηριστικά του ποταμού συμφωνούν με την κύμανση που παρατηρείται τόσο στο βάθος διείσδυσης όσο και στην παραμένουσα απόθεση του ^7Be (Εικόνα 4.49), η οποία υποδηλώνει ότι η απόθεση ιζημάτων παρουσιάζει χωρική ετερογένεια σε μεγάλο βαθμό. Επομένως, το ^7Be μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την ποσοτικοποίηση βραχυχρόνιων αλλαγών, συμβάλλοντας έτσι στην αξιολόγηση των επιδράσεων της αστικής ανάπτυξης και της περιβαλλοντικής αποκατάστασης σε συστήματα ποταμών (Zhu and Olsen, 2009).



Εικόνα 4.48

Χάρτης που απεικονίζει τον ποταμό Neponset καθώς και τις έξι θέσεις της ολικής δειγματοληψίας πυρήνων, η οποία πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο, 2006.

(Zhu and Olsen, 2009)



Εικόνα 4.49

Κατακόρυφες κατανομές της παραμένουσας απόθεσης (mBq/cm²) του ${}^7\text{Be}$ σε συνάρτηση με το βάθος (cm) για τα έξι δείγματα χόματος, που συλλέχθηκαν στις κοίτες του ποταμού Neronset. Η σύγκριση της μετρούμενης παραμένουσας απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα με την παραμένουσα απόθεση της τρέχουσας ατμοσφαιρικής εναπόθεσης του ${}^7\text{Be}$, η τιμή της οποίας ήταν 101 mBq/cm², αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη της δυναμικής των σωματιδίων του χόματος και τον εντοπισμό των τοποθεσιών σε κοίτες του ποταμού, που υπόκεινται σε συσσώρευση ιζημάτων, επαναιώρηση ή διάβρωση.

(Zhu and Olsen, 2009)

- **Μελέτη βραχυπρόθεσμης ανακατανομής χόματος σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές**

Λόγω των χαρακτηριστικών του, το ^7Be μπορεί να χρησιμεύσει στη μελέτη τόσο της διάβρωσης όσο και της απόθεσης ιζημάτων σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές, όπου παρατηρείται υποβάθμιση του εδάφους, εξαιτίας της γρήγορης ανακατανομής του χόματος που προκαλείται από μία μεμονωμένη βροχόπτωση ή σφοδρές βροχοπτώσεις μικρής διάρκειας. Τυπικό παράδειγμα υποβάθμισης του εδάφους αποτελεί η Αργεντινή, όπου οι εύφορες πεδιάδες “rampas” συνορεύουν με ξηρές περιοχές, οι οποίες είναι επιβλαβείς για τη βιωσιμότητα της φυσικής βλάστησης (Lohaiza et al., 2014).

Περιοχή μελέτης:

San Luis Province (~ 34°S, 66° W),

Κεντρική Αργεντινή.

Υψόμετρο: 1047 m a.s.l.

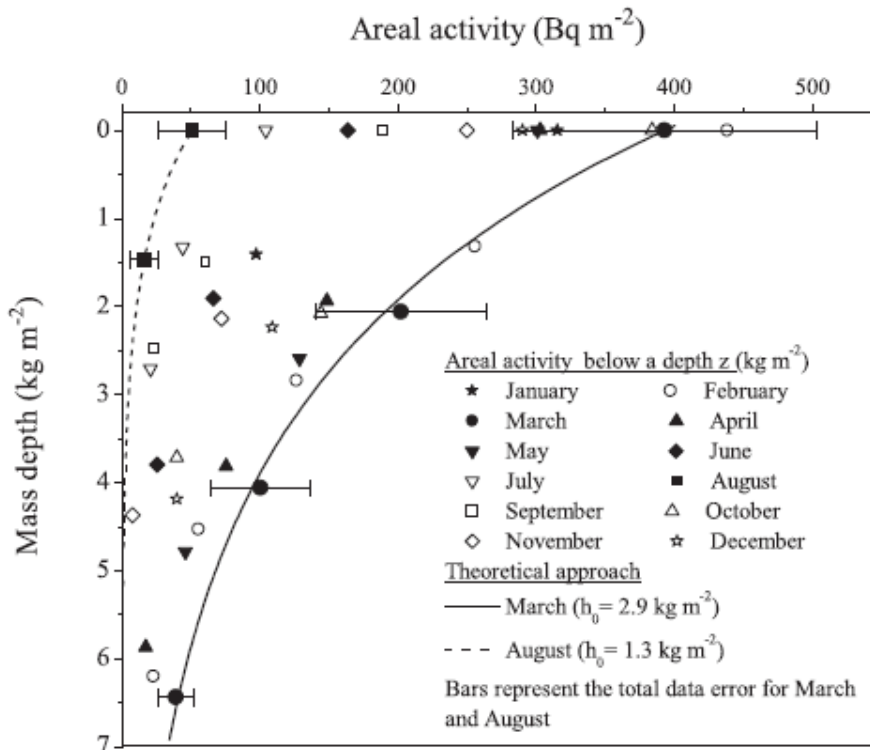
Μέση ετήσια βροχόπτωση: 600-800 mm

(Περίοδος ξηρασίας: Μάιος-Οκτώβριος. Περίοδος βροχών: Νοέμβριος-Απρίλιος).

Μέση ετήσια θερμοκρασία: 17°C.

Υφή εδάφους: αμμο-πηλώδης (sandy loam) [64% άμμος (sand), 26% ιλύς (silt), 10% άργιλος (clay)].

Η δειγματοληψία διεξήχθη από Σεπτ. 2010 - Ιαν. 2012. Δείγματα χόματος συλλέγονταν σε μηνιαία βάση. Χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί κύλινδροι διαμέτρου 10,6cm και ύψους 5cm. Για την κατά βάθος κατανομή του ^7Be , τα πρώτα 2cm (επιφανειακό έδαφος) των δειγμάτων χόματος τεμαχίστηκαν σε τμήματα των 1,5-2 m.



Εικόνα 4.50

Κατακόρυφη κατανομή ^7Be στο έδαφος για κάθε μήνα.

Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν τη θεωρητική προσαρμογή της εκθετικής συνάρτησης της κατά βάθος κατανομής για τους μήνες Μάρτιο (υγρή περίοδος) και Αύγουστο (ξηρή περίοδος).

(Lohaiza et al., 2014)

4.9 Μοντέλα μετατροπής της παραμένουσας απόθεσης των FRNs σε ρυθμούς διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων

Τα μοντέλα μετατροπής που χρησιμοποιούνται σε έρευνες διάβρωσης διακρίνονται σε *εμπειρικά* και *θεωρητικά*. Τα εμπειρικά μοντέλα χρησιμοποιούν μια σχέση μεταξύ του ρυθμού διάβρωσης ή απόθεσης και της εκατοστιαίας μείωσης ή αύξησης, αντίστοιχα, της παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs σε σχέση με την παραμένουσα απόθεση αναφοράς, χρησιμοποιώντας δεδομένα, που προκύπτουν από πειραματικά αγροτεμάχια. Τα θεωρητικά μοντέλα χρησιμοποιούν σχέσεις, οι οποίες προκύπτουν θεωρητικά λαμβάνοντας υπόψη τους κύριους παράγοντες, που μπορούν να επηρεάσουν το μέγεθος της παραμένουσας απόθεσης των υπό μελέτη FRNs.

4.9.1 Εμπειρικά μοντέλα μετατροπής

Τα εμπειρικά μοντέλα μετατροπής είναι απλές εμπειρικές συναρτήσεις, που χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση του ^{137}Cs , και οι οποίες συσχετίζουν τη μέση ετήσια απώλεια χώματος με την ποσοστιαία μείωση της παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs .

- Για **καλλιεργούμενα εδάφη**, έχουν χρησιμοποιηθεί εμπειρικές σχέσεις της μορφής:

$$Y = \alpha \cdot X^\beta \quad (4.9), \quad \text{με} \quad X = \frac{A_{ref} - A}{A_{ref}} 100 \% \quad (4.10)$$

όπου:

- Y : ο μέσος ετήσιος ρυθμός απώλειας χώματος ($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$),
- X : η εκατοστιαία μείωση της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs ,
- A_{ref} : η τοπική παραμένουσα απόθεση αναφοράς του ^{137}Cs (Bq m^{-2}),
- A : η μετρούμενη συνολική παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs (Bq m^{-2}),
- α, β : σταθερές που πρέπει να προσδιοριστούν.

Για παράδειγμα, οι Ritchie and McHenry (1975) χρησιμοποίησαν την παραπάνω σχέση 4.9, θέτοντας: $\alpha=0,88$ και $\beta=1,18$.

Μια άλλη εμπειρική σχέση που έχει χρησιμοποιηθεί (Elliott et al., 1990 και Loughran and Campell, 1995) είναι:

$$Y = 80,6 \cdot (1,07^X) \quad (4.11)$$

όπου:

- Y : ο μέσος ετήσιος ρυθμός απώλειας χώματος ($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) και
- X : η εκατοστιαία μείωση της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs .

- Για **αδιατάρακτα εδάφη**, έχει χρησιμοποιηθεί (Elliott et al., 1990 και Loughran and Campell, 1995) η εμπειρική σχέση:

$$Y = 7,74 \cdot (1,09^X) \quad (4.12)$$

όπου:

Y : ο μέσος ετήσιος ρυθμός απώλειας χόματος ($t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) και

X : η εκατοστιαία μείωση της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs .

Για τον προσδιορισμό των σταθερών τιμών των εμπειρικών σχέσεων απαιτούνται δεδομένα, που προκύπτουν από πειραματικά αγροτεμάχια, τα οποία, όταν είναι διαθέσιμα, εξαρτώνται από τοπικούς παράγοντες, όπως π.χ. τις ιδιότητες του εδάφους, τη μέθοδο καλλιέργειας, τα χρησιμοποιούμενα γεωργικά μηχανήματα, το είδος των καλλιεργούμενων φυτών. Επιπλέον, οι μετρήσεις των ρυθμών διάβρωσης, που προκύπτουν από πειραματικά αγροτεμάχια, μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικές του φυσικού περιβάλλοντος, αφού το μικρό μέγεθός τους δεν μπορεί να αντιπροσωπεύσει τις διεργασίες που συμβαίνουν σε φυσικές πλαγιές με μεγαλύτερα μήκη ούτε να περιλαμβάνει τις χαράδρες που υπάρχουν σ' αυτές. Επίσης, οι μετρήσεις, που προκύπτουν από ένα πειραματικό αγροτεμάχιο, αντιπροσωπεύουν τη μέση καθαρή απώλεια χόματος για όλη την έκτασή του και όχι τους ρυθμούς διάβρωσης των σημείων του, οι οποίοι προκύπτουν από τις μετρήσεις του ^{137}Cs . Επιπλέον, οι σταθερές των εμπειρικών μοντέλων είναι χρονικά εξαρτώμενες. Δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε μεταγενέστερες χρονικές περιόδους, αφού, για δεδομένο ρυθμό διάβρωσης, η εκατοστιαία μείωση της παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs θα είναι μεγαλύτερη. Τέλος, εφόσον από τα πειραματικά αγροτεμάχια δεν μπορούν να προκύψουν μετρήσεις του ρυθμού απόθεσης ιζημάτων, τα εμπειρικά μοντέλα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τέτοιες μελέτες.

Έτσι, η χρήση των εμπειρικών μοντέλων μετατροπής δεν προτιμάται διότι οι σταθερές τιμές, που εισάγονται στις εξισώσεις τους, εκτός του ότι είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν, έχουν ισχύ μόνο σε τοπική κλίμακα και μόνο για τη χρονική περίοδο για την οποία προσδιορίστηκαν.

4.9.2 Θεωρητικά μοντέλα μετατροπής

Για την ποσοτική εκτίμηση των ρυθμών διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων, από τις μετρήσεις των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , έχει αναπτυχθεί ένα σύνολο θεωρητικών μοντέλων μετατροπής για καλλιεργούμενα και μη καλλιεργούμενα εδάφη, όπως φαίνεται στον πίνακα της Εικόνας 4.51.

Για **καλλιεργούμενα εδάφη**, χρησιμοποιούνται συνήθως το Αναλογικό Μοντέλο (Proportional Model) και μια σειρά από Μοντέλα Ισοζυγίου Μάζας (Mass Balance Models, MBM 1, 2, 3). Για **μη καλλιεργούμενα εδάφη** (π.χ. βοσκότοποι και λιβάδια), χρησιμοποιούνται το Μοντέλο Κατανομής-Προφίλ (Profile Shape Model) και το Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης (Diffusion and Migration Model).

Εικόνα 4.51

Πίνακας μοντέλων για χρήση μετρήσεων ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be σε καλλιεργούμενα και μη καλλιεργούμενα εδάφη. (Walling et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 125-148)

FRN	Cultivated	Uncultivated (Pasture)
^{137}Cs	Proportional Model	Profile Shape Model
	Simplified mass balance model (Mass Balance Model 1)	Diffusion and Migration model
	Mass Balance Model 2	
	Mass balance model with tillage (Mass Balance Model 3)	
^{210}Pb	Mass Balance Model 2	Diffusion and Migration model
	Mass balance model with tillage (Mass Balance Model 3)	
^7Be	Profile Shape Model	

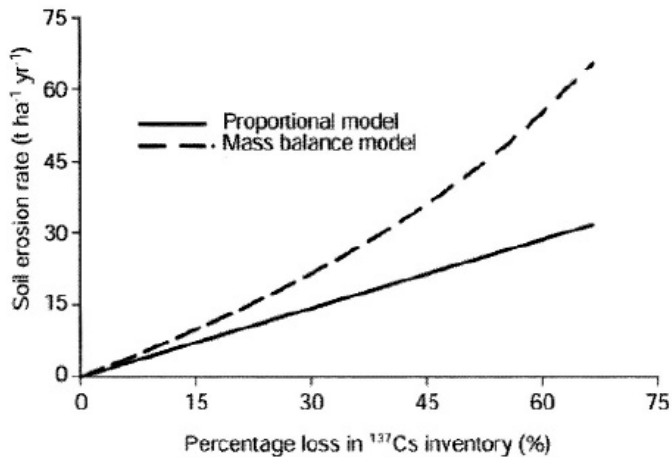
- Όσον αφορά στη χρήση μετρήσεων του ^{137}Cs , είναι εφαρμόσιμα έξι μοντέλα:
 - Για καλλιεργούμενα εδάφη: **(i)** το Αναλογικό Μοντέλο, **(ii)** το Απλοποιημένο Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας (MBM 1), **(iii)** το Βελτιωμένο Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας (MBM 2) και **(iv)** το Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας (MBM 3) που ενσωματώνει την επίδραση της καλλιέργειας στη μετακίνηση του χώματος.
 - Για μη καλλιεργούμενα εδάφη: **(v)** το Μοντέλο Κατανομής-Προφίλ και **(vi)** το Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης.
- Όσον αφορά στη χρήση μετρήσεων του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, είναι εφαρμόσιμα τρία μοντέλα:
 - Για καλλιεργούμενα εδάφη: τα βελτιωμένα Μοντέλα Ισοζυγίου Μάζας **(vii)** MBM 2 και **(viii)** MBM 3.
 - Για μη καλλιεργούμενα εδάφη: **(ix)** μια προσαρμογή του Μοντέλου Διάχυσης και Μετανάστευσης.
- Τέλος, για τη χρήση μετρήσεων του ^7Be είναι εφαρμόσιμη μια παραλλαγή του **(x)** Μοντέλου Κατανομής - Προφίλ τόσο σε καλλιεργούμενα όσο και σε μη καλλιεργούμενα εδάφη, ως αποτέλεσμα του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού αυτού του ραδιενεργού ισότοπου.

4.9.3 Δυνατότητες και περιορισμοί των θεωρητικών μοντέλων μετατροπής

Κάθε μοντέλο έχει τις δικές του δυνατότητες και περιορισμούς. Απλά μοντέλα, όπως το Αναλογικό Μοντέλο ή το Μοντέλο Κατανομής-Προφίλ, είναι εύκολα στη χρήση τους, αλλά συχνά παρέχουν μη αξιόπιστα αποτελέσματα αφού αποτυγχάνουν να εκπροσωπήσουν σημαντικές εμπλεκόμενες διεργασίες. Πιο βελτιωμένα μοντέλα, όπως τα μοντέλα MBM 2 και MBM 3 καθώς και το Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης, παρέχουν αξιόπιστες εκτιμήσεις των ρυθμών ανακατανομής του χώματος, αλλά απαιτούν επιπρόσθετες παραμέτρους και περισσότερες πληροφορίες για τη συμπεριφορά των τριών FRNs στο χώμα.

Στη συνέχεια, αναλύονται οι δυνατότητες και οι περιορισμοί για κάθε μοντέλο, ενώ η **μαθηματική περιγραφή** τους αναπτύσσεται στο **Παράρτημα ΣΤ**.

- **Θεωρητικά μοντέλα μετατροπής που χρησιμοποιούν μετρήσεις ^{137}Cs**
 - (i) Το **Αναλογικό Μοντέλο (Proportional Model)** (Walling and Quine, 1990) βασίζεται στην υπόθεση ότι το ^{137}Cs που εναποτίθεται στο έδαφος από την ατμόσφαιρα είναι πλήρως αναμεμιγμένο μέσα στο στρώμα του οργώματος ή της καλλιέργειας. Η εφαρμογή του είναι πολύ εύκολη διότι, εκτός από τις τιμές της παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs στα σημεία δειγματοληψίας και της τοπικής παραμένουσας απόθεσης αναφοράς, απαιτεί πληροφορίες μόνο για το βάθος καλλιέργειας και τη φαινόμενη πυκνότητα (bulk density) του χώματος. Όμως, οι παραδοχές αυτού του μοντέλου αποτελούν υπεραπλούστευση των διεργασιών, που σχετίζονται με τη συμπεριφορά και τη συσσώρευση του ^{137}Cs στο χώμα. Η συσσώρευση του ^{137}Cs στο χώμα λαμβάνει χώρα για πολλά χρόνια και ένα ποσοστό του, που εναποτίθεται στο έδαφος από την ατμόσφαιρα, ενδέχεται να απομακρύνεται εξαιτίας της διάβρωσης πριν την ενσωμάτωσή του στο βάθος της καλλιέργειας. Επομένως, εάν ένα ποσοστό του νεο-αποτιθέμενου ^{137}Cs απομακρυνθεί λόγω διάβρωσης πριν την ενσωμάτωσή του στο βάθος καλλιέργειας, ο ρυθμός διάβρωσης του χώματος, που θα εκτιμηθεί από το μοντέλο, θα είναι *υπερεκτιμημένος*. Επίσης, το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη ότι, παρόλο που σε περίπτωση διάβρωσης η επιφάνεια του εδάφους χαμηλώνει, το βάθος του οργώματος, που ανασκάπτεται με τα σκαπτικά εργαλεία, παραμένει σχετικά σταθερό με αποτέλεσμα το χώμα καλλιέργειας να εμπλουτίζεται από κατώτερα στρώματα του εδάφους προκαλώντας προοδευτική αραιώση της συγκέντρωσης του ^{137}Cs στο στρώμα της καλλιέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ρυθμός διάβρωσης του χώματος, που θα εκτιμηθεί από το μοντέλο, να είναι *υποεκτιμημένος*. Παρόμοια, το μοντέλο *υποεκτιμά* τους ρυθμούς απόθεσης ιζημάτων, αφού δεν λαμβάνει υπόψη την προοδευτική μείωση του ^{137}Cs στα αποτιθέμενα ιζήματα, που προέρχονται από διεργασίες διάβρωσης σε ανερχόμενα τμήματα πλαγιών.
 - (ii) Το **Απλοποιημένο Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας (Mass Balance Model 1)** (Zhang et al., 1990) επιχειρεί να ξεπεράσει τους περιορισμούς του Αναλογικού Μοντέλου (Εικόνα 4.52), λαμβάνοντας υπόψη την προοδευτική μείωση της συγκέντρωσης του ^{137}Cs στο χώμα του στρώματος καλλιέργειας εξαιτίας του εμπλουτισμού του από κατώτερα στρώματα του εδάφους, τα οποία περιέχουν αμελητέα ποσότητα ^{137}Cs . Το μοντέλο αυτό είναι επίσης εύκολο στην εφαρμογή του καθώς η μόνη πληροφορία, που απαιτεί, είναι η γνώση του βάθους του οργώματος. Εντούτοις, το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την ενδεχόμενη απομάκρυνση του νεο-αποτιθέμενου ^{137}Cs πριν την ενσωμάτωσή του στο στρώμα του οργώματος, η οποία μπορεί να συμβεί λόγω διάβρωσης κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων. Επίσης, γίνεται η απλουστευμένη παραδοχή ότι η συνολική εναπόθεση του ^{137}Cs στο έδαφος από την ατμόσφαιρα συνέβη το έτος 1963, αντί για τη χρονική περίοδο από τα μέσα της δεκαετίας του '50 έως τα μέσα της δεκαετίας του '70. Επειδή το μοντέλο απαιτεί πληροφορίες για τη συγκέντρωση του ^{137}Cs σε διαβρωμένο χώμα, που προέρχεται από ανώτερα τμήματα πλαγιών, τα σημεία δειγματοληψίας πρέπει να βρίσκονται κατά μήκος μιας διατομής ενός κατερχόμενου τμήματος και να ισαπέχουν μεταξύ τους. Το πρώτο (ανώτερο) σημείο της διατομής πρέπει να αντιπροσωπεύει ένα σημείο διάβρωσης.



Εικόνα 4.52

Σύγκριση της σχέσης μεταξύ του ρυθμού διάβρωσης και της εκατοστιαίας μείωσης της παραμένουσας απόθεσης του ¹³⁷Cs, που προέκυψαν από τη χρήση του Αναλογικού Μοντέλου και του Απλοποιημένου Μοντέλου Ισοζυγίου Μάζας.

(Walling et al., In: Zapata (ed), 2002, pp. 111-162)

- (iii) Το **Βελτιωμένο Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας (Mass Balance Model 2)** (Walling and He, 1999a) είναι περιεκτικότερο διότι λαμβάνει υπόψη τη χρονική μεταβολή της εναπόθεσης του ¹³⁷Cs στο έδαφος από την ατμόσφαιρα καθώς και την αρχική κατανομή του στην επιφάνεια του εδάφους πριν την ενσωμάτωσή του στο στρώμα του οργώματος λόγω της καλλιέργειας, οπότε τα αποτελέσματα, που προκύπτουν από αυτό το μοντέλο, είναι πιο ρεαλιστικά. Για την εφαρμογή του μοντέλου απαιτούνται πληροφορίες για το βάθος του οργώματος h (*plough depth*) καθώς και τις παραμέτρους: κατά μάζα βάθος χαλάρωσης H (*relaxation mass depth*) και παράγοντας αναλογίας γ (*Proportion factor*) (Βλ. § 4.9.4. γ, δ). Όπως στην περίπτωση του Απλοποιημένου Μοντέλου Ισοζυγίου Μάζας, έτσι και στην περίπτωση του Βελτιωμένου Μοντέλου απαιτούνται πληροφορίες για τη συγκέντρωση του ¹³⁷Cs σε διαβρωμένο χώμα, που προέρχεται από ανώτερα τμήματα πλαγιάς. Έτσι, τα σημεία δειγματοληψίας πρέπει να βρίσκονται κατά μήκος μιας διατομής ενός κατερχόμενου τμήματος και να ισαπέχουν μεταξύ τους. Το πρώτο (ανώτερο) σημείο της διατομής πρέπει να αντιπροσωπεύει ένα σημείο διάβρωσης.
- (iv) Το **Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας (Mass Balance Model 3)** (Walling and Quine, 1993 και Walling and He 1999a) παρουσιάζει μια σημαντική βελτίωση έναντι των προηγούμενων δύο Μοντέλων Ισοζυγίου Μάζας, αφού λαμβάνει υπόψη την επίδραση της καλλιέργειας στη μετακίνηση του χώματος. Το μοντέλο αυτό παρέχει εκτιμήσεις των ρυθμών ανακατανομής χώματος, που σχετίζονται με την υδατική διάβρωση, οι οποίες είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα για καλλιεργούμενα εδάφη. Παρόλα αυτά, το μοντέλο απαιτεί περισσότερες πληροφορίες από αυτές που απαιτούν τα προηγούμενα δύο Μοντέλα Ισοζυγίου Μάζας. Επιπλέον, το μοντέλο, στην τρέχουσα μορφή του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μεμονωμένες διατομές κατά μήκος πλαγιών, δηλαδή θεωρεί την κίνηση των σωματιδίων του χώματος και του συσχετιζόμενου ¹³⁷Cs ως μονοδιάστατη διεργασία. Σε πολλές περιοχές, όμως, αυτή η παραδοχή δεν είναι ρεαλιστική λόγω της ύπαρξης καμπυλότητας κατά πλάτος, η οποία δημιουργεί σύγκλιση και απόκλιση της ροής του νερού. Η τρισδιάστατη χωρική μορφή της ανακατανομής του χώματος, που συμβαίνει λόγω καλλιέργειας και υδατικής διάβρωσης, είναι δυνατό να ληφθεί υπόψη κάνοντας χρήση πλεγμάτων (Walling et al., 1999).

- (v) Το **Μοντέλο Κατανομής-Προφίλ (Profile Distribution Model)** (Zhang et al., 1990 και Walling and Quine, 1993) εφαρμόζεται για μη καλλιεργούμενα εδάφη, οπότε διαφέρει σημαντικά από τα παραπάνω μοντέλα όπου το ^{137}Cs είναι αναμεμιγμένο μέσα στο στρώμα του οργώματος ή της καλλιέργειας. Το μοντέλο αυτό είναι απλό στην εφαρμογή του, αλλά δε λαμβάνει υπόψη ότι η εναπόθεση του ^{137}Cs στο έδαφος από την ατμόσφαιρα καθώς επίσης και η προοδευτική προς τα κάτω κίνησή του μέσα στο έδαφος είναι χρονικά εξαρτώμενες, με αποτέλεσμα να *υπερεκτιμούνται* οι ρυθμοί απώλειας του χώματος.
- (vi) Το **Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης (Diffusion and Migration Model)** (Walling and He, 1992, 1993 και He and Walling, 1997) εφαρμόζεται, επίσης, για μη καλλιεργούμενα εδάφη και αποτελεί βελτίωση του Μοντέλου Κατανομής-Προφίλ, αφού λαμβάνει υπόψη ότι η εναπόθεση του ^{137}Cs στο έδαφος από την ατμόσφαιρα καθώς επίσης και η προοδευτική προς τα κάτω κίνησή του μέσα στο έδαφος είναι χρονικά εξαρτώμενες. Όμως, για την εφαρμογή του μοντέλου αυτού χρειάζονται περισσότερες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του ^{137}Cs σε αδιατάρακτα εδάφη. Απαιτούνται εκτιμήσεις των τιμών δύο παραμέτρων: του συντελεστή διάχυσης D και του ρυθμού μετανάστευσης V . Οι τιμές των παραμέτρων αυτών μπορούν να εξαχθούν από λεπτομερείς μετρήσεις στην κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs (Βλ. § 4.9.4: ζ, η).

• **Θεωρητικά μοντέλα μετατροπής που χρησιμοποιούν μετρήσεις $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$**

- (vii, viii) Έχουν αναπτυχθεί δύο Μοντέλα Ισοζυγίου Μάζας για την περίπτωση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ για καλλιεργούμενα εδάφη (Walling and He, 1999b, Walling et al., 2003) τα οποία έχουν υιοθετηθεί από τα **Μοντέλα Ισοζυγίου Μάζας 2 και 3** που αναπτύχθηκαν για το ^{137}Cs . Όπως και στην περίπτωση του ^{137}Cs , το δεύτερο από αυτά λαμβάνει υπόψη την επίδραση της καλλιέργειας, ενώ το πρώτο όχι.
- (ix) Το **Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης**, που εφαρμόζεται για το ^{137}Cs , έχει επίσης τροποποιηθεί για την περίπτωση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ για μη καλλιεργούμενα εδάφη (He and Walling, 1997).

Οι τροποποιήσεις που έχουν γίνει στα παραπάνω μοντέλα προκειμένου να εφαρμοστούν για την περίπτωση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ είναι οι εξής:

- Ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ έχει συγκρίσιμο χρόνο υποδιπλασιασμού με αυτόν του ^{137}Cs . Εντούτοις, η φυσική του προέλευση και η συνεχής εναπόθεσή του στο έδαφος από την ατμόσφαιρα παρέχουν τη δυνατότητα εκτιμήσεων ρυθμών ανακατανομής χώματος μεγαλύτερων χρονικών περιόδων (π.χ. 100 ετών). Έτσι, η χρονική περίοδος έχει επεκταθεί 100 έτη πριν από την ημερομηνία της δειγματοληψίας. Θεωρείται ότι κάθε προηγούμενη εναπόθεση $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στο έδαφος είναι αμελητέα λόγω της ραδιενεργού του διάσπασης, αφού θεωρητικά μόνο το 4% περίπου της αρχικής εναπόθεσής του θα παραμείνει μετά από 100 χρόνια. Ο χρόνος της δειγματοληψίας δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς των μοντέλων. Χρησιμοποιείται μόνο για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, που προκύπτουν από τα μοντέλα.
- Η ετήσια εναπόθεση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ θεωρείται ότι παραμένει σταθερή με το χρόνο, επομένως η παραμένουσα απόθεση αναφοράς αντιπροσωπεύει μια σταθερή κατάσταση ισορροπίας

μεταξύ της εναπόθεσης και της διάσπασης, δηλαδή παραμένει σταθερό στο πέρασμα του χρόνου.

- Οι περισσότερες παράμετροι που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα μετατροπής για την περίπτωση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ είναι πολύ παρόμοιες με εκείνες για την περίπτωση του ^{137}Cs . Παρόλα αυτά, χρειάζεται κάποια προσοχή στον προσδιορισμό τους καθώς η συμπεριφορά του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στα εδάφη μπορεί να διαφέρει από εκείνη του ^{137}Cs .

• Θεωρητικό μοντέλο μετατροπής που χρησιμοποιεί μετρήσεις ^7Be

- (x) Μια παραλλαγή του Μοντέλου Κατανομής-Προφίλ εφαρμόζεται για την περίπτωση του ^7Be . Επειδή ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ^7Be είναι μικρός ($T_{1/2}=53,3$ ημέρες), το ίδιο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε καλλιεργούμενα όσο και σε μη καλλιεργούμενα εδάφη (Blake et al., 1999, Walling et al., 1999, Schuller et al., 2006).

Η εφαρμογή του μοντέλου είναι ουσιαστικά ίδια με αυτήν της περίπτωσης του ^{137}Cs και περιλαμβάνει τις εξής τροποποιήσεις:

- Η χρονική περίοδος των δεκαετιών έχει μειωθεί σε μια χρονική διάρκεια ενός μεμονωμένου συμβάντος βροχόπτωσης ή μια σύντομη χρονική περίοδο που περιλαμβάνει μερικά τέτοια συμβάντα.
- Η ετήσια φυσική ραδιενεργός διάσπαση δεν είναι πλέον σημαντική.
- Επειδή ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ^7Be είναι πολύ μικρότερος από τους χρόνους υποδιπλασιασμού των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, το βάθος διεξόδου του στο έδαφος είναι πολύ μικρότερο από αυτό των άλλων δύο ραδιενεργών ισοτόπων, αλλά παρόμοιο με το βάθος διεξόδου των νέων εναποθέσεων τους στο έδαφος από την ατμόσφαιρα.

Μια διαφορετική μέθοδος για τον υπολογισμό της ανακατανομής του χώματος προτείνεται από τους Wilson, Matisoff και Whiting (2003). Εφαρμόζεται ένα Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας για το ^7Be , το οποίο απαιτεί τον προσδιορισμό της παραμένουσας απόθεσης του ^7Be στο χώμα πριν και μετά από ένα συμβάν βροχόπτωσης, την εναπόθεση του ^7Be στο έδαφος κατά τη διάρκεια του συμβάντος και το προφίλ της ειδικής ραδιενέργειας του ^7Be στο έδαφος, που προκύπτει μετά το συμβάν. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι λιγότερο συνηθισμένο και δεν περιλαμβάνεται στο λογισμικό που σχετίζεται με τα μοντέλα μετατροπής (Βλ. § 4.9.5).

4.9.4 Παράμετροι των θεωρητικών μοντέλων μετατροπής

Οι παράμετροι που απαιτούνται για όλα τα μοντέλα είναι: (**α**) οι παραμένουσες αποθέσεις των υπό μελέτη τοποθεσιών, η παραμένουσα απόθεση αναφοράς και (**β**) οι συντελεστές διόρθωσης του μεγέθους κόκκων χώματος P και P' (particle size correction factors), εάν είναι διαθέσιμοι. Άλλες παράμετροι και δεδομένα, που απαιτούνται για κάποια μοντέλα είναι: (**γ**) το κατά μάζα βάθος χαλάρωσης H (mass relaxation depth), (**δ**) ο παράγοντας αναλογίας γ (proportion factor), (**ε**) η σταθερά καλλιέργειας ϕ (tillage constant), (**στ**) ο παράγοντας μορφής του προφίλ h_o (profile shape factor), (**ζ**) ο συντελεστής διάχυσης D (diffusion coefficient), (**η**) ο ρυθμός μετανάστευσης V (migration rate) και (**θ**) η ετήσια ροή εναπόθεσης $I(t)$ (annual deposition flux) (Εικόνα 4.53).

Εικόνα 4.53

Πίνακας παραμέτρων και δεδομένων που απαιτούνται σε κάθε μοντέλο.
(Walling et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 125-148)

Model type	Parameter and data requirements
Proportional Model and Simplified mass balance model	Tillage depth, bulk density, year of tillage commencement
Mass Balance Model 2	Tillage depth, year of tillage commencement, proportion factor, relaxation depth, record of annual fallout flux ^a
Mass balance model with tillage (Mass Balance Model 3)	Tillage depth, tillage constant, proportion factor, relaxation depth, slope length and slope gradient for each section of the transect, record of annual fallout flux
Diffusion and Migration Model	Diffusion coefficient, relaxation depth, migration coefficient, record of annual fallout flux
Profile Shape Model	Profile shape factor

^a Only required for ¹³⁷Cs models

• Περιγραφή των παραμέτρων των μοντέλων μετατροπής

Η αξιοπιστία των μοντέλων μετατροπής εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από τον προσδιορισμό των παραμέτρων τους. Μερικές από αυτές είναι πιο δύσκολο να προσδιοριστούν και εμπεριέχουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα από κάποιες άλλες. Οι σημαντικότερες παράμετροι αναπτύσσονται παρακάτω.

(α) Παραμένουσα απόθεση των FRNs: ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb_{ex} και ⁷Be στην τοποθεσία αναφοράς (reference inventory) A_{ref} και στην υπό μελέτη τοποθεσία A

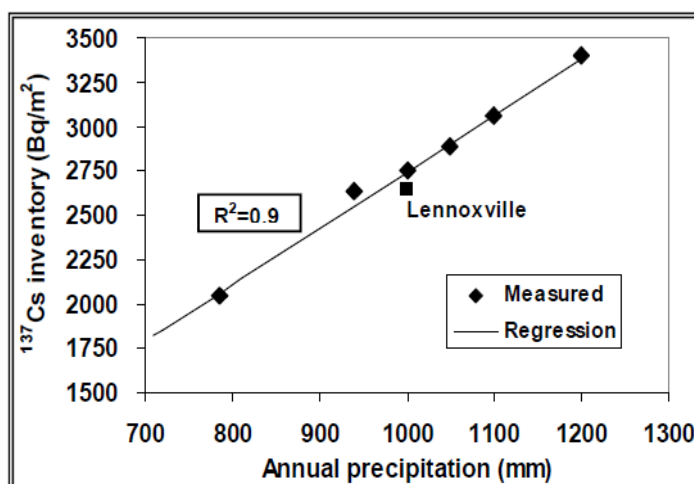
Η παραμένουσα απόθεση αναφοράς A_{ref} αποτελεί μια καίρια παράμετρο για κάθε μελέτη, που χρησιμοποιεί μετρήσεις των FRNs: ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb_{ex} και ⁷Be, για να εκτιμήσει τους ρυθμούς ανακατανομής του εδάφους, αφού η τιμή του, συγκρινόμενη με αυτή της υπό μελέτη τοποθεσίας A , καθορίζει εάν ένα σημείο δειγματοληψίας έχει υποστεί διάβρωση ή απόθεση ιζημάτων καθώς επίσης και το μέγεθος των ρυθμών ανακατανομής του χώματος.

Για τον προσδιορισμό της παραμένουσας απόθεσης αναφοράς καθώς και της παραμένουσας απόθεσης των υπό μελέτη τοποθεσιών πρέπει να πραγματοποιούνται τόσο κατά βάθος όσο και ολικές δειγματοληψίες. Η εγκυρότητα των μετρήσεων, που προκύπτουν από τις ολικές δειγματοληψίες, επιβεβαιώνεται μέσω των κατακόρυφων κατανομών των τριών FRNs, που προκύπτουν από τις κατά βάθος δειγματοληψίες.

Ο προσδιορισμός της παραμένουσας απόθεσης αναφοράς είναι πιθανό να υπόκεινται σε σημαντικά σφάλματα και πολλοί ερευνητές συμπεραίνουν ότι απαιτείται η επιλογή πολλών τοποθεσιών αναφοράς διότι οι μετρούμενες παραμένουσες αποθέσεις παρουσιάζουν μεγάλη χωρική κύμανση (Matisoff, 2014). Για την επιβεβαίωση της καταλληλότητας της τοποθεσίας αναφοράς και της παραμένουσας απόθεσης αναφοράς πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πολλά κριτήρια, όπως π.χ. η μορφή της κατακόρυφης κατανομής του υπό μελέτη FRN, ο αριθμός

των δειγμάτων της ολικής δειγματοληψίας που πραγματοποιείται στην τοποθεσία αναφοράς, η χαμηλή τιμή του συντελεστή μεταβολής ($CV\% < 30\%$) των τιμών της παραμένουσας απόθεσης που προκύπτουν από τα δείγματα χώματος της ολικής δειγματοληψίας στην τοποθεσία αναφοράς (Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77).

Υπάρχουν, επίσης, εναλλακτικές λύσεις για τον προσδιορισμό της τιμής της παραμένουσας απόθεσης αναφοράς του ^{137}Cs . Αυτές περιλαμβάνουν: (i) τη χρήση εθνικών ή παγκόσμιων μακροπρόθεσμων μετρήσεων της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης του ^{137}Cs , (ii) την εκτίμησή του ως συνάρτηση της ετήσιας βροχόπτωσης (έχουν αναπτυχθεί στον Καναδά, την Ευρώπη και την Αυστραλία διάφορες εξισώσεις που σχετίζουν άμεσα την ατμοσφαιρική εναπόθεση του ^{137}Cs με τη μέση ετήσια βροχόπτωση) και (iii) τη χρήση λογισμικού με απαιτούμενες παραμέτρους: τη θέση της τοποθεσίας (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) και την ετήσια βροχόπτωση (Walling et al., 2002). Αυτές οι προβλεπόμενες εκτιμήσεις προσφέρονται για σύγκρισή τους με τις μετρούμενες παραμένουσες αποθέσεις αναφοράς και σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η μέση τιμή της παραμένουσας απόθεσης αναφοράς (2650 ± 333) Bq m^{-2} του ^{137}Cs , που μετρήθηκε στη λεκάνη απορροής Lennoxville ($45^{\circ}22' \text{N}$, $71^{\circ}51' \text{W}$) στον Καναδά (Εικόνα 4.54), ήταν μόνο 3% μικρότερη απ' αυτήν που προβλεπόταν από την τοπική ετήσια βροχόπτωση, ποσοστό που βρισκόταν μέσα στα πλαίσια της αναλυτικής αβεβαιότητας (Mabit et al., 2002).



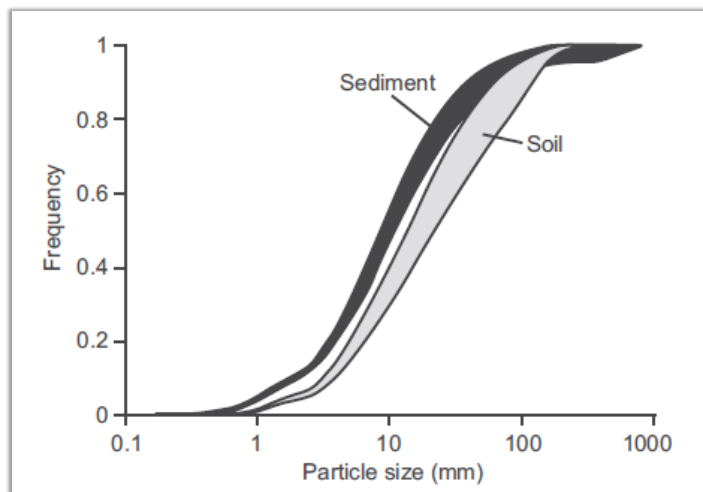
Εικόνα 4.54

Σχέση μεταξύ της ετήσιας βροχόπτωσης και της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs που αναπτύχθηκε για τον ανατολικό Καναδά.

(Mabit et al., 2002)

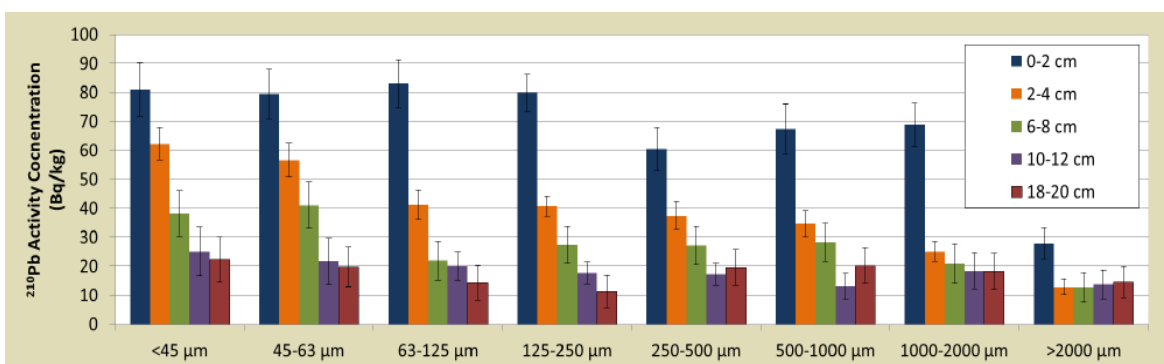
(β) Συντελεστές διόρθωσης μεγέθους των κόκκων χώματος (*particle size correction factors*) για τοποθεσίες διάβρωσης *P* και απόθεσης ιζημάτων *P'*

Οι συντελεστές διόρθωσης μεγέθους των κόκκων χώματος *P* και *P'* ενσωματώνονται σε όλα τα μοντέλα μετατροπής προκειμένου να ληφθούν υπόψη: **(i)** η επιλεκτικότητα του μεγέθους των σωματιδίων του χώματος στις διεργασίες της διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων, αφού, κατά τις διεργασίες αυτές, μεγαλύτερη κινητικότητα παρουσιάζουν τα λεπτότερα σωματίδια του χώματος (Εικόνα 4.55) και **(ii)** η προτίμηση των τριών FRNs να προσκολλώνται στα λεπτόκοκκα κλάσματα του χώματος (Εικόνα 4.56).



Εικόνα 4.55

Κοκκομετρικές καμπύλες⁽⁴²⁾ του επιφανειακού εδάφους (*Soil*) πειραματικού αγροτεμαχίου καθώς και του ιζήματος (*Sediment*) που συλλέχθηκε από αυτό. Το ίζημα, που συλλέχθηκε από το πειραματικό αγροτεμάχιο, είναι εμπλουτισμένο με λεπτόκοκκα κλάσματα χώματος, ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης κινητικότητας που παρουσιάζουν. (Porto et al., 2012)



Εικόνα 4.56

Κατακόρυφη κατανομή του ²¹⁰Pb στο έδαφος και κλασματικός διαχωρισμός του. Η ειδική ραδιενέργεια εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος των κόκκων του χώματος. (Anagnostakis, July 3, 2015)

⁽⁴²⁾ Βλ. Παράρτημα Δ.4

Έτσι, εάν σε μια διεργασία διάβρωσης συμβαίνει επιλεκτική απομάκρυνση λεπτόκοκκων σωματιδίων, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισοτόπων, ο ρυθμός διάβρωσης που θα προκύψει από τα μοντέλα μετατροπής θα είναι υπερεκτιμημένος, εάν δε ληφθεί υπόψη ο συντελεστής διόρθωσης P . Αντίστοιχα, εάν μια διεργασία απόθεσης ιζημάτων περιλαμβάνει επιλεκτική απόθεση χονδρόκοκκων σωματιδίων, όπου η συγκέντρωση ραδιενεργών ισοτόπων είναι χαμηλή, ο ρυθμός απόθεσης, που θα προκύψει από τα μοντέλα μετατροπής, θα είναι υποτιμημένος, εάν δε ληφθεί υπόψη ο συντελεστής διόρθωσης P' .

- Ο συντελεστής διόρθωσης P , ο οποίος αφορά τοποθεσίες διάβρωσης, ορίζεται ως το πηλίκο της συγκέντρωσης του ραδιενεργού ισοτόπου στο μετακινούμενο χώμα προς τη συγκέντρωση του ραδιενεργού ισοτόπου στο αρχικό χώμα.
- Ο συντελεστής διόρθωσης P' , ο οποίος αφορά τοποθεσίες απόθεσης ιζημάτων, ορίζεται ως το πηλίκο της συγκέντρωσης του ραδιενεργού ισοτόπου στο αποτιθέμενο χώμα προς τη συγκέντρωση του ραδιενεργού ισοτόπου στο μετακινούμενο χώμα.

Οι τιμές των συντελεστών P και P' εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους και το ραδιενεργό ισότοπο που μελετάται καθώς επίσης και από το βαθμό της επιλεκτικότητας, που σχετίζεται με τη μετακίνηση του χώματος, και είναι δύσκολο να υπολογιστούν άμεσα από τον ορισμό τους. Οι He και Walling (1996), προτείνουν μία προσέγγιση για την εκτίμηση των συντελεστών P και P' μέσω του μεγέθους των κόκκων χώματος, το οποίο υπολογίζεται μέσω του εμβαδού της ειδικής επιφάνειας S (specific surface area) ($m^2 g^{-1}$) κάνοντας την υπόθεση ότι οι κόκκοι είναι σφαιρικοί. Έτσι, οι συντελεστές P και P' μπορούν να εκτιμηθούν από τις σχέσεις:

$$P = \left(\frac{S_{ms}}{S_{sl}} \right)^{\nu} = \frac{\left[\frac{4\pi r_{ms}^2}{\rho_{ms} \left(\frac{4\pi r_{ms}^3}{3} \right)} \right]^{\nu}}{\left[\frac{4\pi r_{sl}^2}{\rho_{sl} \left(\frac{4\pi r_{sl}^3}{3} \right)} \right]^{\nu}} = \left(\frac{r_{sl}}{r_{ms}} \right)^{\nu} \quad (4.13)$$

$$P' = \left(\frac{S_{ds}}{S_{ms}} \right)^{\nu} = \frac{\left[\frac{4\pi r_{ds}^2}{\rho_{ds} \left(\frac{4\pi r_{ds}^3}{3} \right)} \right]^{\nu}}{\left[\frac{4\pi r_{ms}^2}{\rho_{ms} \left(\frac{4\pi r_{ms}^3}{3} \right)} \right]^{\nu}} = \left(\frac{r_{ms}}{r_{ds}} \right)^{\nu} \quad (4.14)$$

όπου ν είναι μια σταθερά με τιμή: $\nu = 0,65$ (ίδια και για τις δύο εξισώσεις).

- sl : αρχικό χώμα (original soil),
 ms : μετακινούμενο χώμα (mobilized sediment),
 ds : αποτιθέμενο χώμα (deposited sediment),

- S : εμβαδό της ειδικής επιφάνειας (specific surface area) του χόματος ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$),
 r : ακτίνα του κόκκου χόματος (m),
 ρ : πυκνότητα του χόματος (θεωρήθηκε ότι: $\rho_{sl} = \rho_{ms} = \rho_{ms}$).

Σε πολλές περιπτώσεις, το εμβαδό της ειδικής επιφάνειας ενός δείγματος χόματος μπορεί να προκύψει άμεσα από κοκκομετρητές laser. Δείγματα μετακινούμενου χόματος πρέπει να συλλεχθούν κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος διάβρωσης, ενώ δείγματα αποτιθέμενου χόματος πρέπει να συλλεχθούν από τοποθεσίες απόθεσης αμέσως μετά από τέτοια συμβάντα. Εναλλακτικά, το εμβαδό της ειδικής επιφάνειας μπορεί να εξαχθεί αριθμητικά συγκρίνοντας την κατανομή των μεγεθών των διαφόρων κόκκων στο επιφανειακό έδαφος διαβρωμένων τοποθεσιών με εκείνη των τοποθεσιών που δεν έχουν υποστεί διάβρωση.

(γ) Κατά μάζα βάθος χαλάρωσης (*Relaxation mass depth*) H

Το κατά μάζα βάθος χαλάρωσης H (kg/m^2) χρησιμοποιείται για το ^{137}Cs και τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στα Μοντέλα Ισοζυγίου Μάζας 2 και 3 (Mass Balance Model 2, Mass Balance Model 3) για καλλιεργούμενα εδάφη καθώς και στο Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης (Diffusion and Migration Model) για μη καλλιεργούμενα εδάφη.

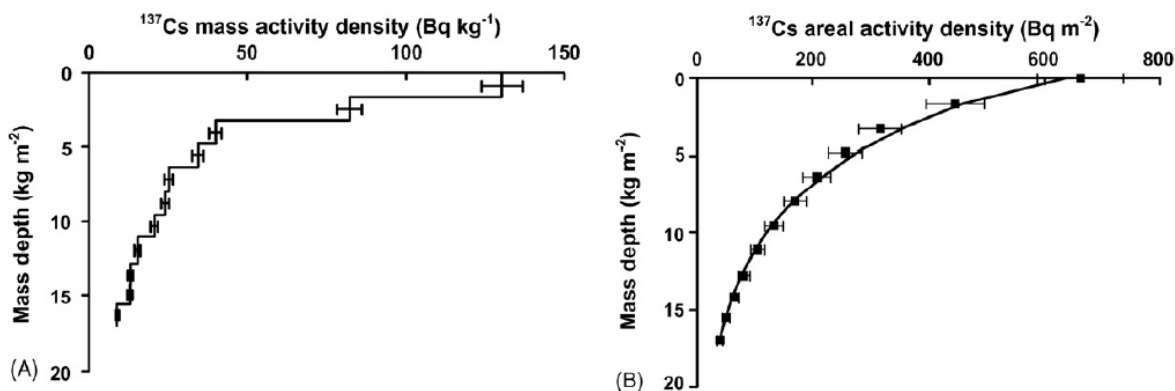
Το κατά μάζα βάθος χαλάρωσης H αντιπροσωπεύει την εκθετική κατά βάθος κατανομή των νεο-αποτιθέμενων ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους. Ορίζεται ως το κατά μάζα βάθος (mass depth) στο οποίο η συγκέντρωση του ραδιενεργού ισοτόπου έχει μειωθεί στο $1/e$ (δηλαδή περίπου στο 37%) της συγκέντρωσης, που έχει στο επιφανειακό χόμα.

Ο προσδιορισμός της παραμέτρου H είναι δύσκολος. Στην περίπτωση του ^{137}Cs , η σημερινή ροή εναπόθεσής του στο έδαφος είναι αμελητέα και είναι αδύνατο να αναπαραχθεί η κατάσταση που επικρατούσε κατά τη χρονική διάρκεια από τα τέλη της δεκαετίας του '50 έως τη δεκαετία του '60. Στην περίπτωση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, η εναπόθεση είναι συνεχής, οπότε καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της κατά βάθος κατανομής μιας νεο-εναπόθεσής του εάν είναι γνωστή η προϋπάρχουσα κατά βάθος κατανομή του και εάν είναι χαμηλή η προϋπάρχουσα επιφανειακή ραδιενέργειά του, όπως συμβαίνει σε εδάφη που έχουν πρόσφατα καλλιεργηθεί.

Εναλλακτικά, η παράμετρος H μπορεί να προσδιοριστεί με προσομοίωση της εισερχόμενης εναπόθεσης του ραδιενεργού ισοτόπου στην επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιώντας έναν προσομοιωτή βροχόπτωσης και προσδιορίζοντας την κατακόρυφη κατανομή της εναπόθεσής του στο έδαφος. Εάν δεν υπάρχουν τέτοιες εμπειρικές ή πειραματικές μετρήσεις, τότε ο προσδιορισμός της κατά βάθος κατανομής του ^7Be , μετά από μια εκτεταμένη περίοδο βροχοπτώσεων, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εδραίωση της πιθανής τιμής της παραμέτρου H για την περίπτωση των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Λόγω του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού του, η κατά βάθος κατανομή του ^7Be μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εκπρόσωπος των κατά βάθος κατανομών των νεο-αποτιθέμενων ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στο έδαφος, εάν θεωρηθεί ότι, μετά την εναπόθεσή τους στο έδαφος, η συμπεριφορά και των τριών ραδιενεργών ισοτόπων είναι παρόμοια.

Απουσία κάθε πληροφορίας για την παράμετρο H , συχνά χρησιμοποιείται η τιμή $4,0 \text{ kg m}^{-2}$ (Walling et al., 2002), η οποία βασίζεται σε διαθέσιμα εμπειρικά και πειραματικά στοιχεία, αλλά αναμένεται να διαφέρει αν πρόκειται για εδάφη με διαφορετικές ιδιότητες (He and Walling, 1997).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος με τον οποίο οι Schuller et al. (2007) επιχείρησαν τον προσδιορισμό της παραμέτρου H για τις τοπικές συνθήκες της υπό μελέτη περιοχής (πεδίο στην νοτιο-κεντρική Χιλή, με εναλλαγή από καλλιεργούμενο σε μη καλλιεργούμενο σύστημα, ιδιαίτερες τοπικές ιδιότητες εδάφους και έντονες βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια του χειμώνα). Συγκεκριμένα, στην επιφάνεια ενός μικρού πειραματικού αγροτεμαχίου, έκτασης $0,5 \text{ m}^2$, το χώμα του οποίου θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό του χώματος του υπό μελέτη πεδίου, απόθεσαν ομοιόμορφα χώμα χαρακτηρισμένο με ^{137}Cs . Το χαρακτηρισμένο χώμα δημιουργήθηκε με προσθήκη διαλύματος που περιέχει γνωστή ποσότητα ^{137}Cs σε χώμα, που είχε προηγουμένως συλλεχθεί από την επιφάνεια του πειραματικού αγροτεμαχίου. Προέκυψε, έτσι, μάζα $0,5 \text{ kg}$ κοσκινισμένου χώματος, που περιείχε περίπου $350 \text{ Bq } ^{137}\text{Cs}$. Η συγκεκριμένη ποσότητα ^{137}Cs επιλέχθηκε τέτοια ώστε να είναι η ελάχιστη δυνατή, που θα επέτρεπε αξιόπιστες μετρήσεις της ειδικής ραδιενέργειας του ^{137}Cs , χρησιμοποιώντας γεωμετρία “Petri dish” και με όριο ανίχνευσης 10 Bq kg^{-1} . Οι αξιόπιστες μετρήσεις της κατακόρυφης κατανομής του ^{137}Cs είναι απαραίτητες προκειμένου να προσδιοριστεί το κατά μάζα βάθος χαλάρωσης H του νεο-αποτιθέμενου ^{137}Cs . Η τιμή του κατά μάζα βάθους χαλάρωσης, που υπολογίστηκε με αυτόν τον τρόπο, από την προκύπτουσα κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs (Εικόνα 4.58), ήταν $H=6,2 \pm 0,3 \text{ kg m}^{-2}$ και αντιστοιχεί σε βάθος 8 mm περίπου. Αυτή η τιμή είναι λίγο μεγαλύτερη από την τυπική τιμή $4,0 \text{ kg m}^{-2}$, που προτείνουν οι Walling et al. (2002) (πίνακας Εικόνας 4.65), αποτέλεσμα, που ενδεχομένως οφείλεται στις έντονες βροχοπτώσεις, που δέχτηκε το υπό μελέτη πεδίο και/ή στις ιδιότητες των τοπικών εδαφών.



Εικόνα 4.57

- (A) Η αρχική κατανομή του νεο-αποτιθέμενου ^{137}Cs , η οποία προέκυψε αποθέτοντας χαρακτηρισμένο χώμα σε μικρό πειραματικό αγροτεμάχιο, στη Χιλή.
 (B) Ο προσδιορισμός του κατά μάζα βάθους χαλάρωσης: $H=6,2 \pm 0,3 \text{ kg m}^{-2}$ για το ^{137}Cs , χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.57A.

(Schuller et al., 2007)

(δ) Παράγοντας αναλογίας (*Proportion factor*) γ

Ο παράγοντας αναλογίας γ χρησιμοποιείται για το ^{137}Cs και τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στα μοντέλα μετατροπής Ισοζυγίου Μάζας 2 και 3 (Mass Balance Model 2, Mass Balance Model 3) για καλλιεργούμενα εδάφη.

Αντιπροσωπεύει το ποσοστό της ετήσιας εναπόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων που μετακινούνται από ισχυρές βροχοπτώσεις πριν ενσωματωθούν στο χώμα από τις εργασίες καλλιέργειας.

Εξαρτάται από τη χρονική κατανομή των τοπικών βροχοπτώσεων σε σχέση με τη χρονική περίοδο της καλλιέργειας και μπορεί να εκτιμηθεί από διαθέσιμες μακροχρόνιες καταγραφές βροχοπτώσεων καθώς και πληροφορίες για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο πραγματοποιούνται οι εργασίες καλλιέργειας του εδάφους στην υπό μελέτη τοποθεσία.

- Σε περιοχές, όπου η ετήσια υγρή εποχή των ισχυρών βροχοπτώσεων συμβαίνει *λίγο πριν* την εποχή μιας εργασίας καλλιέργειας, η ήδη συσσωρευμένη στην επιφάνεια του εδάφους εναπόθεση των ραδιενεργών ισοτόπων καθώς επίσης και η επιπρόσθετη εναπόθεσή τους, που σχετίζεται άμεσα με τις ισχυρές βροχοπτώσεις, υπόκεινται σε μετακίνηση λόγω διάβρωσης, οπότε η τιμή του παράγοντα αναλογίας γ θεωρείται περίπου ίση με 1,0.
- Σε περιοχές, όπου η ετήσια υγρή εποχή των ισχυρών βροχοπτώσεων συμβαίνει *αμέσως μετά* το πέρας μιας εργασίας καλλιέργειας, η ποσότητα των ραδιενεργών ισοτόπων, που έχει ήδη εναποτεθεί στο έδαφος, έχει ενσωματωθεί μέσα στο στρώμα του οργώματος με τις εργασίες της καλλιέργειας, οπότε μόνο η εναπόθεση των ραδιενεργών ισοτόπων, που σχετίζεται άμεσα με τις ισχυρές βροχοπτώσεις αμέσως μετά την καλλιέργεια, υπόκεινται σε μετακίνηση λόγω διάβρωσης. Σε αυτήν την περίπτωση, η τιμή του παράγοντα αναλογίας γ μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από το λόγο του ύψους της βροχοπτώσεως κατά τη διάρκεια της κύριας περιόδου των σφοδρών βροχοπτώσεων προς αυτό της συνολικής ετήσιας βροχοπτώσεως.
- Εάν υπάρχουν περισσότερες από μία εργασίες καλλιέργειας, τότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η χρονική περίοδος των βροχοπτώσεων σε σχέση με αυτήν της κάθε εργασίας καλλιέργειας.

(ε) Σταθερά καλλιέργειας (*Tillage constant*) ϕ

Η επίδραση της καλλιέργειας στην ανακατανομή του ^{137}Cs και του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ενσωματώνεται στο Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας 3, κάνοντας χρήση της σταθεράς καλλιέργειας ϕ ($\text{kg m}^{-1} \text{yr}^{-1}$), η οποία αντιπροσωπεύει μια ανεξαρτήτου κλίσης ειδική ροή χώματος, στην οποία αποδίδεται ίδια τιμή για ολόκληρη τη χρονική περίοδο που ερευνάται (περίπου 40 έτη για το ^{137}Cs και 100 έτη για τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη χρονικές και χωρικές μεταβολές. Παρόλο που υπάρχουν κάποια διαθέσιμα δεδομένα για την τιμή της σταθεράς καλλιέργειας, που σχετίζονται με ειδικά γεωργικά εργαλεία, η άμεση εφαρμογή τέτοιων τιμών στα μοντέλα μετατροπής είναι συχνά περίπλοκη επειδή χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η χρήση διαφορετικών τέτοιων εργαλείων σε χρονική διάρκεια μερικών δεκαετιών.

Μια εναλλακτική μέθοδος για τον προσδιορισμό της σταθεράς καλλιέργειας ϕ είναι η χρήση της παραμένουσας απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων σε τοποθεσίες που υπόκεινται

σε διάβρωση στην κορυφή της πλαγιάς, όπου η υδατική διάβρωση και η απόθεση ιζημάτων θεωρείται αμελητέα λόγω της απουσίας κάποιου ανώτερου τμήματος που συνεισφέρει στην απορροή. Έτσι, παρόλο που, γενικά ο ρυθμός διάβρωσης λόγω καλλιέργειας R ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) μπορεί να υπολογιστεί από τη μετρούμενη συνολική παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs $A(t)$ (Bq m^{-2}) ενός σημείου που υπόκεινται σε διάβρωση από την εξίσωση (Γ.19) (Βλ. Παράρτημα Γ), εντούτοις, με την παραδοχή ότι *δε συμβαίνει σημαντική υδατική διάβρωση*, ο ρυθμός διάβρωσης λόγω καλλιέργειας R_1 ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) υπολογίζεται από τη μετρούμενη συνολική παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs $A_1(t)$ (Bq m^{-2}) του σημείου της κορυφής της πλαγιάς με την εξίσωση (Γ.19) να διαμορφώνεται ως εξής:

$$A_1(t) = A_1(t_0) \cdot e^{-(R_1/d+\lambda)(t-t_0)} + \int_{t_0}^t I(t') \cdot e^{-(R_1/d+\lambda)(t+t')} \cdot dt' \quad (4.15)$$

Η σταθερά καλλιέργειας ϕ μπορεί, -τότε-, να υπολογιστεί από το ρυθμό διάβρωσης R_1 ως εξής:

$$\phi = \frac{R_{t,out,1} \cdot L_1}{\sin \beta_1} = \frac{R_1 \cdot L_1}{\sin \beta_1} \quad (4.16)$$

(στ) Παράγοντας μορφής του προφίλ (*Profile shape factor*) h_0

Ο παράγοντας μορφής του προφίλ h_0 (kg m^{-2}) χρησιμοποιείται για το ^{137}Cs στο Μοντέλο Κατανομής-Προφίλ (Profile Shape Model) για μη καλλιεργούμενα εδάφη, καθώς επίσης και για το ^7Be στο Μοντέλο Κατανομής-Προφίλ (Profile Shape Model) για καλλιεργούμενα και μη καλλιεργούμενα εδάφη.

Ο παράγοντας μορφής του προφίλ h_0 (kg m^{-2}) περιγράφει το ρυθμό της εκθετικής μείωσης της ειδικής ραδιενέργειας (Bq kg^{-1}) ή της παραμένουσας απόθεσης (Bq m^{-2}) των ^{137}Cs και ^7Be με το βάθος στο προφίλ του εδάφους σε τοποθεσία αναφοράς (Εικόνες 4.58 και 4.59). Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του h_0 τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση του ραδιενεργού ισοτόπου στο προφίλ του εδάφους. Ο h_0 μπορεί να εκτιμηθεί με προσαρμογή της καμπύλης της εκθετικής συνάρτησης:

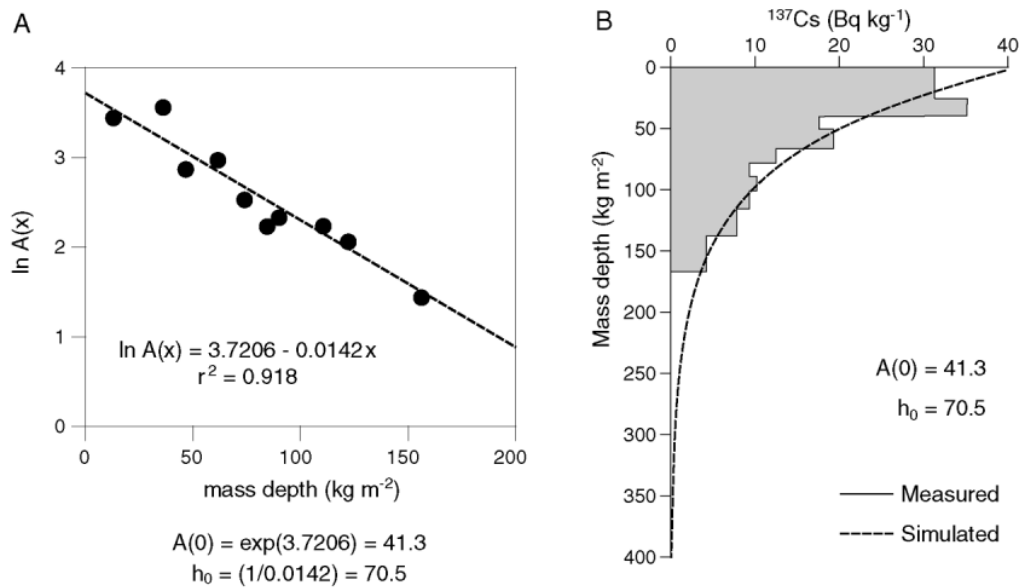
$$f(z) = f(0) \cdot e^{-z/h_0} \quad (4.17)$$

όπου:

- z : το κατά μάζα βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (kg m^{-2}),
- $f(z)$: η ειδική ραδιενέργεια (Bq kg^{-1}) ή η παραμένουσα απόθεση (Bq m^{-2}) του ραδιενεργού ισοτόπου στο κατά μάζα βάθος z ,
- $f(0)$: η ειδική ραδιενέργεια (Bq kg^{-1}) ή η παραμένουσα απόθεση (Bq m^{-2}) του ραδιενεργού ισοτόπου στην επιφάνεια του εδάφους, χρησιμοποιώντας την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων (Εικόνα 4.58Α).

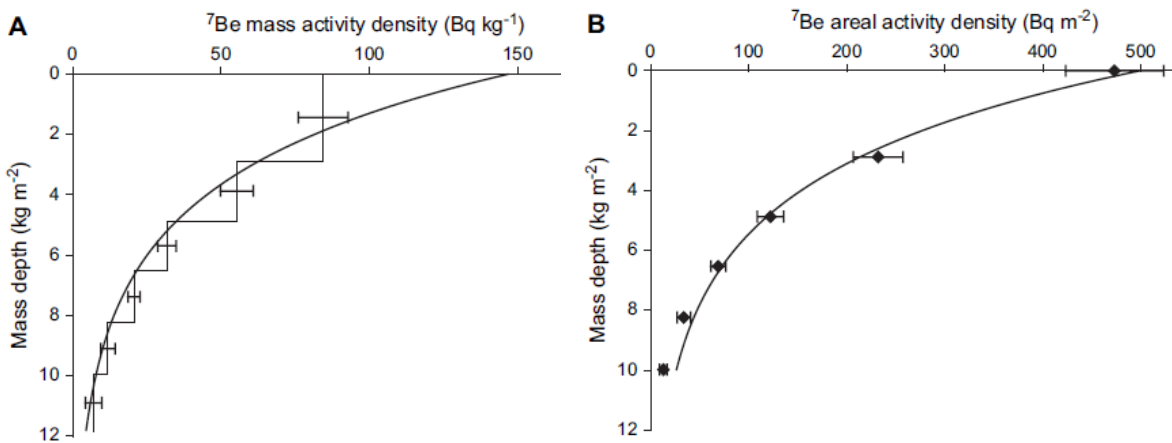
Στην περίπτωση του ^7Be , λόγω του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού του, η τιμή του παράγοντα μορφής του προφίλ h_0 είναι πολύ μικρότερη (π.χ. $<20 \text{ kg m}^{-2}$) από αυτή του ^{137}Cs . Η τιμή του h_0 του ^7Be είναι πιθανά παρόμοια με την τιμή του κατά μάζα βάθους χαλάρωσης

H , που χρησιμοποιείται στα μοντέλα μετατροπής για το ^{137}Cs και τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, αντιπροσωπεύοντας το βάθος χαλάρωσης των νεο-αποτιθέμενων ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 4.58

Προσαρμογή της εκθετικής συνάρτησης 4.17 της κατά βάθος κατανομής της ειδικής ραδιενέργειας του ^{137}Cs σε τοποθεσία αναφοράς. **A)** Εκτίμηση των $A(0) = 41,3 \text{ Bq kg}^{-1}$ και $h_0 = 70,5 \text{ kg m}^{-2}$ από την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων. **B)** Τοποθέτηση της καμπύλης της εκθετικής συνάρτησης 4.17 πάνω από τη μετρούμενη κατά βάθος κατανομή της ειδικής ραδιενέργειας του ^{137}Cs . (Porto et al., 2001)



Εικόνα 4.59

Προσαρμογή της εκθετικής συνάρτησης 4.17 της κατά βάθος κατανομής της ειδικής ραδιενέργειας (Bq g^{-1}) και της παραμένουσας απόθεσης (Bq m^{-2}) του ^7Be σε τοποθεσία αναφοράς.

A) Τοποθέτηση της καμπύλης της εκθετικής συνάρτησης 4.17 πάνω από τη μετρούμενη κατά βάθος κατανομή της ειδικής ραδιενέργειας του ^7Be , με εκτίμηση των $C_{\text{ref}}(0) = 147 \text{ Bq kg}^{-1}$ και $h_0 = 3,4 \text{ kg m}^{-2}$.

B) Τοποθέτηση της καμπύλης της εκθετικής συνάρτησης 4.17 πάνω από τη μετρούμενη κατά βάθος κατανομή της παραμένουσας απόθεσης του ^7Be , με εκτίμηση των $A_{\text{ref}}(0) = 499 \text{ Bq m}^{-2}$ και $h_0 = 3,4 \text{ kg m}^{-2}$.

(Sepulveda et al., 2008)

(ζ) Συντελεστής διάχυσης (*Diffusion coefficient*) D και
 (η) Ρυθμός μετανάστευσης (*Migration rate*) V

Ο συντελεστής διάχυσης D ($\text{kg}^2 \text{m}^{-4} \text{yr}^{-1}$) και ο ρυθμός μετανάστευσης V ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) χρησιμοποιούνται στο Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης (Diffusion and Migration Model) και αντιπροσωπεύουν τη χρονική εξέλιξη της μορφής του προφίλ των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε μη καλλιεργούμενα εδάφη. Μεγάλες τιμές των D και V υποδηλώνουν βαθύτερη διείσδυση των ραδιενεργών ισοτόπων στο προφίλ του εδάφους. Οι τιμές των παραμέτρων D και V επηρεάζονται από το μέγεθος του βήματος της κατά βάθος δειγματοληψίας, οπότε είναι σημαντική η απόκτηση λεπτομερών πληροφοριών της κατακόρυφης κατανομής των ραδιενεργών ισοτόπων.

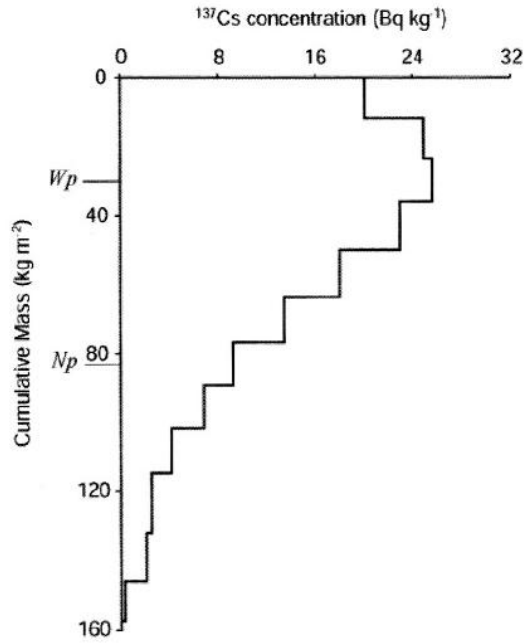
- ο Στην περίπτωση του ^{137}Cs , τιμές των D και V μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$D \approx \frac{(N_p - W_p)^2}{2 \cdot (t - 1963)} \tag{4.18}$$

$$V \approx \frac{W_p}{t - 1963} \tag{4.19}$$

όπου:

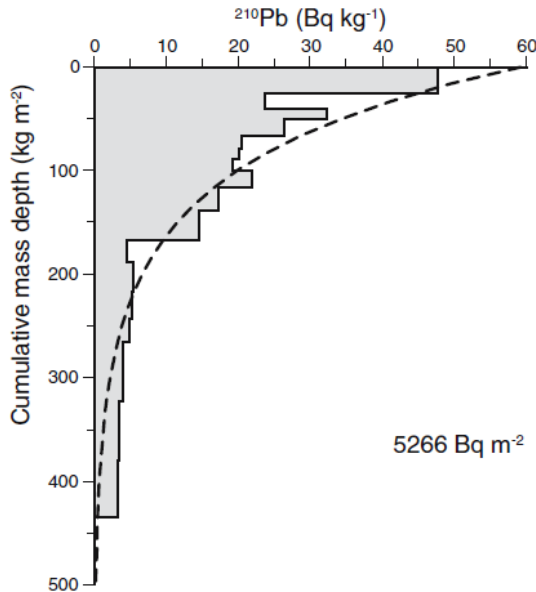
- t : το έτος συλλογής του δείγματος του χώματος (yr),
- W_p : το κατά μάζα βάθος της μέγιστης συγκέντρωσης ^{137}Cs (kg m^{-2}) (Εικόνα 4.60),
- N_p : το κατά μάζα βάθος στο οποίο η συγκέντρωση του ^{137}Cs μειώνεται στο 1/e ($\approx 37\%$) της μέγιστης συγκέντρωσής του (kg m^{-2}) (Εικόνα 4.60).



Εικόνα 4.60
 Τυπική κατά βάθος κατανομή της ειδικής ραδιενέργειας του ^{137}Cs σε μη καλλιεργούμενο έδαφος. Στον άξονα του κατά μάζα βάθους σημειώνονται οι τιμές των μεγεθών W_p και N_p .
 (Walling et al., In: Zapata (ed), 2002, pp. 111-162)

- Στην περίπτωση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, η σχέση μεταξύ των D και V είναι η εξής:

$$\beta = \frac{1}{h_0} = 0,5 \times \left(\sqrt{\frac{V^2}{D^2} + \frac{4\lambda}{D}} - \frac{V}{D} \right) \quad (4.20)$$



Εικόνα 4.61

Η κατά βάθος κατανομή του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ για την τοποθεσία αναφοράς και το αποτέλεσμα της προσαρμογής της εκθετικής συνάρτησης 4.17 της κατά βάθος κατανομής της ειδικής ραδιενέργειας του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε τοποθεσία αναφοράς. Η εκτιμώμενη τιμή για το $\beta=0,91\text{kgm}^{-2}$ αποκτήθηκε μεταβάλλοντας τις τιμές των D και V ώστε να ελαχιστοποιηθεί το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων μεταξύ της θεωρητικής και της πειραματικής κατά βάθος κατανομής. (Porto et al., 2006)

(θ) Ετήσια ροή εναπόθεσης (*Annual deposition flux*) $I(t)$

Η ετήσια ροή εναπόθεσης $I(t)$ ($\text{Bq m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) χρησιμοποιείται για το ^{137}Cs και τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στα Μοντέλα Ισοζυγίου Μάζας 2 και 3 (Mass Balance Model 2, Mass Balance Model 3) για καλλιεργούμενα εδάφη καθώς και στο Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης (Diffusion and Migration Model) για μη καλλιεργούμενα εδάφη.

- Για τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, η ετήσια ροή εναπόθεσης⁽⁴³⁾ I ($\text{Bq m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) θεωρείται σταθερή στο χρόνο και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παραμένουσα απόθεση αναφοράς A_{ref} (Bq m^{-2}) και θεωρώντας μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ της ετήσιας εισροής και της απώλειας λόγω ραδιενεργού διάσπασης:

$$I = A_{\text{ref}} \cdot \lambda \quad (4.21)$$

όπου η σταθερά ραδιενεργού διάσπασης λ (yr^{-1}) δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} \quad (= 0,031 \text{ yr}^{-1}) \quad (4.22)$$

και ο χρόνος υποδιπλασιασμού του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ είναι: $T_{1/2}=22,3\text{yrs}$.

⁽⁴³⁾ Για τιμές της ροής εναπόθεσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, βλ. § 3.9.3

- Για το ^{137}Cs , η ετήσια ροή εναπόθεσης από το 1954, γενικά, δεν είναι γνωστή, παρά μόνο σε πολύ λίγες τοποθεσίες. Έτσι, το λογισμικό⁽⁴⁴⁾, που σχετίζεται με τα μοντέλα μετατροπής, χρησιμοποιεί την τιμή της παραμένουσας απόθεσης αναφοράς καθώς και γενικευμένες πληροφορίες για τη χρονική κατανομή της ετήσιας εναπόθεσης του ^{137}Cs για να συνθέσει την ετήσια σειρά για μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Υποθέτοντας ότι η υπό μελέτη τοποθεσία έχει την ίδια σχετική ετήσια κύμανση με εκείνη της τοποθεσίας αναφοράς, η τοπική ετήσια ροή εναπόθεσης⁽⁴⁵⁾ $I(t)$ για το ^{137}Cs μπορεί να προκύψει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I(t) = \alpha \cdot I_n(t) \quad (4.23)$$

$$\alpha = \frac{A_{ref}}{\int_{1954}^t I_n(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt'} = \frac{A_{ref}}{A_n} \quad (4.24)$$

όπου:

- $I_n(t)$: η ετήσια ροή εναπόθεσης του ^{137}Cs στην τοποθεσία αναφοράς ($\text{Bq m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$),
- A_n : η τρέχουσα *συνολική* παραμένουσα απόθεση της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης του ^{137}Cs στο έδαφος της τοποθεσίας αναφοράς (Bq m^{-2}).

- **Παρατηρήσεις για τις περιοχές που επηρεάστηκαν από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl**

Τα μοντέλα μετατροπής είναι δυνατό να εφαρμοστούν για τοποθεσίες, των οποίων οι παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs λόγω Chernobyl είναι $<1 \text{ kBq m}^{-2}$ ή $>5 \text{ kBq m}^{-2}$. Περιορισμοί υπάρχουν για τις περιοχές, που επηρεάστηκαν από το Chernobyl, αλλά οι παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs κυμαίνονται από $1\text{-}5 \text{ kBq m}^{-2}$, διότι, εκτός από τις τοποθεσίες αναφοράς, δεν μπορεί να διαχωριστεί η συνεισφορά του προερχόμενου από τις πυρηνικές δοκιμές ^{137}Cs από αυτή του Chernobyl (Golosov, In: Zapata (ed), 2002, pp.165-183).

Σε περιοχές με χαμηλά επίπεδα ^{137}Cs λόγω Chernobyl (δηλ., παραμένουσες αποθέσεις $<1 \text{ kBq m}^{-2}$), κάποια μοντέλα μετατροπής για καλλιεργούμενα εδάφη, όπως είναι το Αναλογικό Μοντέλο μπορούν να εφαρμοστούν, χωρίς τροποποιήσεις. Εντούτοις, στο Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας 3, το οποίο λαμβάνει υπόψη και την επίδραση της καλλιέργειας, θα πρέπει να συμπεριληφθεί και η επιπλέον ροή εναπόθεσης του ^{137}Cs που προέρχεται από το Chernobyl.

Οι περιοχές με υψηλά επίπεδα ^{137}Cs λόγω Chernobyl (δηλ., παραμένουσες αποθέσεις $>5 \text{ kBq m}^{-2}$) ταξινομούνται σύμφωνα με το μέγεθος της αναλογίας: εναπόθεση ^{137}Cs προερχόμενου από το Chernobyl προς εναπόθεση ^{137}Cs προερχόμενου από πυρηνικές δοκιμές.

- Εάν η αναλογία είναι μικρότερη από 4:1, δεν συνιστάται να χρησιμοποιούνται τα μοντέλα μετατροπής διότι η ανακατανομή του προερχόμενου από τις πυρηνικές δοκιμές ^{137}Cs μπορεί να εισάγει επιπρόσθετες αβεβαιότητες.
- Εάν η αναλογία είναι μεγαλύτερη από 4:1, δηλαδή για περιοχές που επηρεάστηκαν σημαντικά από το Chernobyl, πρέπει, στα μοντέλα μετατροπής, ο χρόνος έναρξης της εναπόθεσης του ^{137}Cs στο έδαφος να τροποποιηθεί στον Μάιο 1986.

⁽⁴⁴⁾ Βλ. § 4.9.5

⁽⁴⁵⁾ Για τιμές της ροής εναπόθεσης του ^{137}Cs , βλ. § 3.9.4

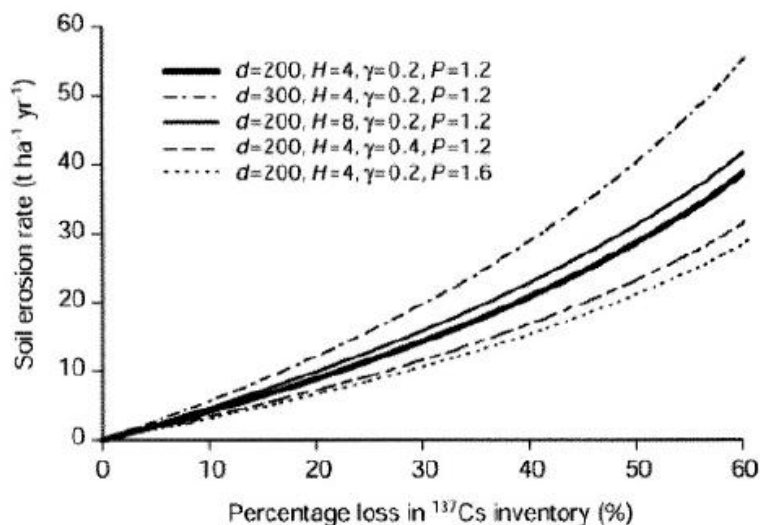
- **Αβεβαιότητες στην εκτίμηση των ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων που σχετίζονται με τις τιμές των παραμέτρων των μοντέλων μετατροπής**

Οι ρυθμοί διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων, που προκύπτουν από τα μοντέλα μετατροπής, εξαρτώνται τόσο από την επιλογή του εφαρμοζόμενου μοντέλου όσο και από τον προσδιορισμό των παραμέτρων που επηρεάζονται σε αυτά (Matisoff, 2014). Έτσι, γίνεται προσπάθεια τυποποίησης των μοντέλων μετατροπής ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή τους από ερευνητές διαφορετικών χωρών με διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες προκειμένου να παράγονται αποτελέσματα, τα οποία να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Παρόλα αυτά, εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη πληροφόρησης και καθοδήγησης όσον αφορά στον ακριβή προσδιορισμό κάποιων από τις παραμέτρους που σχετίζονται με τα μοντέλα μετατροπής (Iurian et al., 2014).

Τα διαγράμματα των Εικόνων 4.62, 4.63 και 4.64 παρουσιάζουν την ευαισθησία των προβλέψεων κάποιων μοντέλων στις τιμές διαφόρων παραμέτρων τους, ενώ ο πίνακας της εικόνας 4.65 περιλαμβάνει τις τυπικές τιμές των σημαντικότερων παραμέτρων, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι οι Iurian et al. (2014), σχολιάζοντας το διάγραμμα της Εικόνας 4.62, διαπιστώνουν ότι το Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης (Diffusion and Migration Model, DMM), που εφάρμοσαν για το ^{137}Cs σε περιοχή της Τρανσυλβανίας στη Ρουμανία, η οποία επηρεάστηκε από του πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl, παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις τιμές των εξής παραμέτρων:

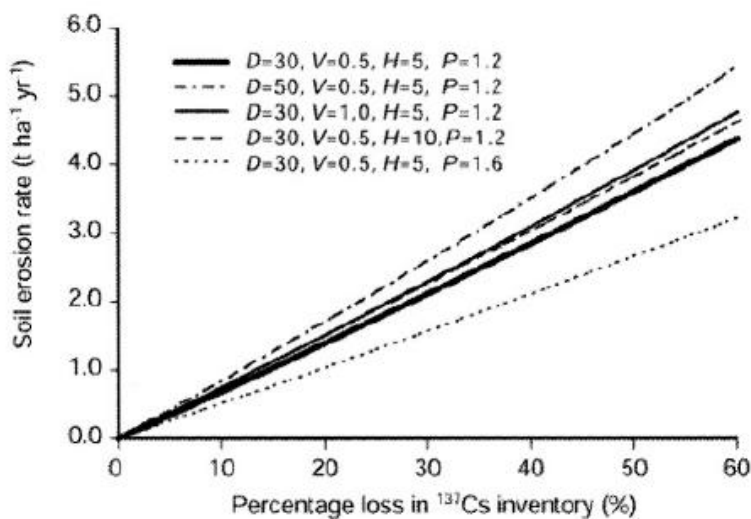
- Μια μικρή αύξηση της τάξεως του 15% της παραμένουσας απόθεσης αναφοράς, η οποία θεωρείται αποδεκτή αβεβαιότητα μέτρησης, χωρίς καμία αλλαγή στις άλλες παραμέτρους του μοντέλου, επιφέρει μια αύξηση περίπου 100% στους καθαρούς ρυθμούς διάβρωσης της περιοχής που ερευνάται.
- Αγνοώντας τον συντελεστή διόρθωσης μεγέθους των κόκκων χώματος ή θέτοντάς τον ίσο με 1, ο εκτιμώμενος καθαρός ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται κατά 80%.
- Εάν η παρατηρούμενη συνεισφορά 72% από το Chernobyl αλλαχθεί σε 80% και 25%, ο εκτιμώμενος από το μοντέλο καθαρός ρυθμός διάβρωσης θα προκύψει 125% υψηλότερος και 74% χαμηλότερος, αντίστοιχα.
- Το μοντέλο είναι λιγότερο ευαίσθητο στις διαφορετικές τιμές του συντελεστή διάχυσης D και του ρυθμού μετανάστευσης V , που υπολογίστηκαν με δύο διαφορετικούς τρόπους, αλλά βρίσκονταν μέσα στο εύρος τιμών που καθορίζουν οι Walling et al., 2002 (πίνακας Εικόνας 4.65).



Εικόνα 4.63

Σχέσεις μεταξύ της εκατοστιαίας μείωσης της παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs και του ρυθμού διάβρωσης, που προέκυψαν από τη χρήση του Βελτιωμένου Μοντέλου Ισοζυγίου Μάζας (*Mass Balance Model 2*) για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων: κατά μάζα βάθος οργώματος (d), κατά μάζα βάθος χαλάρωσης (H), παράγοντας αναλογίας (γ) και παράγοντας διόρθωσης μεγέθους των κόκκων χώματος για τοποθεσίες διάβρωσης (P).

(Walling et al., In: Zapata (ed), 2002, pp. 111-162)



Εικόνα 4.64

Σχέσεις μεταξύ της εκατοστιαίας μείωσης της παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs και του ρυθμού διάβρωσης, που προέκυψαν από τη χρήση του Μοντέλου Διάχυσης και Μετανάστευσης (*Diffusion and Migration Model*) για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων: συντελεστής διάχυσης (D), ρυθμός μετανάστευσης (V), κατά μάζα βάθος χαλάρωσης (H) και παράγοντας διόρθωσης μεγέθους των κόκκων χώματος για τοποθεσίες διάβρωσης (P).

(Walling et al., In: Zapata (ed), 2002, pp. 111-162)

Εικόνα 4.65

Πίνακας με τις τυπικές τιμές των σημαντικότερων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα μετατροπής. (Walling et al., In: Zapata (ed), 2002, pp. 111-162)

Model	Parameter	Range of value
Simplified mass-balance model (Mass-Balance Model 1)	d	-0.1–0.3 m
	P	1.78–2.50 ^a
	λ	0.023
Improved Mass-balance model (Mass-Balance Model 2)	γ	$\gamma_{min}^{-1.0}$
	H	-4 kg m ^{-2a}
	d_m	-200 kg m ^{-2a}
	ν	-0.65 ^a
	P	1.78–2.50 ^a
	P'	0.46–0.60 ^a
	λ	0.023
Mass-balance model incorporating tillage (Mass-Balance Model 3)	γ	$\gamma_{min}^{-1.0}$
	H	-4 kg m ^{-2a}
	d	-200 kg m ^{-2a}
	ϕ	-10–500 kg m ⁻¹ yr ^{-1a}
	ν	-0.65 ^a
	P	1.78–2.50 ^a
	P'	0.46–0.60 ^a
Profile distribution model Diffusion and migration model	h_0	~100 kg m ⁻²
	D	20–65 kg ² m ⁻⁴ yr ^{-1a}
	V	0.2–2.0 kg m ⁻² yr ^{-1a}
	H	-5.0 kg m ^{-2a}
	ν	-0.75 ^a
	P	1.80–2.10 ^a
	P'	0.46–0.57 ^a

^aValues compiled in this table represent those obtained by the authors and/or those reported in the literature derived from specific study areas.

- λ : η σταθερά ραδιενεργού διάσπασης του ¹³⁷Cs (yr⁻¹),
 d : το βάθος της καλλιέργειας (m),
 d_m : το κατά μάζα βάθος της καλλιέργειας (kg m⁻²)
 ν : η σταθερά, που είναι εκθέτης στις εξισώσεις (4.13) και (4.14) των συντελεστών διόρθωσης μεγέθους των κόκκων χόματος,
 P : ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους των κόκκων χόματος (*particle size correction factor*) για τοποθεσίες διάβρωσης,
 P' : ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους των κόκκων χόματος (*particle size correction factor*) για τοποθεσίες απόθεσης ιζημάτων,
 H : το κατά μάζα βάθος χαλάρωσης (*relaxation mass depth*) (kg m⁻²),
 γ : ο παράγοντας αναλογίας (*proportion factor*)
 ϕ : η σταθερά καλλιέργειας (*tillage constant*) (kg m⁻¹ yr⁻¹),
 h_0 : ο παράγοντας μορφής του προφίλ (*profile shape factor*) (kg m⁻²),
 D : ο συντελεστής διάχυσης (*diffusion coefficient*) (kg² m⁻⁴ yr⁻¹),
 V : ο ρυθμός μετανάστευσης (*migration rate*) (kg m⁻² yr⁻¹).

4.9.5 Το λογισμικό που σχετίζεται με τα θεωρητικά μοντέλα μετατροπής

Το λογισμικό, που έχει αναπτυχθεί προκειμένου να μετατρέπονται οι παραμένουσες αποθέσεις των ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be σε ρυθμούς διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων, αποτελεί μια εφαρμογή Visual Basic (Visual Basic Application, VBA) και βασίζεται σε ένα τυπικό Microsoft (Ms) Excel Add-in αρχείο (radiocalc.xls).

Επιπλέον, περιλαμβάνει ένα αρχείο με δεδομένα βροχοπτώσεων για την περίπτωση που χρειάζεται να εκτιμηθεί κατά προσέγγιση η τοπική παραμένουσα απόθεση αναφοράς. Επίσης, περιλαμβάνει τη λίστα με τις τιμές της ετήσιας ροής απόθεσης του ^{137}Cs (βλ. πίνακα Εικόνας 3.107, §3.9.4), ενώ υπολογίζει και τις αντίστοιχες τιμές για τοποθεσίες που επηρεάστηκαν από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl.

Το λογισμικό έχει σχεδιαστεί ώστε να διαχειρίζεται τις εξισώσεις που περιγράφουν μαθηματικά (βλ. Παράρτημα ΣΤ) τα θεωρητικά μοντέλα μετατροπής για σημειακά δεδομένα κατά μήκος μιας μεμονωμένης διατομής.

Είναι ένα φιλικό προς το χρήστη λογισμικό (Εικόνα 4.66), το οποίο αναπτύχθηκε προκειμένου να διευκολυνθεί η εφαρμογή των θεωρητικών μοντέλων μετατροπής με έναν τυποποιημένο τρόπο και να προωθηθεί η χρήση του στην ευρύτερη επιστημονική κοινότητα ώστε να κατανοηθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί τους και να επιτευχθεί περαιτέρω βελτίωσή τους.

Εικόνα 4.66

*Περιβάλλον εργασίας του Microsoft Excel που σχετίζεται με τα μοντέλα μετατροπής.
(Final Report Appendices on Defra Project SP0413, 2005-2008)*

SITE INFORMATION:									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Site-id	Landuse	Easting	Northing	Height	Relief	Maximum_Slope	Average_convex_slope	Average_s
2	alp-a	a	338754	101478	166.8	23.1	10	7.6	6.5
3	arks-a	a	548752	233712	81.3	14.8	5.8	4.4	4.1
4	aston-a	a	350466	287553	247.3	29.9	7.3	6.8	6.6
5	bag-a	a	401985	206971	147	33.7	10.5	7.4	7.4

TRANSECT DATA:							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Sample-id	Cs-137 inventory	Easting	Northing	Height	Site-id	Project-id
2	13	1770	338681.7	101409.9	179.7	alp-a	SP0413
3	12	2171	338689.4	101416.2	178.0	alp-a	SP0413
4	11	2074	338702.5	101428.4	174.8	alp-a	SP0413
5	10	2629	338715.2	101441.4	172.5	alp-a	SP0413

MODEL PARAMETERS:							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Site_id	Model_id	Modelling_Year	Reference_inventory	Para_1	Value_1	Para_2
2	alp-a	2	2003	2845	Proportion factor	0.5	Relaxation depth
3	arks-a	2	2003	1800	Proportion factor	0.5	Relaxation depth
4	aston-a	2	2003	1970	Proportion factor	0.5	Relaxation depth
5	bag-a	2	2003	2081	Proportion factor	0.5	Relaxation depth

RESULTS				
	A	B	C	D
1	Site_ID	Gross	Net	Eroding_area
2	alp-a	3.8	3.8	53.6
3	arks-a	7.9	7.3	79.6
4	aston-a	3.2	0	39.97
5	bag-a	6.3	5.7	69.4

4.10 Παρουσίαση των εκτιμώμενων ρυθμών ανακατανομής του χώματος που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs

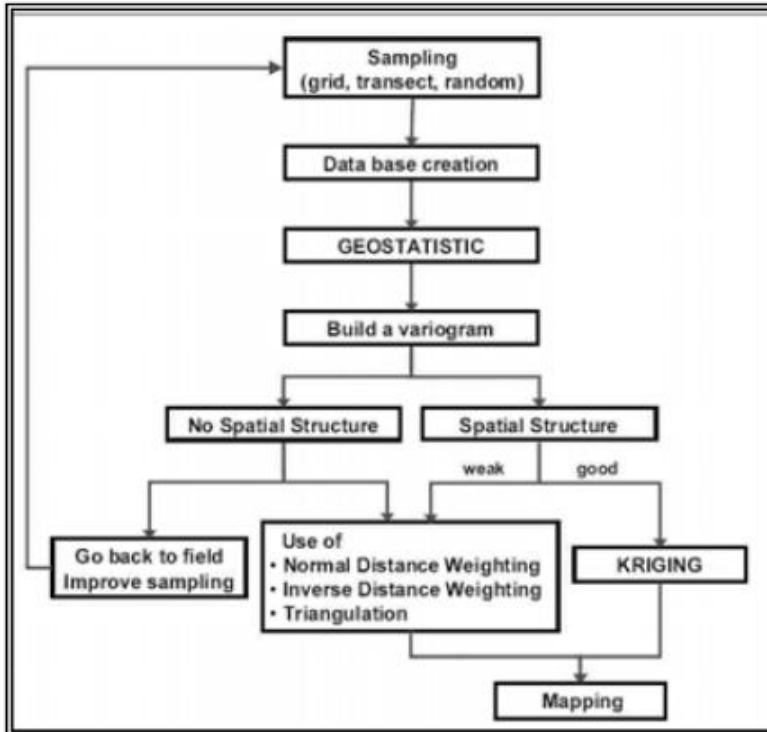
Η αξιοποίηση των ρυθμών ανακατανομής του χώματος στα υπό μελέτη πεδία, τα οποία προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs, γίνεται με τη βοήθεια των εξής παραμέτρων (Quine and Walling, 1991 και Walling and Quine, 1993):

- **Μέση διάβρωση** (mean erosion) του τμήματος του πεδίου, που έχει υποστεί διάβρωση: *το πηλίκο της συνολικής μάζας του προερχόμενου από διάβρωση χώματος προς το εμβαδό της επιφάνειας του τμήματος του πεδίου που υπέστη διάβρωση.*
- **Μικτή διάβρωση** (gross erosion) ολόκληρου του πεδίου: *το πηλίκο της συνολικής μάζας του προερχόμενου από διάβρωση χώματος προς το εμβαδό της επιφάνειας ολόκληρου του πεδίου.*
- **Μέση απόθεση** (mean deposition) του τμήματος του πεδίου, που έχει δεχθεί απόθεση ιζημάτων: *το πηλίκο της συνολικής μάζας του αποτιθέμενου χώματος προς το εμβαδό της επιφάνειας του τμήματος του πεδίου, όπου έχει συμβεί η απόθεση ιζημάτων.*
- **Μικτή απόθεση** (gross deposition) ολόκληρου του πεδίου: *το πηλίκο της συνολικής μάζας του αποτιθέμενου χώματος προς το εμβαδό της επιφάνειας ολόκληρου του πεδίου.*
- **Καθαρή διάβρωση** (net erosion): *εκφράζει την ποσότητα του χώματος, που εγκαταλείπει το πεδίο, και υπολογίζεται με τη διαφορά της μικτής διάβρωσης από τη μικτή απόθεση.*
- **Ποσοστό χώματος που εγκαταλείπει το πεδίο** (sediment delivery ratio, SDR): *το πηλίκο της καθαρής διάβρωσης προς τη μικτή διάβρωση.*

Να σημειωθεί ότι, προκειμένου να διακρίνονται μεταξύ τους οι διεργασίες ανακατανομής χώματος, έχει καθιερωθεί οι ρυθμοί διάβρωσης να παίρνουν αρνητικές τιμές, ενώ οι ρυθμοί απόθεσης θετικές τιμές

Το τελικό βήμα της παρουσίασης των ρυθμών ανακατανομής χώματος, που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs και εκφράζονται με τη βοήθεια των παραπάνω παραμέτρων, είναι η *απεικόνισή τους σε χάρτες* ανακατανομής χώματος. Η δημιουργία τέτοιου είδους χαρτών απαιτεί μια ειδική στατιστική αντιμετώπιση, με την οποία επιτυγχάνεται η περιγραφή της χωρικής κύμανσης της ανακατανομής του χώματος. Πιο συγκεκριμένα, οι παραμένουσες αποθέσεις των υπό μελέτη FRNs δεν κατανέμονται τυχαία σε μια τοποθεσία. Αντιθέτως, υπάρχει μια χωρική συσχέτιση, με την οποία μπορεί να ερμηνευθεί η χωρική κατανομή τους. Για την απεικόνιση αυτής της χωρικής κατανομής, επιστρατεύεται η *γεωστατιστική ανάλυση*⁽⁴⁶⁾ (Εικόνα 4.67). Η ακρίβεια τέτοιων χαρτών ανακατανομής χώματος εξαρτάται από τον αριθμό και τη χωρική κατανομή των δειγμάτων, που έχουν συλλεχθεί (π.χ. διατομές, πλέγματα).

⁽⁴⁶⁾ Περισσότερες λεπτομέρειες, όπως και σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές, περιλαμβάνουν οι Mabit et al., 2014, IAEA-TECDOC-1741, pp. 27-77.



Εικόνα 4.67

Πρωτόκολλο για την εφαρμογή της στατιστικής μεθόδου, η οποία μπορεί να περιγράψει τη χωρική κύμανση των ρυθμών ανακατανομής χώματος στα σημεία δειγματοληψίας και τη δημιουργία σχετικών χαρτών.

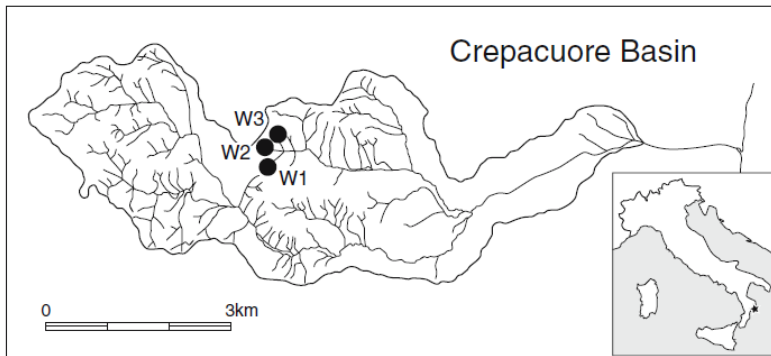
(Mabit et al.,2014, IAEA-TECDOC-1741, pp. 27-77)

Στη συνέχεια, επιλέγοντας ορισμένες **μελέτες περιπτώσεων**, που κάνουν χρήση της τεχνικής των FRNs για τον προσδιορισμό ρυθμών ανακατανομής χώματος, παρατίθενται **πίνακες** με τις εκτιμήσεις των ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων, που έχουν προκύψει παγκοσμίως για καλλιεργούμενα και μη καλλιεργούμενα εδάφη και για διαφορετικές χωρικές κλίμακες. Σε κάποιους από τους πίνακες, συμπεριλαμβάνονται και αντίστοιχα αποτελέσματα, που παρέχονται από την εφαρμογή των κλασσικών τεχνικών, προς σύγκρισή τους. Επίσης, παρεμβάλλονται **χάρτες**, οι οποίοι αισθητοποιούν τους ρυθμούς ανακατανομής χώματος και τους συσχετίζουν με τη μορφολογία των υπό μελέτη τοποθεσιών. Ένα από τα κριτήρια, με τα οποία έγινε η επιλογή μερικών πινάκων και χαρτών, ήταν να συμπεριληφθούν μελέτες περιπτώσεων γειτονικών και Μεσογειακών χωρών, διότι έχουν παρόμοιο κλίμα και παρόμοια εδάφη με αυτά της Ελλάδας.

- **Νότια Ιταλία** – Εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs ή / και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε μικρές λεκάνες απορροής (μη καλλιεργούμενα εδάφη) και σε πειραματικό αγροτεμάχιο (καλλιεργούμενα εδάφη)

Οι Porto et al. (2001, 2003, 2004) ανέφεραν καλή συμφωνία μεταξύ των εκτιμήσεων της καθαρής απώλειας χώματος από διάφορες μικρές λεκάνες απορροής (περίπου 1,5 ha) στη Νότια Ιταλία (Εικόνα 4.68), χρησιμοποιώντας μετρήσεις ^{137}Cs , και μετρήσεις του μέσου ετήσιου ιζήματος που παράχθηκε από αυτές τις λεκάνες απορροής κατά τη διάρκεια παρόμοιας περιόδου (Εικόνες 4.69 και 4.70). Αυτές οι μικρές λεκάνες απορροής ήταν καλυμμένες με βλάστηση δασική ή βοσκότοπου, δηλαδή *μη καλλιεργούμενα εδάφη*.

Προκειμένου να επιτευχθεί η επέκταση τέτοιων μελετών επικύρωσης, οι οποίες θα περιλαμβάνουν και τη χρήση μετρήσεων $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, οι Porto et al. (2006) μελέτησαν μη καλλιεργούμενες μικρές λεκάνες απορροής, (1,38 έως 1,65 ha) στη Νότια Ιταλία (Εικόνα 4.68) και ανέφεραν, επίσης, καλή συμφωνία παρόμοια με την παραπάνω (Εικόνες 4.71, 4.72 και 4.73).



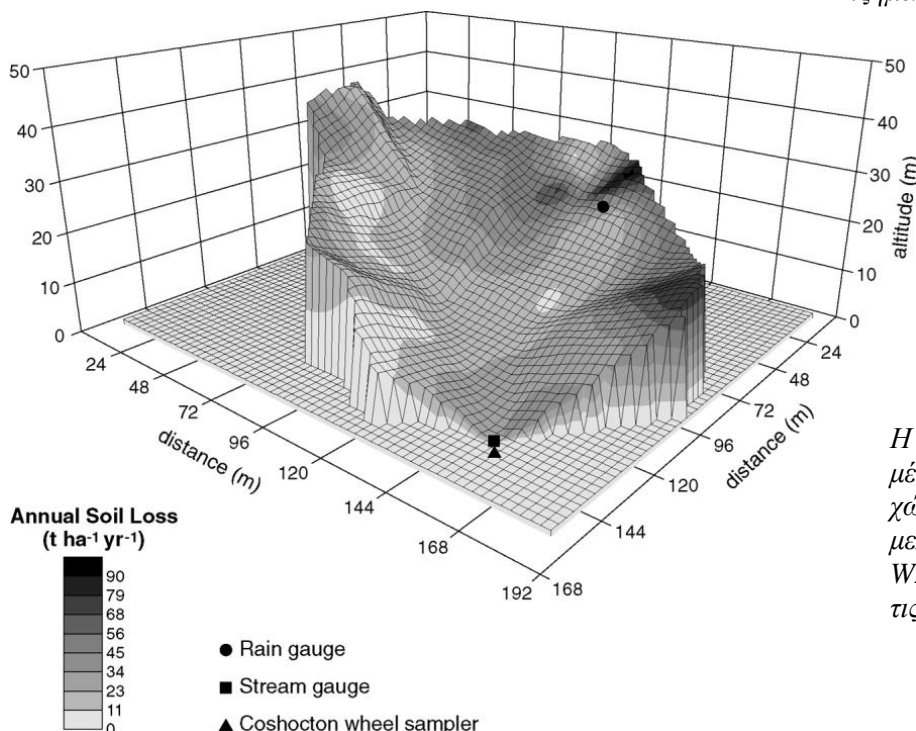
Εικόνα 4.68

Η τοποθεσία των υπό μελέτη λεκανών απορροής στη Νότια Ιταλία. (Porto et al., 2006)

Criterion	Erosion rate ($\text{t ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)
^{137}Cs Estimates	
1	29.0
2	29.5
3	28.4
Measured output	20.8

Εικόνα 4.69

Συγκριτικός πίνακας των εκτιμήσεων του μέσου ετήσιου ρυθμού διάβρωσης στην υπό μελέτη μη καλλιεργούμενη μικρή λεκάνη απορροής W2 στη Νότια Ιταλία, που προέκυψαν από μετρήσεις του ^{137}Cs χρησιμοποιώντας το Μοντέλο Κατανομής - Προφίλ, και του μετρούμενου μέσου ρυθμού εξαγωγής ιζημάτων. (Porto et al., 2001)



Εικόνα 4.70

Η χωρική κατανομή της μέσης ετήσιας απώλειας χώματος μέσα στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής W2, που εκτιμήθηκε από τις μετρήσεις του ^{137}Cs . (Porto et al., 2001)

Εικόνα 4.71

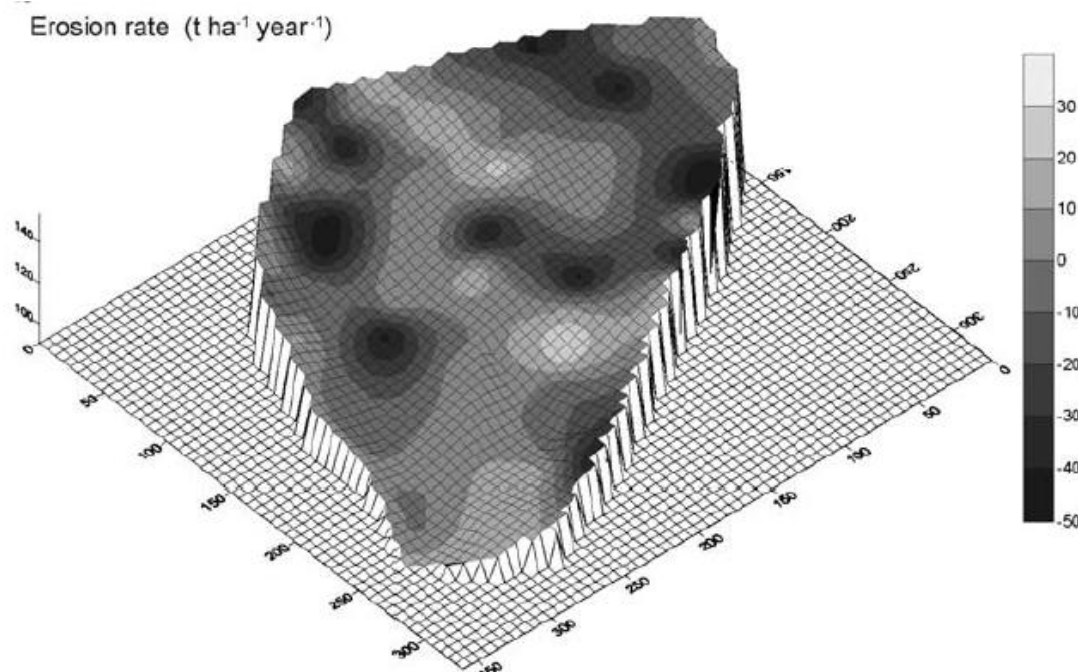
Πίνακας με τις τιμές της παραμένουσας απόθεσης του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και των εκτιμώμενων ρυθμών ανακατανομής χόματος μέσα στις υπό μελέτη μη καλλιεργούμενες μικρές λεκάνες απορροής W1, W2 και W3 στη Νότια Ιταλία. Οι εκτιμώμενοι ρυθμοί ανακατανομής χόματος προέκυψαν με εφαρμογή του θεωρητικού Μοντέλου Διάχυσης και Μετανάστευσης. (Porto et al., 2006)

Catchment	Min (Bq m ⁻²)	Max (Bq m ⁻²)	Mean (Bq m ⁻²)	Total soil erosion (t ha ⁻¹ year ⁻¹)	Total deposition (t ha ⁻¹ year ⁻¹)	Net soil erosion (t ha ⁻¹ year ⁻¹)
W1	50.5	22,373	6,499	13.9	7.66	6.2
W2	11.6	11,117	2,868	15.7	3.63	12.1
W3	49.6	16,322	7,438	20.6	9.5	11.1

Εικόνα 4.72

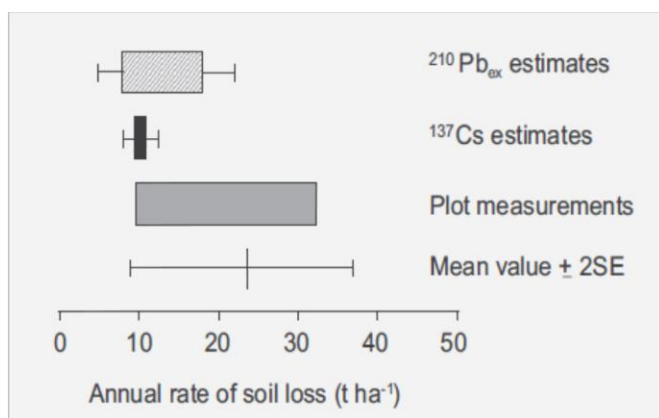
Συγκριτικός πίνακας των εκτιμήσεων των καθαρών ρυθμών διάβρωσης, που προέκυψαν για τις υπό μελέτη μη καλλιεργούμενες μικρές λεκάνες απορροής W1, W2 και W3 στη Νότια Ιταλία, χρησιμοποιώντας μετρήσεις ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, με τις εκτιμήσεις της μακροπρόθεσμης παραγωγής ιζημάτων, που μετρήθηκαν στις εξόδους των λεκανών απορροής. (Porto et al., 2006)

Catchment	Net soil erosion (t ha ⁻¹ year ⁻¹)		
	W1	W2	W3
^{137}Cs	8.6	14.0	11.3
^{210}Pb	6.2	12.1	11.1
Measured sediment yield	12.4	19.2	7.8

**Εικόνα 4.73**

Η χωρική κατανομή των ρυθμών ανακατανομής του χόματος στη λεκάνη απορροής W1, οι οποίοι εκτιμήθηκαν από τις μετρήσεις του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. (Porto et al., 2006)

Μια άλλη σύγκριση μεταξύ των μέσων ετήσιων ρυθμών διάβρωσης που εκτιμήθηκαν από μετρήσεις ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ με τις τιμές της ετήσιας απώλειας χώματος, που μετρήθηκαν από καλλιεργούμενα πειραματικά αγροτεμάχια στη Νότια Ιταλία (Porto and Walling, 2012), φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 4.74. Οι αποκλίσεις αποδόθηκαν στις βραχυχρόνιες άμεσες μετρήσεις της απώλειας χώματος, στο μικρό αριθμό συλλεγόμενων δειγμάτων, στην αδυναμία των πειραματικών αγροτεμαχίων να αντιπροσωπεύσουν την ευρύτερη περιοχή και στην πιθανότητα πρόσφατων αλλαγών στη διάβρωση λόγω βροχοπτώσεων.

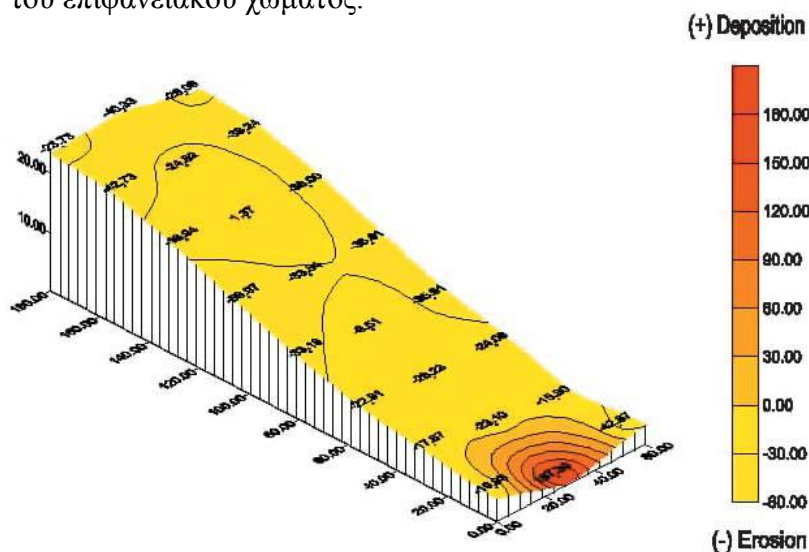


Εικόνα 4.74

Σύγκριση μεταξύ των μέσων ετήσιων ρυθμών διάβρωσης που εκτιμήθηκαν από μετρήσεις ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (χρησιμοποιώντας το Βελτιωμένο Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας, *Mass Balance Model 2*) με τις τιμές της ετήσιας απώλειας χώματος που μετρήθηκαν σε καλλιεργούμενα πειραματικά αγροτεμάχια στη Νότια Ιταλία (βλ. § 4. 8.2, Εικόνες 4.42, και 4.43). (Porto and Walling, 2012)

• **Κεντρική Ελλάδα** - Εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs για την εκτίμηση μακροχρόνιων ρυθμών διάβρωσης σε καλλιεργούμενα εδάφη

Από μελέτη στην περιοχή της Βοιωτίας στην Κεντρική Ελλάδα σχετικά με την υποβάθμιση του εδάφους και διαχείρισή του (Theocharopoulos et al., 2000, 2003), διαπιστώθηκε, ανάμεσα στ' άλλα, ότι η διάβρωση του εδάφους (χάρτης Εικόνας 4.75) και η απορροή του νερού επηρεάζονται από το όργωμα, την κλίση του εδάφους και τη διαχείριση του επιφανειακού χώματος.



Εικόνα 4.75

Εκτιμήσεις μακροχρόνιων ετήσιων ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης ($\text{t ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) σε καλλιεργούμενο έδαφος στο Μουρίκι Βοιωτίας, οι οποίες προέκυψαν από την εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs και τη χρήση του Μοντέλου Ισοζυγίου Μάζας που ενσωματώνει την επίδραση της καλλιέργειας (*Mass Balance Model 3*).

(Theocharopoulos et al., 2003)

Local Reference Inventory = 11821 Bq/m²
 Year of sample collection = 2000
 Plough depth = 0.2

- **Δυτική Τουρκία** - Εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs για την εκτίμηση ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης σε καλλιεργούμενα εδάφη

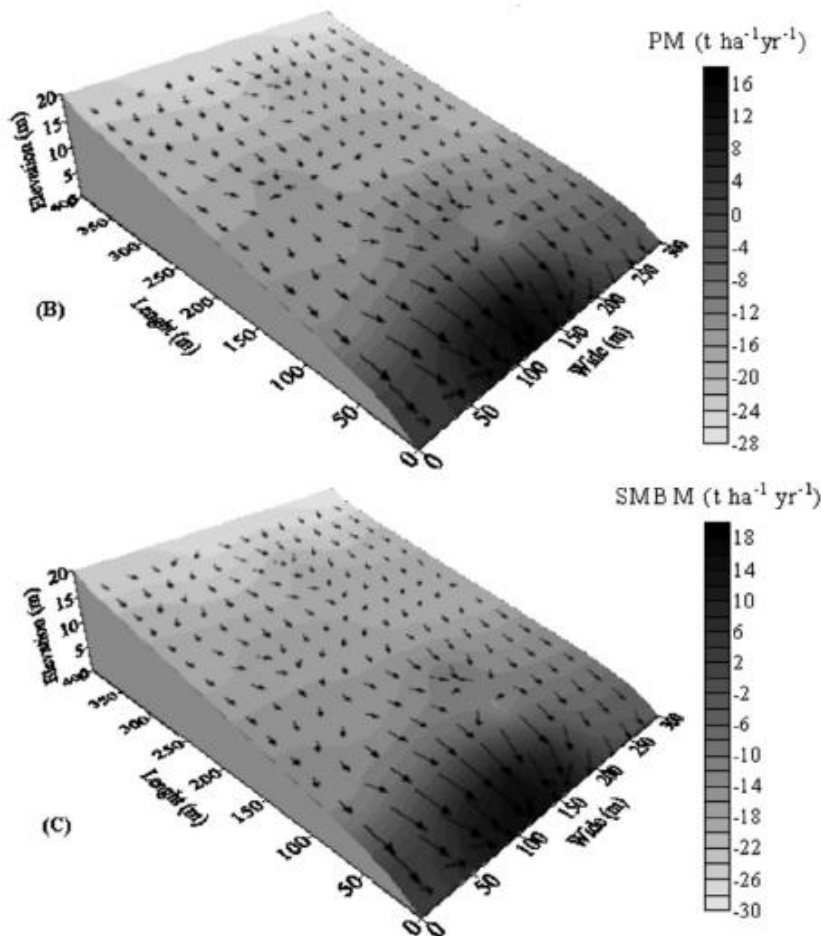
Επιτυχής χαρακτηρίστηκε η εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs για τη μελέτη της διάβρωσης καλλιεργούμενων περιοχών της Δυτικής Τουρκίας καθώς επίσης και χρήσιμη για την επιλογή κατάλληλων πρακτικών διαχείρισης του εδάφους (Murat and Ichedef, 2015). Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται στον πίνακα της Εικόνας 4.76 και στους χάρτες της Εικόνας 4.77.

Εικόνα 4.76

Πίνακας με τις μέσες τιμές της παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs καθώς και των ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης για καθένα από τα σημεία δειγματοληψίας σε καλλιεργούμενα εδάφη της περιοχής Salihli στη Δυτική Τουρκία. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα θεωρητικά μοντέλα: Αναλογικό Μοντέλο (Proportional Model, **PM**) και Απλοποιημένο Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας (Simplified Mass Balance Model, **SMBM** ή Mass Balance Model 1).

(Murat and Ichedef, 2015)

Locations	^{137}Cs inventory		PM		SMBM	
	Erosion sites (Bq m^{-2})	Deposition sites (Bq m^{-2})	Erosion rate ($\text{t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$)	Deposition rate ($\text{t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$)	Erosion rate ($\text{t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$)	Deposition rate ($\text{t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$)
S1	746	1130	-16.58	+8.62	-17.52	+9.57
S2	855	1322	-18.25	+9.62	-18.22	+11.31
S3	802	1308	-16.02	+7.42	-18.26	+8.45
S4	910	1460	-19.40	+6.80	-21.10	+7.21



Εικόνα 4.77

Χωρική κατανομή των ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης για την τοποθεσία δειγματοληψίας S1 στην τοποθεσία Salihli στη Δυτική Τουρκία.

Οι ρυθμοί διάβρωσης και απόθεσης έχουν προκύψει από την εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs χρησιμοποιώντας τα θεωρητικά μοντέλα μετατροπής:

- (B) Αναλογικό Μοντέλο (Proportional Model, **PM**) και
- (C) Απλοποιημένο Μοντέλο Ισοζυγίου Μάζας (Simplified Mass Balance Model, **SMBM**).

(Murat and Ichedef, 2015)

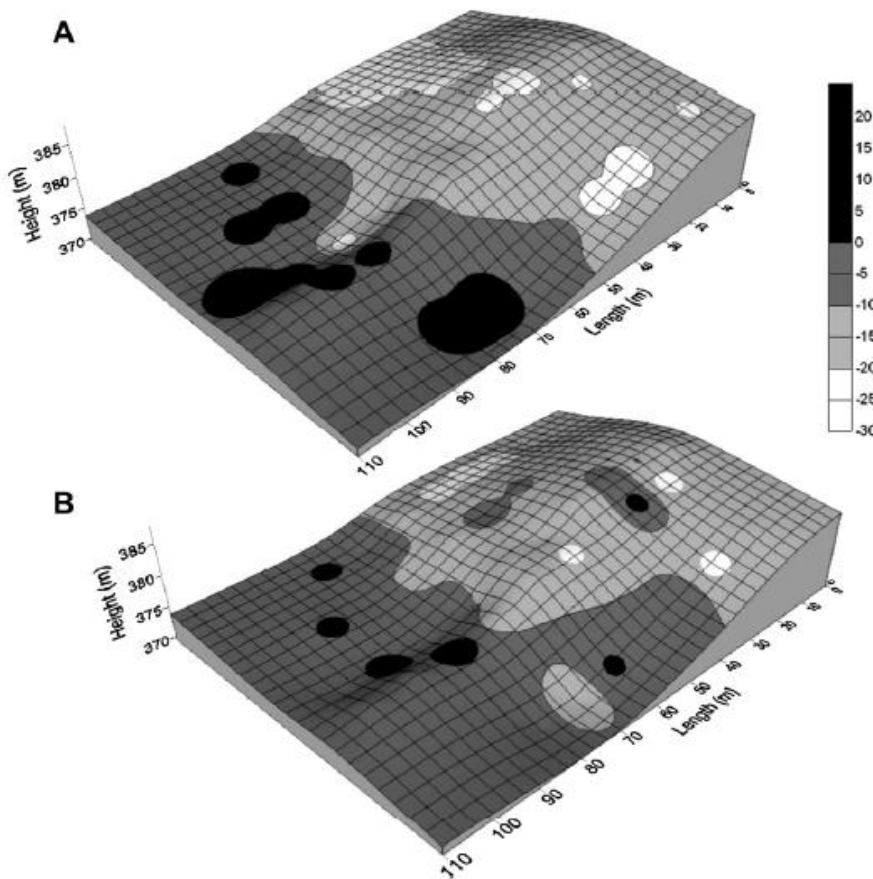
- **Μαρόκο** - Συνδυασμένη εφαρμογή της τεχνικής των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε αγροτικό πεδίο (καλλιεργούμενα εδάφη)

Από τη συνδυασμένη χρήση της τεχνικής των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε καλλιεργούμενο αγροτικό πεδίο στην περιοχή Marchouch στο Μαρόκο (Βλ. § 4.8.2, Εικόνες 4.45 και 4.46), προέκυψαν οι τιμές των ρυθμών ανακατανομής χώματος, που φαίνονται στον πίνακα της Εικόνας 4.78, καθώς και οι χάρτες της Εικόνας 4.79.

Εικόνα 4.78

Πίνακας με τις τιμές των ρυθμών ανακατανομής χώματος που προέκυψαν από εφαρμογή πυρηνικών και κλασικών τεχνικών, σε καλλιεργούμενο αγροτικό πεδίο στο Μαρόκο. Από τις πυρηνικές τεχνικές, χρησιμοποιήθηκαν τα Μοντέλα Ισοζυγίου Μάζας (Mass Balance Model 2 και 3). Από τις κλασικές τεχνικές, χρησιμοποιήθηκε το εμπειρικό μοντέλο *RUSLE 2*. (Benmansour et al., 2013)

Erosion rates ($\text{t ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ period: ~ 100 yrs	^{137}Cs period: ~50 yrs		RUSLE 2 period: 10 yrs
		Mass balance 2	Mass balance 3	
Erosion range	8–27	4–30	8–70	4–56
Mean erosion	15.0	17.9	26.0	19.5
Mean deposition	4.1	6.3	12.8	14.3
Gross erosion	12.9	15.4	22.0	17.4
Gross deposition	0.8	1.2	6.5	5.3
Net erosion	12.1	14.3	15.5	12.1
Sediment delivery ratio	93%	92%	70%	69%



Εικόνα 4.79
Χάρτες ανακατανομής χώματος ($\text{t ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) που προέκυψαν από την εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs (A) και των $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (B). (Benmansour et al., 2013)

- **Ηνωμένο Βασίλειο** - Συνδυασμένη εφαρμογή της τεχνικής των ^{137}Cs και ^7Be σε καλλιεργούμενα εδάφη

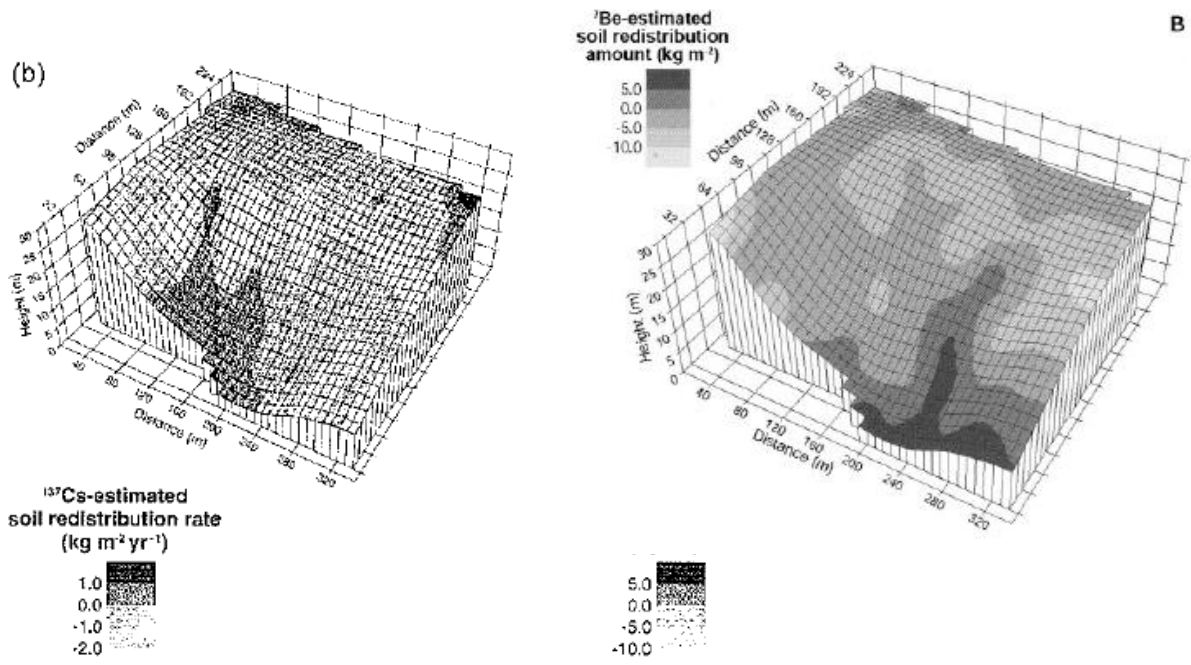
Οι Εικόνες 4.80 και 4.81 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των ρυθμών καθώς και των χωρικών μορφών της ανακατανομής χώματος σε καλλιεργούμενο πεδίο (έκτασης 6,7 ha) σε αγρόκτημα κοντά στο Devon, UK. Η δειγματοληψία για το ^7Be πραγματοποιήθηκε μετά από την περίοδο σφοδρών βροχοπτώσεων στις αρχές Ιανουαρίου 1998, κατά την οποία είχε ήδη ολοκληρωθεί η συγκομιδή και το πεδίο είχε μείνει γυμνό και ακαλλιέργητο, με αποτέλεσμα να επακολουθήσει σημαντική απορροή και διάβρωση του εδάφους (Walling, 2003).

Εικόνα 4.80

Συγκριτικός πίνακας με τους εκτιμώμενους από μετρήσεις ^{137}Cs και ^7Be ρυθμούς ανακατανομής χώματος σε καλλιεργούμενο πεδίο κοντά στο Devon, UK. (Walling, 2003)

Measure	^{137}Cs ($\text{kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)	^7Be (kg m^{-2})
Range	-4.5 to +2	-11.9 to +9.8
Mean erosion rate for eroding area	-1.1	-5.3
Mean deposition rate for depositional areas	0.69	4.0
Net soil loss	-0.48	-2.5
Sediment delivery ratio	0.83	0.80

Based on Walling *et al.* (1999)

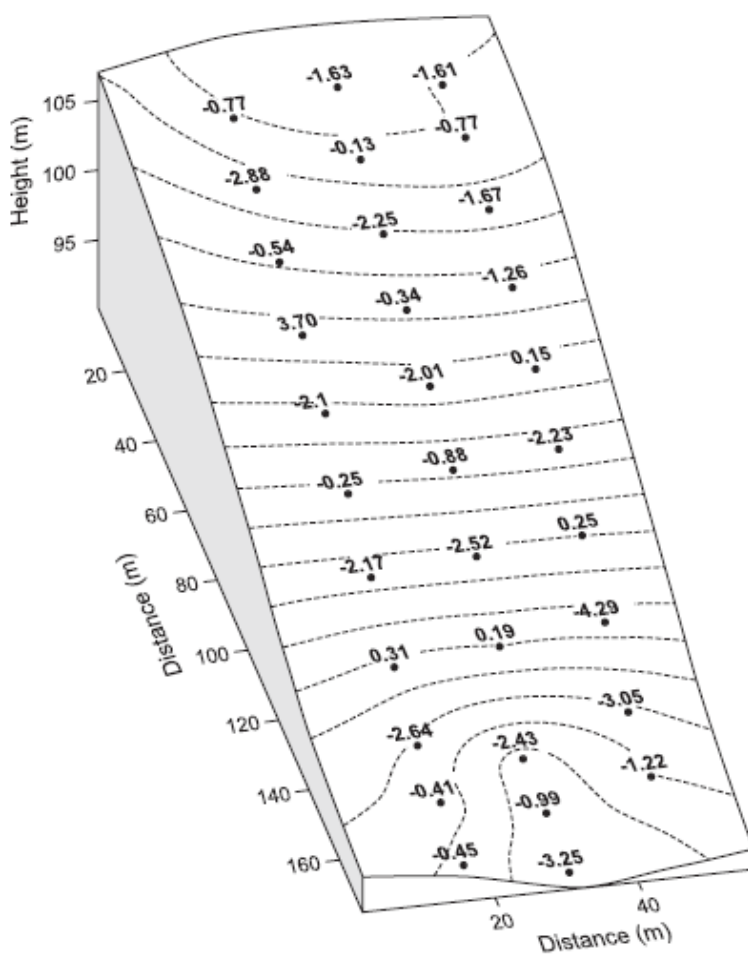


Εικόνα 4.81

Η χωρική κατανομή των εκτιμήσεων των ρυθμών ανακατανομής χώματος, που προέκυψε από τις μετρήσεις των ^{137}Cs και ^7Be σε καλλιεργούμενο πεδίο κοντά στο Devon, UK. (Walling, 2003 - He, Walling and Wallbrink In: Zapata (ed), 2002, pp. 185-215)

- **Νοτιο-κεντρική Χιλή** - Εφαρμογή της τεχνικής του ^7Be σε καλλιεργούμενα εδάφη

Η τεχνική του ^7Be εφαρμόστηκε με επιτυχία για να ποσοτικοποιηθεί η διάβρωση που υπέστη καλλιεργούμενο πεδίο σε αγρόκτημα του Buenos Aires στη νοτιο-κεντρική Χιλή, ως αποτέλεσμα των σφοδρών βροχοπτώσεων, που συνέβησαν τον Μάιο 2005. Λίγο πριν το συμβάν των βροχοπτώσεων, το υπό μελέτη πεδίο βρισκόταν σε περίοδο μη-καλλιέργειας και τα υπολείμματα της τελευταίας συγκομιδής είχαν καεί (παρόλο που για 18 χρόνια εφαρμοζόταν το σύστημα της μη-καύσης των υπολειμμάτων των συγκομιδών). Έτσι, τα αποτελέσματα της ανακατανομής χώματος, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.82, αντικατοπτρίζουν αφενός την επίδραση της σφοδρότητας των βροχοπτώσεων και αφετέρου την επίδραση της καύσης στην αύξηση της επιφανειακής απορροής και διάβρωσης (Sepulveda et al., 2008).



Εικόνα 4.82

Μέγεθος (Kg m^{-2}) και χωρική μορφή της ανακατανομής του χώματος (διάβρωση=αρνητικές τιμές και απόθεση=θετικές τιμές) στο υπό μελέτη καλλιεργούμενο πεδίο στη νοτιο-κεντρική Χιλή, αμέσως μετά από την περίοδο των σφοδρών βροχοπτώσεων που συνέβησαν τον Μάιο 2005. Οι εκτιμώμενες τιμές προέκυψαν από μετρήσεις του ^7Be , κάνοντας χρήση του Μοντέλου Κατανομής-Προφίλ (Profile Distribution Model) (βλ. § 4.9.4, Εικ. 4.59). Οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν ισοϋψείς με διαφορά ύψους 1m. (Sepulveda et al., 2008).

4.11 Μελέτη των ραδιενεργών ισοτόπων ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ σε ελληνικά εδάφη και εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ

4.11.1 Σχεδιασμός δειγματοληψίας χώματος

Διάφορες μέθοδοι και στρατηγικές δειγματοληψίας χώματος έχουν εφαρμοστεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ προκειμένου να ανταποκριθούν στους στόχους της εκάστοτε μελέτης. Δειγματοληψία **απλής διατομής** σε τρεις διατομές πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια Διπλωματικής Εργασίας (Πετροβίτσος, 2011), προκειμένου να ελεγχθεί η εφαρμογή της **τεχνικής του ^{137}Cs** για την εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης σε τοποθεσία του Δραχμάναγα στη Λαμία. Ο συνολικός αριθμός σημείων της κάθε διατομής (3 έως 5 σημεία, Εικόνα 4.83) καθορίστηκε από το μήκος της κατωφέρειας της τοποθεσίας και από τον περιορισμό ότι η απόσταση μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας σε μία διατομή πρέπει να είναι τουλάχιστον 10m (Sutherland, 1994).



Εικόνα 4.83
Οι διατομές 2 και 3 της δειγματοληψίας. Απεικονίζεται προσεγγιστικά ο σχεδιασμός των απλών διατομών πέντε και τεσσάρων σημείων, αντίστοιχα. (Πετροβίτσος, 2011)

4.11.2 Συλλογή δειγμάτων χώματος και εργαλεία δειγματοληψίας

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι για τη συλλογή χώματος από βάθος με στόχο τη γ -φασματοσκοπική ανάλυσή του.

- **Απλά σκαπτικά εργαλεία**

Η συλλογή χώματος γίνεται με χρήση απλών σκαπτικών εργαλείων (σκαλιστήρι και φτυαρίδιο). Η τεχνική βασίζεται σε προσεκτικό άνοιγμα οπής στο έδαφος μέχρι κάποιο επιθυμητό βάθος, του οποίου η μέτρηση γίνεται με απλή μετροταινία, και αφαίρεση του χώματος με πολύ μεγάλη προσοχή. Τα μειονεκτήματα είναι ότι δεν υπάρχει επαρκής έλεγχος του βάθους, το χώμα δεν λαμβάνεται ομοιόμορφα από όλα τα στρώματα και υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης των τοιχωμάτων της οπής κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας.

- **Ηλεκτρικό δράπανο και ανάκτηση δείγματος με ηλεκτρική σκούπα**

Η εκσκαφή του εδάφους γίνεται με χρήση δράπανου στο οποίο έχει προσαρμοστεί εργαλείο κορώνας. Το χώμα συλλέγεται με αναρρόφηση από ηλεκτρική σκούπα βιομηχανικού

τύπου. Η μέτρηση του βάθους του δείγματος γίνεται με τη χρήση απλής μετροταινίας. Τα δείγματα που συλλέγονται με τη μέθοδο αυτή, ως προς τη διάσταση του βάθους συλλογής τους, καλύπτουν ένα βήμα 10cm. Σημαντικά μειονεκτήματα αποτελούν η δυσκολία δειγματοληψίας με μικρό βήμα, η πιθανότητα κατάρρευσης των πλαϊνών τοιχωμάτων της οπής και η μη δυνατότητα αφαίρεσης χώματος χωρίς διαταραχή.

- **Ηλεκτρικό δράπανο με ενσωματωμένο ειδικό δειγματολήπτη χώματος («καροτιέρα»)**

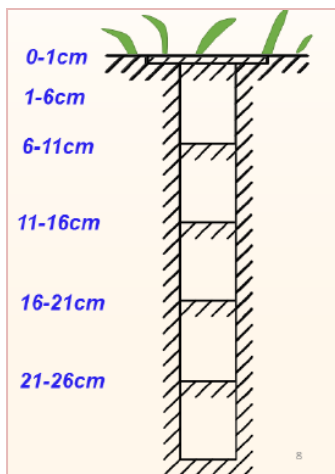
Πρόκειται για βελτίωση της προηγούμενης τεχνικής, η οποία επιτρέπει τη συλλογή χώματος μέσα σε ειδικό κύλινδρο «καρότου», εσωτερικής διαμέτρου 76mm (Εικόνα 4.84). Αυτή η τεχνική δειγματοληψίας αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ στα πλαίσια Διδακτορικής Διατριβής (Παπαδάκος, 2012).

Γίνεται διάτρηση από το αρχικό βάθος δειγματοληψίας έως βάθος κατά 5cm βαθύτερα μέσα στο έδαφος. Όταν ο φορέας της «καροτιέρας» φτάνει στο επιθυμητό βάθος, το δράπανο απενεργοποιείται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως το τελικό βάθος (Εικόνα 4.85). Η μέτρηση του βάθους γίνεται με σταθμούς οι οποίοι έχουν σημειωθεί ανά 5cm πάνω στο φορέα της «καροτιέρας». Η ενσωμάτωση «καροτιέρας» στο δράπανο περιορίζει τον κίνδυνο κατάρρευσης των τοιχωμάτων της οπής κι επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα δειγματοληψίας χώματος με μικρότερο βήμα σε σχέση τη χρήση μόνο του δράπανου. Πάντως, η αφαίρεση του χώματος μέσα από την «καροτιέρα» με την ελάχιστη δυνατή διαταραχή είναι μια διαδικασία αρκετά δύσκολη.



Εικόνα 4.84

Το ηλεκτρικό δράπανο και ο ειδικός δειγματολήπτης που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για δειγματοληψία χώματος από βάθος. (Παπαδάκος, 2012)



Εικόνα 4.85

Σχεδιασμός τυπικής δειγματοληψίας χώματος από βάθος με χρήση του ηλεκτρικού δράπανου και του ενσωματωμένου ειδικού δειγματολήπτη χώματος («καροτιέρα») του ΕΠΤ-ΕΜΠ. (Παπαδάκος κ.ά., 2014)

Η χρήση ηλεκτρικού δρόπανου παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα. Το ηλεκτρικό δρόπανο διαλύει τις πέτρες που 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. Επίσης, αυξάνει σημαντικά το κόστος της δειγματοληψίας. Από την άλλη, δοκιμές που έγιναν με χρήση χειροκίνητου τρυπανιού είχαν σχετική αποτελεσματικότητα μόνο σε αργιλώδη και υγρά εδάφη.

- **Μεταλλικός κυλινδρικός σωλήνας με τομή κατά μήκος**

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ αναπτύχθηκε μια τεχνική δειγματοληψίας, η οποία επιτρέπει τη συλλογή δειγμάτων χώματος με σχετική ευκολία και ακρίβεια έως βάθους 30cm περίπου. Η τεχνική χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου του ^{137}Cs σε μελέτη διάβρωσης του εδάφους (Πετροβίτσος, 2011). Πρόκειται για έναν κυλινδρικό δειγματολήπτη (τυποποιημένος σωλήνας κατά DIN) εξωτερικής διαμέτρου 82,5mm και πάχους 3,2mm, με διαμορφωμένη κωνικότητα στις κάτω άκρες του ώστε να διευκολύνεται η διείσδυσή του μέσα στο χώμα. Ουσιαστική βελτίωση της τεχνικής αποτελεί η *διαίρεση του κυλίνδρου σε δύο τμήματα με τομή κατά μήκος*, έτσι ώστε τελικά να δημιουργηθούν δύο μεταλλικά ελάσματα ημικυκλικής διατομής. Τα μεταλλικά αυτά ελάσματα συγκρατούνται μεταξύ τους με μεταλλικούς δακτυλίους-σφικτήρες, έτσι ώστε να σχηματίζεται ένας δειγματολήπτης κυκλικής διατομής. Ο δειγματολήπτης εισάγεται στο έδαφος με χρήση σφύρας και, προκειμένου να μην καταπονείται από αυτήν, κατασκευάστηκε χαλύβδινη φλάντζα που προσαρμόζεται στο πάνω μέρος του (Εικόνα 4.86). 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. Πριν ανασυρθεί από το έδαφος, τοποθετείται μια σπάτουλα στο κάτω μέρος του δειγματολήπτη για να μη διαφύγει χώμα. Στη συνέχεια, 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 (Εικόνα 4.87).

Το χώμα μπορεί να συλλέγεται συνολικά, στην περίπτωση που απαιτείται μόνο ο προσδιορισμός της ολικής συγκέντρωσης του ^{137}Cs σε όλο το προφίλ του χώματος (Εικόνα 4.87α). Στην περίπτωση, όμως, που είναι επιθυμητός ο προσδιορισμός της κατά βάθος κατανομής του ^{137}Cs , τότε τοποθετείται μία μετροταινία κατά μήκος του δειγματολήπτη και με την βοήθεια μίας σπάτουλας διαιρείται το χώμα σε τμήματα **2cm** ή ανάλογα με το επιθυμητό βήμα (Εικόνα 4.92β). Κάθε τμήμα χώματος συσκευάζεται ανεξάρτητα. Στη μελέτη διάβρωσης του εδάφους από το ΕΠΤ-ΕΜΠ (Πετροβίτσος, 2011), πραγματοποιήθηκε ολική δειγματοληψία στην υπό μελέτη τοποθεσία, ενώ τμηματικός τεμαχισμός των δειγμάτων χώματος έγινε για την τοποθεσία αναφοράς.

Τα πλεονεκτήματα αυτή της τεχνικής δειγματοληψίας είναι αρκετά. Η κατασκευή του δειγματολήπτη είναι απλή, χαμηλού κόστους και δεν απαιτεί ιδιαίτερη μηχανουργική επεξεργασία. Η διάταξη είναι απλή στη χρήση κι επιτρέπει τη δειγματοληψία σε σύντομο χρονικό διάστημα, χωρίς να απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός. Έτσι, η δειγματοληψία μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε περιοχές σχετικά δυσπρόσιτες. Η δειγματοληψία του χώματος γίνεται ομοιόμορφα από ολόκληρο το βάθος. Είναι δυνατή η συλλογή δειγμάτων χώματος με πολύ μικρό βήμα (έως και 1cm). Βέβαια, 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.

Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι φθορές που παρουσιάζονται στα άκρα του σωλήνα λόγω κάμψης. 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 με τη σκληρότητα του εδάφους, παρουσιάζεται λυγισμός στα άνω και κάτω άκρα του δειγματολήπτη, γεγονός που δυσκολεύει ή και καθιστά αδύνατη τη συνέχιση της δειγματοληψίας. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να διατίθενται περισσότεροι από ένας δειγματολήπτες. Επίσης, η όλη διαδικασία είναι αρκετά επίπονη, τόσο κατά τη φάση της εισαγωγής του δειγματολήπτη στο έδαφος, όσο και κατά τη φάση της εξαγωγής του.



Εικόνα 4.86

Διαδικασία (α) εισόδου στο έδαφος και (β) εξόδου από το έδαφος του κυλινδρικού σωλήνα δειγματοληψίας χώματος, που κατασκευάστηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

(Πετροβίτσος, 2011)



Εικόνα 4.87

(α) Προφίλ χώματος και (β) διαίρεσή του σε τμήματα. (Πετροβίτσος, 2011)

- **Μεταλλικός κυλινδρικός σωλήνας για μαλακό έδαφος**

Ένας άλλος δειγματολήπτης, που έχει χρησιμοποιηθεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ (Παπαδάκος, 2012) για συλλογή χώματος από βάθος, είναι αυτός που φαίνεται στην Εικόνα 4.88. Αποτελείται από μεταλλικό κυλινδρικό σωλήνα, εσωτερικής διαμέτρου 108mm, ο οποίος φέρει χειρολαβές στο πάνω μέρος του. Στο εσωτερικό του κυλίνδρου κινείται ελεύθερα μεταλλικό έμβολο το οποίο έχει κατασκευαστεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε να καλύπτει σχεδόν το σύνολο της διατομής του κυλινδρικού σωλήνα. Το στέλεχος του εμβόλου έχει βαθμονομηθεί κατάλληλα έτσι ώστε να μπορεί να γίνει ανάγνωση του βάθους δειγματοληψίας. Ο δειγματολήπτης εισχωρεί στο έδαφος χειροκίνητα. Η ανάκτησή του από το έδαφος επιτυγχάνεται με τη χρήση απλών σκαπτικών εργαλείων για τον καθαρισμό του από το περιβάλλον υλικό. Απαιτείται προσοχή ώστε να μη διαταραχθεί το περιεχόμενο δείγμα, το οποίο είναι σταθεροποιημένο στο εσωτερικό του. Τέλος, ο δειγματολήπτης τοποθετείται με το άνοιγμα του κυλινδρικού σωλήνα προς τα πάνω και το στέλεχος του εμβόλου ωθείται προοδευτικά έτσι ώστε να αποκαλύπτεται διαδοχικά το υλικό του δείγματος. Το υλικό που προεξέχει από το δειγματολήπτη αποκόπτεται (π.χ. με πετονιά ψαρέματος) και σφραγίζεται σε προσημασμένο σακουλάκι. Το βήμα, με το οποίο λαμβάνεται το δείγμα, υπολογίζεται άμεσα με απευθείας ανάγνωση πάνω στο βαθμονομημένο στέλεχος του εμβόλου.

Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να συλλέξει δείγματα με αρκετά μικρό βήμα (ακόμη και 1cm), αλλά είναι κατάλληλη μόνο για δειγματοληψίες σε μαλακά εδάφη, όπως χώμα στον πυθμένα μιας λίμνης καθώς επίσης και χώμα καλλιεργούμενων αγρών.



(α)



(β)

Εικόνα 4.88

Διαδικασία λήψης δείγματος χώματος σε βάθος από μαλακό έδαφος, με χρήση χειροκίνητου δειγματολήπτη:
(α) εκσκαφή του εδάφους από το δειγματολήπτη για ανάκτησή του μαζί με το δείγμα σταθεροποιημένο στο εσωτερικό του,
(β) δείγμα το οποίο έχει ανακτηθεί σε τέλειο σχήμα δίσκου πάχους 1cm και έχει τοποθετηθεί σε αριθμημένο σακουλάκι.

(Παπαδάκος, 2012)

4.11.3 Προετοιμασία και προ-επεξεργασία των δειγμάτων χώματος

Για την προετοιμασία και προ-επεξεργασία του χώματος, στο ΕΠΤ-ΕΜΠ ακολουθήθηκε (Πετροβίτσος, 2011) διαδικασία παρόμοια με την τυποποιημένη, που εφαρμόζεται σε μελέτες διάβρωσης του εδάφους (§ 4.6). Στην περίπτωση αυτή, αλλά και γενικότερα, σε μελέτες, που έχουν πραγματοποιηθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, και περιλαμβάνουν προετοιμασία και προ-επεξεργασία δειγμάτων χώματος, επισημαίνουμε τα εξής:

- Οι συντελεστές διόρθωσης της «αυτοαπορρόφησης», που χρησιμοποιούνται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, είναι υπολογισμένοι για ένα ποσοστό υγρασίας που δεν υπερβαίνει το 5%, οπότε δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται δείγματα χώματος με πολύ υψηλότερες τιμές της υγρασίας.
- Η υγρασία του χώματος υπολογίζεται με τη βοήθεια ζυγού προσδιορισμού υγρασίας (Εικόνα 4.89). Καθορισμένη ποσότητα 10,0 gr από το δείγμα χώματος τοποθετείται σε ανοιχτό δοχείο. Η συσκευή χρησιμοποιεί λάμπα η οποία προκαλεί θέρμανση του υλικού και εξάτμιση του νερού. Τυπικά, ο μετρητής ρυθμίζεται σε ισχύ 5 Watt και για χρόνο 5 λεπτών. Μετά την πάροδο του επιλεγμένου χρονικού διαστήματος καταγράφεται η ελάττωση του βάρους του χώματος, η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό της υγρασίας που έχει εξατμιστεί από το δείγμα.

Εικόνα 4.89

*Αναλυτής υγρασίας OHAUS 6010H του ΕΠΤ-ΕΜΠ
διακριτικής ικανότητας 0,01g για δείγμα 10g ή 0,1%.
(Παπαδάκος κ.ά., 2014)*



- Η **ξήρανση** των δειγμάτων χώματος γίνεται σε φούρνο τύπου KA-120P (Εικόνα 4.90). Ο χρόνος και η θερμοκρασία εξαρτώνται από το είδος του χώματος ή τα διάφορα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται. Επειδή η θέρμανση σε φούρνο δειγμάτων χώματος είναι πιθανό να επηρεάζει την ειδική ραδιενέργειά τους, αφού για ορισμένα ραδιενεργά ισότοπα είναι δυνατόν να υπάρξει απώλεια λόγω εξάτμισης, πραγματοποιήθηκε μελέτη (Παλαμάρα, 2010) για την επίδραση των μεθόδων προετοιμασίας των δειγμάτων χώματος στην ειδική ραδιενέργειά τους ($Bq \cdot kg^{-1}$) και εξετάστηκαν οι επιπτώσεις λόγω της θέρμανσής τους σε φούρνο. Το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι η ξήρανση δείγματος χώματος σε φούρνο, ακόμα και στους 150 °C, δεν επιδρά σημαντικά στη μετρούμενη ραδιενέργεια, για κανένα από τα ραδιενεργά ισότοπα της μελέτης, συμπεριλαμβανομένων των ^{137}Cs και ^{210}Pb , το οποίο εμφανίζει πτητική συμπεριφορά.



Εικόνα 4.90

*Κλίβανος ξήρανσης τύπου KA-120P του ΕΠΤ-ΕΜΠ.
(Καράγγελος, 2006)*

- Το **κοσκίνισμα** των δειγμάτων χώματος γίνεται μέσω της συσκευής κοκκομετρικής ανάλυσης AS-200 Control (Εικόνα 4.91), η οποία διαθέτει κόσκινα με μεγέθη οπών που κυμαίνονται από 45μm έως 2mm (Πέππας, 2008). Από μελέτη που πραγματοποιήθηκε (Παλαμάρα, 2010) σχετικά με τη μεταβολή της ειδικής ραδιενέργειας ($Bq\ k^{-1}$) διαφόρων ραδιενεργών ισotόπων διαπιστώθηκε ότι το πλέον χονδρόκοκκο κλάσμα (>2mm) χώματος έχει επίπεδα ραδιενέργειας σημαντικά χαμηλότερα από αυτά των υπόλοιπων κλασμάτων, για όλα τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισotόπα, συμπεριλαμβανομένων των ^{137}Cs , ^{210}Pb και 7Be . Επιπλέον, όταν αυτό το χονδρόκοκκο κλάσμα αποτελεί ποσοστό άνω του 20% της ολικής μάζας του χώματος, η παρουσία του στο αναλύμενο δείγμα μειώνει σημαντικά την τιμή της ειδικής ραδιενέργειάς του.

Εικόνα 4.91
Μηχάνη κοσκίνισματος AS 200 Control του ΕΠΤ-ΕΜΠ.
(Πέππας, 2008)



- Για τη **συσκευασία** των δειγμάτων χώματος, πριν τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, χρησιμοποιούνται τρεις τυποποιημένες κυλινδρικές γεωμετρίες (Εικόνα 4.92):
 - ο Γεωμετρία «2»: κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου 72mm, ύψους 69mm και όγκου $282cm^3$,
 - ο Γεωμετρία «5»: κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου 72mm, ύψους 22mm και όγκου $97,2cm^3$,
 - ο Γεωμετρία «8»: κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου 72mm, ύψους 10mm και όγκου $40cm^3$.

Οι γεωμετρίες «5» και «8» χρησιμοποιούν το ίδιο δοχείο όγκου $282cm^3$ της γεωμετρίας «2», το οποίο όμως είναι πληρωμένο έως το ύψος που καθορίζει η κάθε γεωμετρία.

Επειδή στις γεωμετρίες «5» και «8» το δοχείο δεν είναι γεμάτο, τοποθετείται σε επαφή με το χώμα δίσκος από PET (πολυαιθυλένιο) κατάλληλων διαστάσεων, ο οποίος σταθεροποιείται στο εσωτερικό του δοχείου με σιλικόνη. Επίσης, το σφράγισμα του δοχείου, όταν αυτό απαιτείται⁽⁴⁷⁾, πραγματοποιείται με επικάλυψή του από λεπτό στρώμα κατάλληλης ρητίνης.



Εικόνα 4.92

Δείγματα των τυποποιημένων γεωμετριών με κωδικούς «2», «5» και «8», αντίστοιχα, του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Οι γεωμετρίες «5» και «8» χρησιμοποιούν το ίδιο δοχείο όγκου $282cm^3$ της γεωμετρίας «2», το οποίο είναι πληρωμένο έως ορισμένο ύψος για κάθε γεωμετρία. (Πέππας, 2008)

⁽⁴⁷⁾ Βλ. § 4.6 και § 4.7 (περίπτωση $^{210}Pb_{ex}$)

Στην περίπτωση της εφαρμογής της τεχνικής του ^{137}Cs για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους (Πετροβίτσος, 2011), τα δείγματα χώματος, που προέκυψαν από την ολική και την κατά βάθος δειγματοληψία, συσκευάστηκαν στις γεωμετρίες «2» και «8», αντίστοιχα, αφού αυτές ήταν καταλληλότερες για τους όγκους των χωμάτων, που είχαν ληφθεί.

Σε άλλη μελέτη, στην οποία πραγματοποιήθηκε ολική και κατά βάθος δειγματοληψία χώματος για μετρήσεις ραδιενέργειας ^{137}Cs (Παπαδάκος, 2012), έγινε χρήση και των τριών γεωμετριών «2», «5» και «8», η επιλογή των οποίων εξαρτήθηκε από τη διαθεσιμότητα της ποσότητας χώματος.

Επίσης, από μελέτη που πραγματοποιήθηκε σχετικά με τη διερεύνηση και την υιοθέτηση γεωμετριών δειγμάτων χώματος μικρού ωφέλιμου όγκου (Χαβιάρας, 2015), διαπιστώθηκε ότι μια νέα γεωμετρία, αποκαλούμενη ως γεωμετρία «H» (Εικόνα 4.93) με όγκο $18,40\text{cm}^3$ (σημαντικά μικρότερο και από τον όγκο της τυποποιημένης γεωμετρίας «8»), διευκολύνει τον προσδιορισμό της κατά βάθος κατανομής του ^{210}Pb αρκετά ικανοποιητικά και με καλή αβεβαιότητα ακόμα και στην περίπτωση του χώματος της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, το οποίο είναι ασθενές από άποψη φυσικής ραδιενέργειας (βλ. § 4.11.5, Εικ. 4.97).



Εικόνα 4.93

Μορφή της συσκευασμένης γεωμετρίας «H» του ΕΠΤ-ΕΜΠ ενός δείγματος χώματος ^{210}Pb .

Η γεωμετρία «H» απαρτίζεται από καπάκι πλαστικού τρυβλίου, το οποίο σφραγίζεται με πλακίδιο από plexiglass και σιλικόνη.

Το δοχείο είναι καλυμμένο εξωτερικά με ρητίνη για να μη διαφεύγει το αέριο ^{222}Rn .

(Χαβιάρας, 2015)

4.11.4 Φασματοσκοπία-γ για τη μέτρηση της ραδιενέργειας των FRNs στο χώμα

Στην περίπτωση της εφαρμογής της τεχνικής του ^{137}Cs για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους από το ΕΠΤ-ΕΜΠ (Πετροβίτσος, 2011), η μέτρηση της ραδιενέργειας του ^{137}Cs στα δείγματα χώματος πραγματοποιήθηκε με γ-φασματοσκοπική ανάλυση, κάνοντας χρήση των εξής ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ: **(i)** HPGe (High Purity Germanium), ομοαξονικού, «τύπου p», σχετικής απόδοσης 33,8%, **(ii)** LEGe (Low Energy Germanium), επίπεδου, χαμηλών ενεργειών, «τύπου n», ρυθμισμένου σε χαμηλή ενίσχυση ώστε να καλύπτεται η περιοχή 0-2000keV, και **(iii)** XtRa (Extra Range Germanium Detector), ομοαξονικού, ευρείας ενεργειακής περιοχής, σχετικής απόδοσης 104,5%. Οι δύο πρώτοι ανιχνευτές χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της ραδιενέργειας του ^{137}Cs στα δείγματα χώματος μεγαλύτερου όγκου, τα οποία προέκυψαν από την ολική δειγματοληψία στην υπό μελέτη τοποθεσία και συσκευάστηκαν στη γεωμετρία «2», με χρόνο ανάλυσης για κάθε δείγμα 24 ώρες (86400 s). Ο τρίτος ανιχνευτής, λόγω της υψηλότερης απόδοσής του, χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας του ^{137}Cs στα δείγματα χώματος μικρότερου όγκου, τα οποία προέκυψαν από την τμηματική κατά βάθος δειγματοληψία στη

θέση αναφοράς και συσκευάστηκαν στη γεωμετρία «8», με χρόνο ανάλυσης για κάθε δείγμα 3 ημέρες, προκειμένου να μειωθεί κατά το δυνατόν η αβεβαιότητα των μετρήσεων.

Η ραδιενέργεια του ^{137}Cs έχει επίσης μετρηθεί επί τόπου “*in situ*”, μέσα στο πεδίο (Παπαδάκος, 2012), χωρίς να απαιτείται η συλλογή δείγματος, χρησιμοποιώντας τη φορητή διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ με ανιχνευτή BEGe (Broad Energy Germanium detector) (Εικόνα 4.94), με χρόνους ανάλυσης σημαντικά μικρότερους από αυτούς των εργαστηριακών μετρήσεων, που αναφέρθηκαν παραπάνω.

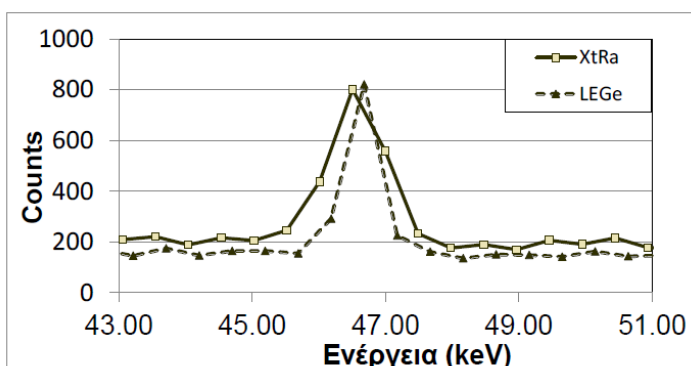
Ο ανιχνευτής BEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι ένας «τύπου n» ανιχνευτής κρυστάλλου γερμανίου υψηλής καθαρότητας. Είναι σχεδιασμένος για επιτόπια γ -φασματοσκοπία και παρέχει υψηλή ανάλυση και υψηλή απόδοση μέσα σε μια ευρεία ενεργειακή περιοχή (3keV-3MeV). Λόγω του σχήματος του κρυστάλλου του (διαμέτρος 71mm, μήκος 25mm), ο ενισχυτής είναι λιγότερο ευαίσθητος στο υπόβαθρο της κοσμικής ακτινοβολίας υψηλών ενεργειών με αποτέλεσμα να επιδεικνύει χαμηλότερο υπόβαθρο από εκείνο των τυπικών ομοαξονικών ανιχνευτών, ενώ το πάχος 0,5 mm του παραθύρου του, το οποίο είναι κατασκευασμένο από ανθρακονήματα, παρέχει υψηλή ανιχνευτική απόδοση για τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών (Agrafiotis et al., 2011).



Εικόνα 4.94

Επιτόπιες γ -μετρήσεις από μέλη του ΕΠΤ-ΕΜΠ. (Anagnostakis, 2015)

Επίσης, στη μελέτη, που πραγματοποιήθηκε σχετικά με τη διερεύνηση και την υιοθέτηση γεωμετριών δειγμάτων χώματος μικρού ωφέλιμου όγκου (Χαβιάρας, 2015), από την οποία προέκυψε η κατακόρυφη κατανομή του ^{210}Pb της Εικόνας 4.97 (§ 4.11.5), χρησιμοποιήθηκαν οι δύο ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ: (ii) LEGe, με ενεργειακή βαθμονόμηση 0-2000keV, και (iii) XtRa, που αναφέραμε παραπάνω. Διαπιστώθηκε ότι, σε σχέση με τον LEGe, ο XtRa υπερέρχει σε όρους φωτοκορυφής, αλλά παρουσιάζει υψηλότερο υπόστρωμα άρα και ελαφρώς μεγαλύτερη αβεβαιότητα (Εικόνα 4.95), γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε δείγματος (Χαβιάρας, 2015).



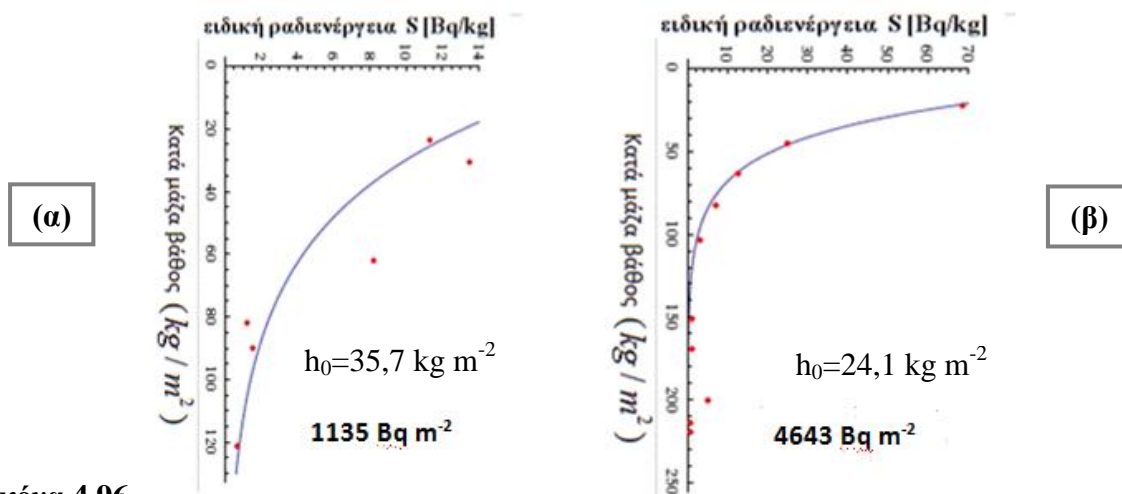
Εικόνα 4.95

Σύγκριση της περιοχής της φωτοκορυφής 46,5 keV για το ίδιο δείγμα, αναλυμένο στον ίδιο χρόνο στους ανιχνευτές XtRa και LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

(Χαβιάρας, 2015)

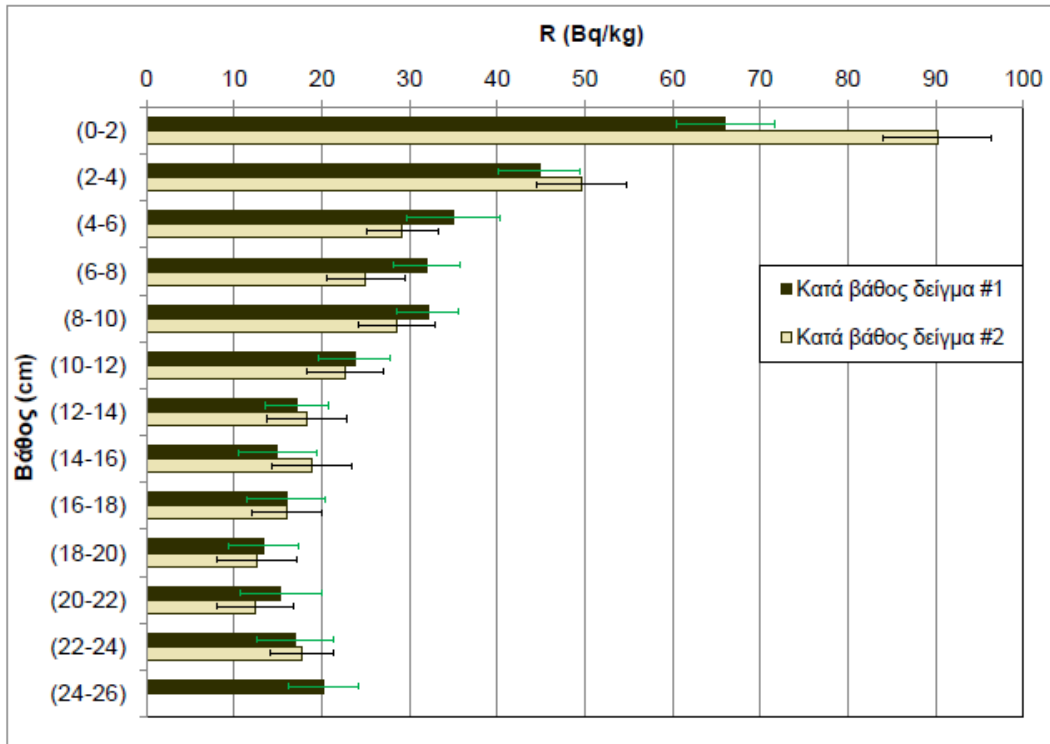
4.11.5 Κατακόρυφες κατανομές στο έδαφος των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$

Κατά βάθος δειγματοληψίες χώματος καθώς και κατά βάθος κατανομές των ^{137}Cs και $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στο έδαφος έχουν πραγματοποιηθεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, κάνοντας χρήση των εργαλείων, που περιγράφηκαν στην § 4.11.2. Παρακάτω παραθέτουμε μερικά παραδείγματα τέτοιων κατακόρυφων κατανομών, η μορφή των οποίων μπορεί να ερμηνευτεί με βάση τον σχολιασμό, που έχει προηγηθεί (βλ. § 4.8), αντίστοιχων κατακόρυφων κατανομών.



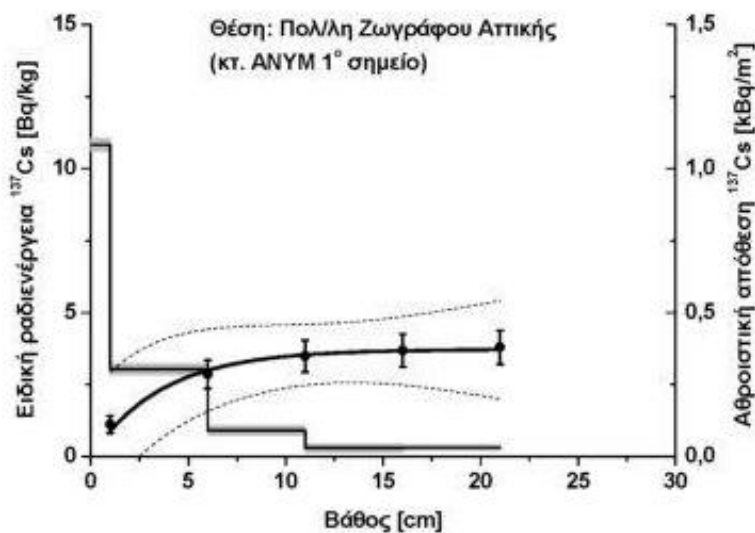
Εικόνα 4.96

Κατά βάθος κατανομές και παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs σε αδιατάρακτο επίπεδο έδαφος (θέση αναφοράς) (α) στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και (β) στον Δραχμάναγα Λαμίας. Η κατά βάθος δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε με χρήση του μεταλλικού κυλινδρικού σωλήνα με τομή κατά μήκος εσωτερικής διαμέτρου 8,25cm μέχρι το βάθος των 30cm περίπου. (Πετροβίτσος, 2011)



Εικόνα 4.97

Κατά βάθος κατανομή του ^{210}Pb σε δείγματα χώματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (συλλέχθηκαν δύο δείγματα χώματος από δύο σημεία της ίδιας θέσης). Η κατά βάθος δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε με χρήση του μεταλλικού κυλινδρικού σωλήνα με τομή κατά μήκος εσωτερικής διαμέτρου 8,25cm μέχρι το βάθος των 30cm περίπου. (Χαβιάρας, 2015)

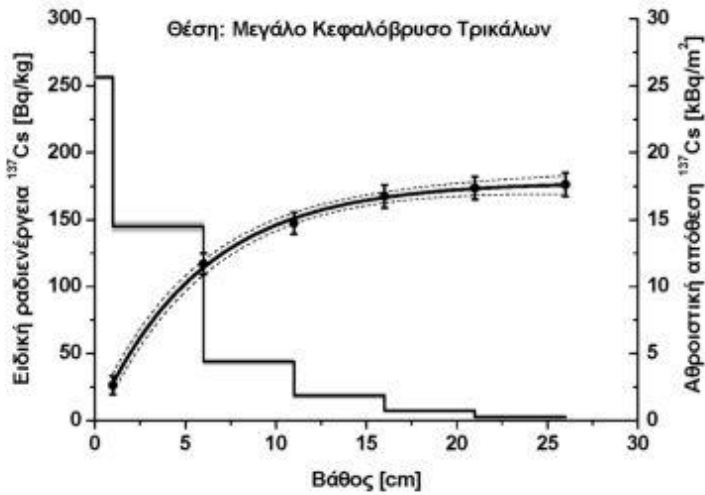


Εικόνα 4.98

Κατακόρυφη κατανομή ^{137}Cs σε αδιατάρακτο έδαφος στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Η κατά βάθος δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε το φθινόπωρο 2007 με χρήση «δράπανου καροτιέρας» εσωτερικής διαμέτρου 7,6cm και βήματα: επιφανειακά 1cm και στη συνέχεια 5cm (βλ. § 4.11.2, Εικ. 4.85).

(Παπαδάκος, 2012)

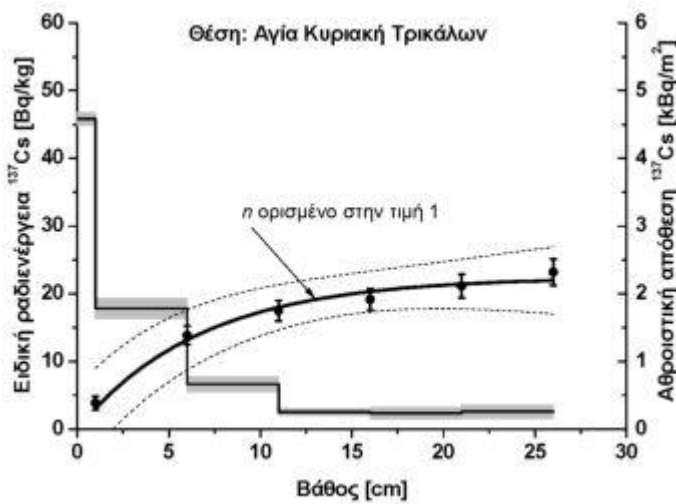


Εικόνα 4.99

Κατακόρυφες κατανομές ¹³⁷Cs σε αδιατάρακτες τοποθεσίες του νομού Τρικάλων.

Η κατά βάθος δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο 2007 με χρήση του «δράπανου καροτιέρας» εσωτερικής διαμέτρου 7,6cm και βήματα: επιφανειακά 1cm και στη συνέχεια 5cm (βλ. § 4.11.2, Εικ. 4.85).

(Παπαδάκος, 2012)

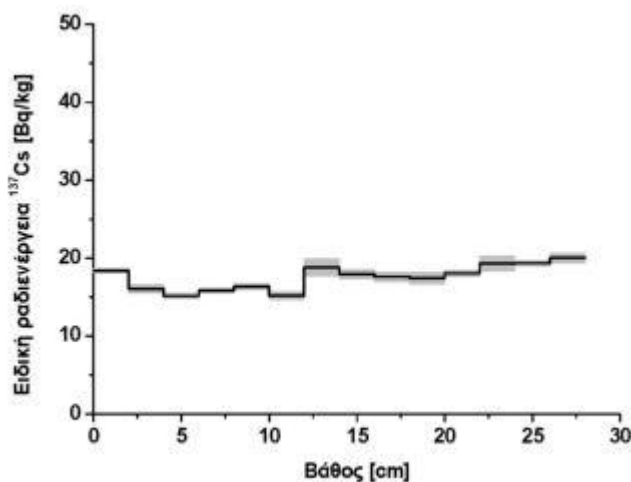


Εικόνα 4.100

Κατακόρυφη κατανομή ¹³⁷Cs σε καλλιεργημένο αγρό κοντά στον Άγιο Θεόδωρο Καρδίτσας.

Η κατά βάθος δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε τον χειμώνα του 2007 με χρήση του δειγματολήπτη μαλακού χώματος εσωτερικής διαμέτρου 10,8cm.

(Παπαδάκος, 2012)



4.11.6 Μοντέλα μετατροπής και σχετικά αποτελέσματα

Στην περίπτωση της εφαρμογής της τεχνικής του ^{137}Cs για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους από το ΕΠΤ-ΕΜΠ (Πετροβίτσος, 2011), εφαρμόστηκαν τρία μοντέλα μετατροπής για μη καλλιεργούμενα εδάφη:

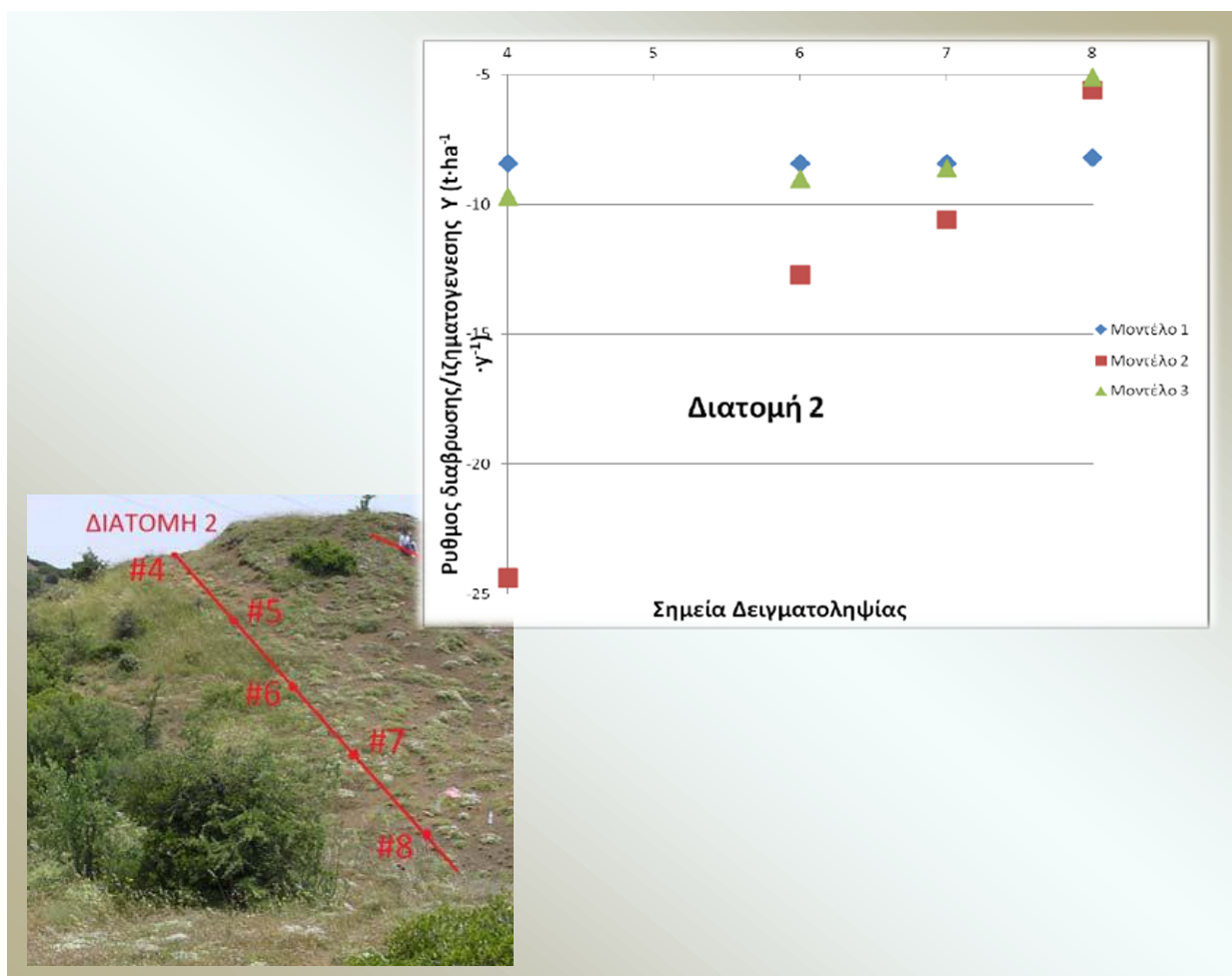
- Το **εμπειρικό μοντέλο**, το οποίο για τον υπολογισμό του μέσου ετήσιου ρυθμού απώλειας χώματος χρησιμοποιεί την εξίσωση (4.12) της § 4.9.1.
- Το **θεωρητικό Μοντέλο Κατανομής - Προφίλ** (§ 4.9.3.v), το οποίο για τον υπολογισμό του ετήσιου ρυθμού απώλειας χώματος χρησιμοποιεί την εξίσωση (ΣΤ.32) του Παραρτήματος ΣΤ καθώς επίσης και την παράμετρο μορφής του προφίλ h_0 (§ 4.9.4.στ και § 4.11.5, Εικ. 4.96).
- Το **θεωρητικό Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης** (§ 9.3.vi), το οποίο για τον υπολογισμό του ετήσιου ρυθμού διάβρωσης χρησιμοποιεί το σύστημα των εξισώσεων (ΣΤ.35) και ΣΤ.36) του Παραρτήματος ΣΤ καθώς επίσης και τις εξής παραμέτρους (πίνακας Εικόνας 4.101): συντελεστής διόρθωσης του μεγέθους κόκκων χώματος P για τοποθεσίες διάβρωσης (§ 4.9.4.β), κατά μάζα βάθος χαλάρωσης H (§ 4.9.4.γ), συντελεστής διάχυσης D (§ 4.9.4.ζ), ρυθμός μετανάστευσης V (§ 4.9.4.η) και ετήσια ροή εναπόθεσης $I(t)$ (§ 4.9.4.θ).

Γενικά, η τεχνική του ^{137}Cs εφαρμόστηκε με επιτυχία και οι εκτιμήσεις των ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων, που προέκυψαν, ήταν μέσα σε λογικά πλαίσια. Ενδεικτικά, παραθέτουμε τα αποτελέσματα της εφαρμογής των τριών παραπάνω μοντέλων για τους ρυθμούς διάβρωσης της ^{215}Po διατομής (Εικόνα 4.102).

Εικόνα 4.101

Πίνακας με τις τιμές των παραμέτρων, που χρησιμοποιήθηκαν στο θεωρητικό Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης, κατά την εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs για τη μελέτη της διάβρωσης σε τοποθεσία του Δραχμιάναγα Λαμίας. (Πετροβίτσος, 2011)

Πίνακας 6.22 - Παράμετροι του 3 ^{ου} μοντέλου υπολογισμού							
t(yr)	λ	P	N_p (kg / m ²)	W_p (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



Εικόνα 4.102

Γραφική απεικόνιση των ρυθμών διάβρωσης για τα σημεία της 2^{ης} διατομής, που προέκυψαν από τα τρία μοντέλα μετατροπής.

Μοντέλο 1: Εμπειρικό Μοντέλο

Μοντέλο 2: Θεωρητικό Μοντέλο Κατανομής-Προφίλ

Μοντέλο 3: Θεωρητικό Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης

(Πετροβίτσος, 2011)

4.11.7 Δυνατότητες, περιορισμοί και μελλοντικές προοπτικές για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Μέσω της παρουσίασης της εφαρμογής της τεχνικής των FRNs για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της συσχετιζόμενης απόθεσης ιζημάτων, αναπτύχθηκαν διεξοδικά τα βήματα για την εφαρμογή της τεχνικής καθώς και οι τρόποι και τα μέσα, που επιστρατεύονται παγκοσμίως, για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητά της. Σ' αυτό το πλαίσιο και με κύριο στόχο την ανάδειξη των δυνατοτήτων για την περαιτέρω εξέλιξη σχετικών ερευνών στη χώρα μας, εντάσσεται και η παρουσίαση της εφαρμογής της τεχνικής του ¹³⁷Cs, που πραγματοποιήθηκε από το ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει τη δυνατότητα να εμπλακεί ενεργά σε μελέτες διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων, χρησιμοποιώντας την τεχνική των FRNs. Η εμπειρία, που έχει αποκτηθεί, διαπιστώνεται από τις πολυάριθμες ερευνητικές μελέτες ανίχνευσης ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος, οι οποίες μπορεί να μην σχετίζονται άμεσα με τη διάβρωση και την απόθεση ιζημάτων, αλλά περιλαμβάνουν πολλά από τα βήματα της τεχνικής των FRNs, όπως είναι ο σχεδιασμός δειγματοληψιών, η συλλογή δειγμάτων χώματος από βάθος, η προετοιμασία και προ-επεξεργασία των δειγμάτων αυτών και, τέλος, η γ-φασματοσκοπική τους ανάλυση, την οποία το ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι σε θέση να διεξάγει με ιδιαίτερη επιτυχία, παρέχοντας αξιόπιστες μετρήσεις ακόμα και σε περιπτώσεις δύσκολων απαιτήσεων.

Έτσι, η εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων, που επιτυχώς επιχειρήθηκε από το ΕΠΤ-ΕΜΠ (Πετροβίτσος, 2011), θα μπορούσε να συνεχιστεί πιο συστηματικά και να επεκταθεί για πεδία μεγαλύτερης έκτασης, καλλιεργούμενα και μη. Τα εργαλεία και οι μέθοδοι δειγματοληψίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ, για την περίπτωση του ^{137}Cs , είναι παρόμοια με αυτά που έχουν χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως: συνήθως χρησιμοποιούνται μεταλλικοί κυλινδρικοί πυρήνες και, για την κατακόρυφη κατανομή του ^{137}Cs , το δείγμα χώματος, που υπάρχει μέσα στον κύλινδρο, τεμαχίζεται σε τμήματα των 2-5cm. Απαιτείται περισσότερη διερεύνηση ως προς τον προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων, που εισάγονται στα μοντέλα μετατροπής, ο οποίος άλλωστε αποτελεί αντικείμενο έρευνας γενικότερα. Για την εκτίμηση των ρυθμών ανακατανομής χώματος, είναι εφικτό να εφαρμοστεί το λογισμικό⁽⁴⁸⁾, που έχει αναπτυχθεί για τα μοντέλα, και, σε περιπτώσεις μελετών χωρικών μορφών, τα προκύπτοντα αποτελέσματα να απεικονίζονται σε αντίστοιχους χάρτες. Επιπλέον, η αξιολόγηση αυτών των αποτελεσμάτων, θα μπορούσε ενδεχομένως να επιτευχθεί πιο αποτελεσματικά εάν, για τέτοιου είδους έρευνες, επιλεχθούν τοποθεσίες, για τις οποίες υπάρχουν ήδη τεκμηριωμένοι ρυθμοί ανακατανομής χώματος, που έχουν προκύψει από εφαρμογή των κλασσικών τεχνικών.

Από την άλλη, η προοπτική επέκτασης της τεχνικής των FRNs, ώστε να συμπεριληφθεί και ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, αποτελεί ένα ρεαλιστικό εγχείρημα, αφού οι δυσκολίες ως προς την εφαρμογή της, οι οποίες σχετίζονται κυρίως με την ανίχνευσή του, μπορούν να αντιμετωπιστούν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως διαπιστώνεται από τον ικανοποιητικό προσδιορισμό της κατά βάθος κατανομής του ^{210}Pb ακόμα και στην περίπτωση χώματος, ασθενούς από άποψη φυσικής ραδιενέργειας⁽⁴⁹⁾.

Τέλος, αντικείμενο μελέτης για το ΕΠΤ-ΕΜΠ θα μπορούσε να αποτελέσει, η εφαρμογή της τεχνικής του ^7Be για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων. Η εφαρμογή της τεχνικής σε χώρες με μεσογειακό κλίμα, όπως η Ελλάδα, παρουσιάζει τον περιορισμό ότι η απουσία βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού συνεπάγεται σημαντική μείωση της συγκέντρωσης ^7Be στο έδαφος, με αποτέλεσμα η ειδική ραδιενέργειά του να βρίσκεται κάτω από το όριο ανίχνευσης. Ο σοβαρότερος, όμως, περιορισμός είναι η δυσκολία συλλογής δειγμάτων χώματος από βάθος με πολύ μικρό βήμα της τάξεως των mm.

⁽⁴⁸⁾ Βλ. § 4.9.5

⁽⁴⁹⁾ Βλ. § 4.11.5, Εικόνα 4.97

Οι συσκευές και τα εργαλεία⁽⁵⁰⁾, που έχουν επινοηθεί και κατασκευαστεί για να την ανταποκριθούν στην απαίτηση αυτή, έχουν χρησιμοποιηθεί συνήθως για πολύ λεπτόκοκα αργιλώδη εδάφη (π.χ. εδάφη της νοτιο-κεντρικής Χιλής με κοκκομετρική σύσταση⁽⁵¹⁾ 45% άργιλος, 34% ιλύς και 21% άμμος (Sepulveda et al., 2008), τα οποία παρουσιάζουν υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού και πλαστικότητα). Δεν είναι, επομένως, κατάλληλα για τα σκληρά ή/και πετρώδη ελληνικά εδάφη. Πάντως, για την περίπτωση του ^7Be σε πετρώδη χώματα στην Ισπανία, χρησιμοποιήθηκε ως δειγματολήπτης μια συσκευή (Navas et al., 2008), που έμοιαζε με το έλασμα απόξεσης (scraper plate)⁽⁵²⁾. Έτσι, η επινόηση, ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας συσκευής δειγματοληψίας χώματος, για την περίπτωση του ^7Be , η οποία θα είναι κατάλληλη για τα ελληνικά εδάφη και ταυτόχρονα θα ανταποκρίνεται στην απαίτηση της συλλογής χώματος από βάθος με πολύ μικρό βήμα, θα μπορούσε να αποτελέσει πρόκληση για το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Από την άλλη, οι επιτόπιες μετρήσεις ^7Be , αν και παρουσιάζουν περιορισμούς⁽⁵³⁾, ίσως να μπορούσαν να προσφέρουν μια εναλλακτική λύση.

Ακολούθως, ευρύνοντας το παραπάνω σκεπτικό σε παγκόσμια κλίμακα, παραθέτουμε μια συγκριτική ανασκόπηση των δυνατοτήτων και περιορισμών της τεχνικής των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , καθώς επίσης και μια σύντομη ανασκόπηση της παγκόσμιας τρέχουσας κατάστασης και των μελλοντικών προοπτικών που καλείται να αντιμετωπίσει η επιστημονική κοινότητα.

4.12 Συγκριτική ανασκόπηση των δυνατοτήτων και περιορισμών της τεχνικής των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be

Μέσα από την ανάπτυξη της τεχνικής των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , που επιχειρήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, έχουν ήδη αναδειχτεί δυνατότητες και περιορισμοί της εφαρμογής της για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων, για καθένα από τα εμπλεκόμενα ραδιενεργά ισότοπα. Στην ενότητα αυτή, γίνεται μια *συγκριτική ανασκόπηση* των δυνατοτήτων και των περιορισμών αυτών, η οποία χρησιμεύει στο να συγκεντρωθούν αφενός οι δυνατότητες, που παρέχονται, και αφετέρου τα γνωστικά κενά και οι ερευνητικές ανάγκες, που ενδεχομένως υπάρχουν. Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν κατευθυντήριες γραμμές για την επιλογή του πιο κατάλληλου ραδιενεργού ισότοπου ή/και συνδυασμού αυτών ώστε να αντιμετωπίζονται με επιτυχία οι ιδιαιτερότητες της κάθε ερευνητικής μελέτης.

(50) Βλ. § 4.5.2, Εικόνες 4.24, 4.25 και 4.26

(51) Βλ. Παράρτημα Δ.3

(52) Βλ. § 4.5.2, Εικόνα 4.20

(53) Βλ. § 4.7

4.12.1 Χρήση του ^{137}Cs ως ιχνηλάτη μεσοπρόθεσμων ανακατανομών χώματος

Το ^{137}Cs έχει χρησιμοποιηθεί σε έρευνες διάβρωσης του εδάφους για ένα εύρος διαφορετικών κλιμάκων, οι οποίες εκτείνονται από πειραματικά αγροτεμάχια, πεδία λίγων εκταρίων και μέχρι μικρές λεκάνες απορροής μερικών km^2 . Σήμερα, μια από τις μεγαλύτερης κλίμακας έρευνες που χρησιμοποίησαν το ^{137}Cs ως κύριο εργαλείο είναι η μελέτη σε λεκάνη απορροής 217 km^2 στον Καναδά (Βλ. § 4.4.4, Εικ. 4.17) (Mabit et al., 2007), όπου η τεχνική του ^{137}Cs και οι μέθοδοι του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS) συνδυάστηκαν για εκτιμήσουν τους ρυθμούς διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων στη λεκάνη απορροής καθώς και να ερευνήσουν τις επιδράσεις σε περιοχές εκτός αυτής.

Η τεχνική του ^{137}Cs , του *πιο ευρέως χρησιμοποιούμενου και έγκυρου μεσοπρόθεσμου ιχνηλάτη* των ρυθμών διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων, περιλαμβάνει έναν αριθμό σημαντικών δυνατοτήτων, οι οποίες συνοψίζονται ως εξής:

- ▲ Η τεχνική παρέχει πληροφορίες αναδρομικά, δηλαδή οι ρυθμοί διάβρωσης του παρελθόντος μπορούν να εκτιμηθούν από δείγματα που έχουν συλλεχθεί στο παρόν.
- ▲ Η τεχνική παρέχει εκτιμήσεις μεσοπρόθεσμων, χρονικής κλίμακας 50 ετών περίπου, ρυθμών ανακατανομής χώματος και επομένως ενσωματώνει τη χρήση της γης και τις αλλαγές του κλίματος, συμπεριλαμβανομένων και των ακραίων καιρικών φαινομένων.
- ▲ Η τεχνική παρέχει πληροφορίες τόσο για τη διάβρωση του εδάφους όσο και για την απόθεση ιζημάτων και επομένως επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της καθαρής διάβρωσης και της εξαγωγής ιζημάτων.
- ▲ Η εκτίμηση της ανακατανομής χώματος, που παρέχεται από το ^{137}Cs , ενσωματώνει όλες τις διεργασίες που ευθύνονται για τη μεταφορά χώματος, δηλαδή την υδατική και αιολική διάβρωση καθώς και την επίδραση της καλλιέργειας του εδάφους.
- ▲ Οι εκτιμήσεις βασίζονται σε μεμονωμένα σημεία δειγματοληψίας μέσα σε μια τοποθεσία κι επομένως μπορούν να παραχθούν πληροφορίες για τη χωρική μορφή των ρυθμών ανακατανομής του χώματος.
- ▲ Η τεχνική επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της απώλειας χώματος και της απόθεσης, που σχετίζονται με τη φυλλοειδή⁽⁵⁴⁾ διάβρωση, η οποία είναι δύσκολο να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας άλλες κλασσικές προσεγγίσεις σε κλίμακα πεδίου.
- ▲ Η τεχνική δεν απαιτεί δαπανηρά και εντατικών εργασιών μακροπρόθεσμα προγράμματα παρακολούθησης. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποκτηθούν με μια μοναδική επίσκεψη στην τοποθεσία, που μελετάται.
- ▲ Η δειγματοληψία είναι σχετικά απλή και οικονομικά αποδοτική και μπορεί να ολοκληρωθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα, το οποίο εξαρτάται από την πυκνότητα της δειγματοληψίας και το μέγεθος της περιοχής που ερευνάται.

⁽⁵⁴⁾ Βλ. Παράρτημα Ε

▲ Παρόλο που το ^{137}Cs χρησιμοποιείται συνήθως αναδρομικά, συγκρίνοντας τις μετρούμενες παραμένουσες αποθέσεις στην υπό μελέτη περιοχή με την τοπική παραμένουσα απόθεση αναφοράς, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για συνεχή παρακολούθηση της ανακατανομής του χώματος. Αυτό επιτυγχάνεται συγκρίνοντας τις παραμένουσες αποθέσεις που μετρήθηκαν σε συγκεκριμένα σημεία μέσα στην υπό μελέτη περιοχή μεταξύ επιτυχών εκστρατειών δειγματοληψίας οι οποίες διαχωρίζονται από χρονικά διαστήματα μερικών ετών.

▲ Η διατάραξη της τοποθεσίας, που μελετάται, κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας είναι ελάχιστη και δεν επιδρά στις γεωργικές εργασίες. Επιπλέον, δεν υφίσταται διατάραξη της φυσικής απορροής και των διεργασιών διάβρωσης, όπως θα μπορούσαν ενδεχομένως να συμβούν με την εγκατάσταση οριοθετημένων αγροτεμαχίων. Τέλος, είναι δυνατή η δειγματοληψία σε ολόκληρα πεδία καθώς και στο πλήρες προφίλ μιας πλαγιάς.

Οι κυριότεροι περιορισμοί της τεχνικής του ^{137}Cs είναι οι εξής:

✓ Σε μερικές περιοχές, ειδικά στο νότιο ημισφαίριο, οι παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs είναι χαμηλές και η γ-φασματοσκοπία θα απαιτήσει μεγαλύτερους χρόνους ανάλυσης προκειμένου να αποκτηθεί μια αποδεκτή ακρίβεια για τις μετρήσεις.

✓ Το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl προκάλεσε επιπρόσθετες εναποθέσεις ^{137}Cs σε μερικές περιοχές. Αυτές οι εναποθέσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν χρησιμοποιούνται μετρήσεις ^{137}Cs για να εκτιμηθούν οι ρυθμοί ανακατανομής χώματος. Στην περίπτωση, που η εναπόθεση από το Chernobyl είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την εναπόθεση που σχετίζεται με τις πυρηνικές δοκιμές, οι μετρήσεις ^{137}Cs θα αντικατοπτρίζουν πρωτίστως τη διάβρωση που συνέβη μετά το 1986 και τα μοντέλα μετατροπής θα πρέπει να τροποποιηθούν ώστε να λάβουν υπόψη τις δύο διαφορετικές προέλευσης εναποθέσεις.

✓ Η τεχνική είναι κατάλληλη κυρίως για την εκτίμηση μέσων ρυθμών διάβρωσης μεσαίας κλίμακας (50 ετών περίπου) και δεν μπορεί να παρέχει άμεσα τις απαιτούμενες πληροφορίες για την παρακολούθηση αλλαγών στους ρυθμούς διάβρωσης που σχετίζονται με μικρής κλίμακας αλλαγές στην χρήση της γης και τις γεωργικές πρακτικές.

✓ Η τεχνική περιλαμβάνει σύγκριση της μετρούμενης παραμένουσας απόθεσης με την παραμένουσα απόθεση αναφοράς. Εξαιτίας της σημαντικότητάς της για την απόκτηση αξιόπιστων εκτιμήσεων της ανακατανομής χώματος, η παραμένουσα απόθεση αναφοράς θα πρέπει να προσδιορίζεται με ακρίβεια. Είναι σημαντικό να επιβεβαιωθεί ότι η τοποθεσία αναφοράς, που θα επιλεγεί, να είναι αντιπροσωπευτική της τοπικής παραμένουσας απόθεσης αναφοράς. Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε ορεινές περιοχές, όπου οι βροχοπτώσεις χαρακτηρίζονται από υψηλή χωρική κύμανση, σε περιοχές με πετρώδη εδάφη, σε περιοχές που υπόκεινται σε εντατική καλλιέργεια, όπου και υπάρχουν λίγες αδιατάρακτες περιοχές, σε περιοχές, όπου το χιόνι αντιπροσωπεύει ένα ουσιαστικό ποσοστό των ετησίων κατακρημνίσεων και μπορεί να συμβαίνει σημαντική ολίσθηση, και, τέλος, σε ξηρές ή ημίξηρες περιοχές με πενιχρή φυτοκάλυψη, όπου η ανακατανομή χώματος εξαιτίας αιολικών διεργασιών μπορεί να προκαλέσει τη συσσώρευση επιπρόσθετων ιζημάτων-φορέων ^{137}Cs στην περιοχή αναφοράς.

✓ Είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη η ενδεχόμενη κύμανση της παραμένουσας απόθεσης ^{137}Cs μιας τοποθεσίας αναφοράς. Πολλαπλά ή επαναλαμβανόμενα δείγματα (τουλάχιστον 10) πρέπει να συλλέγονται, συνήθως, για να προσδιορίσουν την τιμή της παραμένουσας απόθεσης αναφοράς.

4.12.2 Χρήση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ως ιχνηλάτη μακροπρόθεσμων ανακατανομών χώματος

Η χρήση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ για την ανίχνευση της διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων καθυστέρησε συγκριτικά με τη χρήση του ^{137}Cs . Εντούτοις, τα τελευταία 10-15 χρόνια, έχει γίνει σημαντική πρόοδος, η οποία οφείλεται κυρίως στη βελτίωση των ανιχνευτικών διατάξεων. Η χρήση μετρήσεων $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ για τη μελέτη των ρυθμών ανακατανομής χώματος έχει γενικά τα ίδια πλεονεκτήματα με αυτά του ^{137}Cs , αλλά περιλαμβάνει επιπλέον και τις εξής δυνατότητες:

- ▲ Η χρήση των μετρήσεων $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ μπορεί να επεκτείνει τη χρονική κλίμακα, που σχετίζεται με τις μετρήσεις ^{137}Cs , και να παρέχει μια αναδρομική εκτίμηση πιο μακροπρόθεσμων (100 ετών περίπου) ρυθμών ανακατανομής χώματος.
- ▲ Η τεχνική του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο νότιο ημισφαίριο, όπου οι παραμένουσες αποθέσεις ^{137}Cs είναι χαμηλές ώστε να επιτρέψουν ακριβείς μετρήσεις, καθώς επίσης και σε περιοχές που έχουν επηρεαστεί από το ατύχημα στο Chernobyl, όπου η εναπόθεση του ^{137}Cs το 1986 μπορεί να περιπλέξει την ερμηνεία των μετρήσεων.
- ▲ Η εναπόθεση ^{137}Cs που προέρχεται από τις πυρηνικές δοκιμές έχει σταματήσει και οι παραμένουσες αποθέσεις του ^{137}Cs ελαττώνονται εξαιτίας της ραδιενεργού του διάσπασης. Στο μέλλον, η χρήση του ^{137}Cs δε θα είναι πλέον δυνατή, ειδικά στο νότιο ημισφαίριο. Εφόσον η εναπόθεση $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ από την ατμόσφαιρα στο έδαφος είναι συνεχής, η χρήση αυτού του ραδιενεργού ισοτόπου δεν αντιμετωπίζει τέτοιου είδους προβλήματα.

Οι κυριότεροι περιορισμοί της τεχνικής του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ περιλαμβάνουν τα εξής:

- ✓ Η τιμή της ενέργειας 46,5 keV, στην οποία ανιχνεύεται ο ^{210}Pb , είναι πολύ κοντά στο χαμηλότερο όριο του εύρους ενεργειών ενός τυπικού ανιχνευτή. Για τη μέτρηση του ^{210}Pb απαιτείται ένας πιο ευαίσθητος ανιχνευτής με εύρος ενεργειών από 3keV έως 10MeV. Η μέτρηση του ^{210}Pb με χρήση γ-φασματοσκοπίας χαμηλής ενέργειας είναι δύσκολη και απαιτεί καλά εκπαιδευμένο προσωπικό.
- ✓ Εάν το υπόβαθρο του γ-φάσματος είναι υψηλό, η γραμμή των 46,5 keV δεν είναι εύκολο να ανιχνευτεί. Νέου τύπου ανιχνευτές, όπως είναι οι ανιχνευτές LEGe, μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά το όριο ανίχνευσης.
- ✓ Επιπρόσθετες πηγές ^{222}Rn στην ατμόσφαιρα είναι δυνατό να δημιουργήσουν προβλήματα. Το ^{222}Rn και τα βραχύβια προϊόντα της ραδιενεργού του διάσπασης υπάρχουν στην ατμόσφαιρα συνήθως σε μεγαλύτερα επίπεδα από αυτά στο έδαφος. Παρόλα αυτά, αυξημένες ραδιενέργειες μπορούν να εμφανίζονται κοντά σε ηφαίστεια, θερμικές πηγές και άλλες πηγές αερίων στην επιφάνεια της γης όπου υπάρχουν πετρώματα ή μέταλλα με υψηλή περιεκτικότητα σε Ra.
- ✓ Σε μερικές τοποθεσίες, έχει διαπιστωθεί ότι η περιεκτικότητα του εδάφους σε ^{210}Pb είναι πολύ χαμηλή ακόμη και κάτω από το όριο ανίχνευσης. Αυτό θα μπορούσε να συμβαίνει είτε εξαιτίας πολύ μεγάλων ρυθμών διάβρωσης του εδάφους είτε εξαιτίας χαμηλών ροών εναπόθεσης $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ στο έδαφος από την ατμόσφαιρα. Σε εδάφη όπου η περιεκτικότητα του συνολικού ^{210}Pb είναι πολύ κοντά στην περιεκτικότητα του supported ^{210}Pb (η οποία

υποδεικνύεται από την περιεκτικότητα του ^{226}Ra) η αβεβαιότητα για τον προσδιορισμό του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ μπορεί να είναι πολύ μεγάλη. Πρέπει, επομένως να γίνει αξιολόγηση της τεχνικής του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ για τη μελέτη ρυθμών ανακατανομής του χώματος κάτω από ένα εύρος διαφορετικών περιβαλλοντικών και κλιματικών συνθηκών.

4.12.3 Χρήση του ^7Be ως ιχνηλάτη βραχυπρόθεσμων ανακατανομών χώματος

Το ^7Be χρησιμοποιείται από τα τέλη της δεκαετίας του '90 για τον υπολογισμό της διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων, που σχετίζονται με μεμονωμένες περιόδους έντονων βροχοπτώσεων, κυρίως σε χωρικές κλίμακες που κυμαίνονται από αγροτεμάχια λίγων τετραγωνικών μέτρων μέχρι πεδία λίγων εκταρίων. Επιτυχείς μελέτες, που χρησιμοποίησαν την τεχνική του ^7Be , έχουν γίνει στην Αυστραλία, στο Ηνωμένο Βασίλειο, στις ΗΠΑ και στη Χιλή. Το ^7Be έχει επίσης χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για να τεκμηριώσει διάβρωση εδάφους στην κεντρική Χιλή, που σχετίζεται με δραστηριότητες συγκομιδής δασικών προϊόντων (Schuller et al., 2006) ή/και περιστατικών σφοδρών βροχοπτώσεων (Sepulveda et al., 2008).

Η δυνατότητα της τεχνικής του ^7Be να τεκμηριώσει τους ρυθμούς διάβρωσης, που σχετίζονται με μεμονωμένα περιστατικά, κι επομένως να διερευνήσει την αποτελεσματικότητα διαφορετικών πρακτικών προστασίας του εδάφους, αποτελεί το κυριότερο πλεονέκτημά του συγκριτικά με τις πιο μακροπρόθεσμες αξιολογήσεις των ρυθμών διάβρωσης, που παρέχονται από το ^{137}Cs ή τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$.

Οι κυριότερες επισημάνσεις, που αφορούν στη χρήση του ^7Be για την αξιολόγηση της ανακατανομής του εδάφους, περιλαμβάνουν τα εξής:

- Η χρήση του ^7Be για την τεκμηρίωση βραχυχρόνιων ρυθμών ανακατανομής περιλαμβάνει δύο σημαντικές παραδοχές: (α) η εναπόθεση στο έδαφος του ^7Be , που σχετίζεται με το συμβάν της διάβρωσης, είναι χωρικά ομοιόμορφη και (β) το προϋπάρχον ^7Be είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στην υπό έρευνα περιοχή. Η πρώτη παραδοχή συνήθως απαντάται σε χωρική κλίμακα ενός μεμονωμένου πεδίου. Τη δεύτερη παραδοχή, όμως, είναι πιο δύσκολο να τη συναντήσουμε. Η απαραίτητη ομοιόμορφη χωρική κατανομή του προϋπάρχοντος ^7Be μπορεί γενικά να ισχύει σε τρεις περιπτώσεις: (β_1) μετά από μακρά περίοδο ξηρασίας, όπου κάθε προϋπάρχουσα χωρική κύμανση στην παραμένουσα απόθεση του ^7Be θα έχει εξαλειφθεί λόγω της ραδιενεργού του διάσπασης, (β_2) μετά από εκτενή περίοδο με βροχοπτώσεις μόνο μικρής έντασης, οι οποίες δεν έχουν προκαλέσει διάβρωση και ανακατανομή του χώματος και (β_3) μετά από το όργωμα ενός πεδίου διότι το υπάρχον ^7Be έχει αναμιχθεί μέσα στο οργωμένο στρώμα του εδάφους και η ραδιενέργειά του είναι κάτω από το όριο ανίχνευσης. Επιπλέον, η κατά βάθος κατανομή του ^7Be στην περιοχή αναφοράς, η οποία παρέχει μια καίρια παράμετρο για το μοντέλο μετατροπής που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των ρυθμών ανακατανομής του χώματος, θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική της υπό μελέτη περιοχής, από την οποία έχουν συλλεχθεί τα δείγματα χώματος.
- Επειδή το ^7Be , που εναποτίθεται στο έδαφος από την ατμόσφαιρα, ενσωματώνεται εύκολα από τα φύλλα των φυτών, το ποσοστό του ^7Be , που προσκολλάται στο χόμα, ποικίλει

ανάλογα με την πυκνότητα και το είδος της φυτοκάλυψης. Έτσι, η χρήση αυτού του ραδιενεργού ισοτόπου για την τεκμηρίωση ρυθμών ανακατανομής χώματος περιορίζεται συνήθως σε γυμνά εδάφη.

- Οι διαδικασίες δειγματοληψίας και η διαθεσιμότητα κατάλληλου δειγματοληπτικού εξοπλισμού αποτελούν ένα σημαντικό περιορισμό στη χρήση του ^7Be για την αξιολόγηση της ανακατανομής χώματος. Πρέπει να συλλεχθούν δείγματα χώματος από μικρά βάθη, διότι η ύπαρξη ^7Be περιορίζεται στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους με μια καλά διαμορφωμένη εκθετική κατά βάθος κατανομή. Εάν το δείγμα δεν συλλεχθεί από επαρκές βάθος, δεν θα περιέχει τη συνολική παραμένουσα απόθεση του ^7Be . Από την άλλη, εάν το βάθος της δειγματοληψίας είναι πολύ μεγάλο, θα συμπεριληφθεί χώμα με πολύ μικρή ραδιενέργεια ^7Be , με αποτέλεσμα στο συνολικό δείγμα να προκύψει συγκέντρωση ^7Be με χαμηλό επίπεδο ανίχνευσης ή ακόμη και κάτω από το όριο αυτής. Επιπλέον, επειδή η χρήση του μοντέλου μετατροπής απαιτεί λεπτομερή χαρακτηρισμό της εκθετικής κατά βάθος κατανομής του ^7Be στην περιοχή αναφοράς, είναι απαραίτητος ο τεμαχισμός του ολικού δείγματος του χώματος σε μικρά τμήματα ή εναλλακτικά η συλλογή δειγμάτων με μικρό κατά βάθος βήμα. Συχνά απαιτούνται βήματα των 2mm περίπου. Έτσι, η χρήση της τεχνικής του ^7Be , απαιτεί ειδικές συσκευές δειγματοληψίας (Βλ. § 4.5.2, Εικ. 4.24, 4.25 και 4.26).
- Παρόλο που ο σχετικά μικρός χρόνος υποδιπλασιασμού του ^7Be είναι ένα καίριο χαρακτηριστικό του, εντούτοις αντιπροσωπεύει έναν περιορισμό ως προς τον σύντομο χρόνο, που διατίθεται για την ανάλυση των δειγμάτων πριν οι ραδιενέργειες μειωθούν κάτω από το όριο ανίχνευσης. Αυτό σημαίνει ότι μόνο περιορισμένος αριθμός δειγμάτων μπορεί να αναλυθεί, εκτός εάν είναι διαθέσιμος σημαντικός αριθμός ανιχνευτών. Καθώς ο χρόνος αποθήκευσης αυξάνεται και η ραδιενέργεια του ^7Be στα δείγματα μειώνεται, εξαιτίας της ραδιενεργού του διάσπασης, θα απαιτούνται μεγαλύτεροι χρόνοι ανάλυσης. Έτσι, περιορίζεται το μέγεθος της περιοχής που μπορεί να ερευνηθεί ή περιορίζεται το πλήθος των διαφορετικών επεξεργασιών που θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν σε ένα πείραμα, το οποίο στοχεύει στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους για τη μείωση της διάβρωσης. Είναι επίσης σημαντικό ότι, μετά τη βροχόπτωση, όλα τα δείγματα θα πρέπει να συλλεχθούν ταυτόχρονα, διότι επιπρόσθετη εναπόθεση ^7Be στο έδαφος από την ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας θα μπορούσε να αλλάξει τη ραδιενέργεια των δειγμάτων εκείνων που έχουν συλλεχθεί αργότερα.
- Σε μερικές περιπτώσεις, είναι δύσκολο να καθοριστεί η ακριβής περίοδος, που καλύπτει το περιστατικό διάβρωσης, που ερευνάται, εξαιτίας ενδεχόμενων προηγούμενων περιστατικών διάβρωσης, τα οποία δεν έχουν διαχωριστεί από επαρκώς μεγάλη χρονική περίοδο ή από μια φάση καλλιέργειας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτούνται επιπρόσθετες πληροφορίες για την εποχιακή κατανομή της ροής εναπόθεσης ^7Be , οι οποίες συμπεριλαμβάνουν και μέτρηση της ραδιενέργειάς του στην κατακρήμνιση.
- Οι επιτόπιες μετρήσεις θα μπορούσαν να παρέχουν μια αποτελεσματική προσέγγιση για την απόκτηση απαραίτητων πληροφοριών για τις παραμένουσες αποθέσεις του ^7Be στην υπό μελέτη περιοχή, χωρίς την ανάγκη των χρονοβόρων δειγματοληπτικών εκστρατειών και των συσχετιζόμενων εργαστηριακών μετρήσεων. Παρόλα αυτά, μελέτες, που επιχειρήθηκαν, υπέδειξαν ότι οι χρόνοι ανάλυσης πρέπει να είναι τουλάχιστο διπλάσιοι από αυτούς που απαιτούνται για το ^{137}Cs και αυτό αποτελεί ένα σημαντικό περιορισμό.

- Η παραγωγή του ^7Be την ανώτερη ατμόσφαιρα είναι σχετικά σταθερή, παρόλο που μπορεί να κυμαίνεται εποχιακά και σε ανταπόκριση με την ηλιακή δραστηριότητα. Έτσι, η εναπόθεσή του στο έδαφος από την ατμόσφαιρα εξαρτάται κυρίως από τις βροχοπτώσεις, με αποτέλεσμα οι παραμένουσες αποθέσεις του ^7Be να είναι πολύ μικρές σε ξηρές ή ημίξηρες περιοχές. Αυτό μπορεί να αποτελεί πρόβλημα στα εύκρατα ή ηπειρωτικά κλίματα με παρατεταμένες ξηρές περιόδους.
- Η δειγματοληψία πρέπει να σχεδιάζεται προσεχτικά ώστε να ανταποκρίνεται στους στόχους της μελέτης και να λαμβάνει υπόψη την εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων και την ενδεχόμενη χωρική κύμανση της παραμένουσας απόθεσης του ^7Be , που κληρονομήθηκαν από προηγούμενα περιστατικά διάβρωσης. Για τις μελέτες, που περιλαμβάνουν ^7Be , απαιτείται προσωπικό πολύ πιο επιδέξιο κι έμπειρο από εκείνο που ασχολείται με έρευνες, που σχετίζονται με την τεχνική του ^{137}Cs . Οι χαμηλότερες ενεργειακές γραμμές-γ, που μετριοούνται για το ^7Be , έχουν μεγαλύτερο φασματικό υπόβαθρο στην περιοχή της κορυφής από εκείνες που μετριοούνται για το ^{137}Cs και αυτό, συνήθως, έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερα επίπεδα αβεβαιότητας και υψηλότερα όρια ανίχνευσης.

4.12.4 Τρέχουσα κατάσταση και μελλοντικές προοπτικές για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs

Ο πίνακας της Εικόνας 4.103 στοχεύει στο να συνθέσει την τρέχουσα κατάσταση της γνώσης, που αφορά στη χρήση της τεχνικής των FRNs: ^{137}Cs , ^{210}Pb και ^7Be για έρευνες διάβρωσης του εδάφους και απόθεσης ιζημάτων, συνοψίζοντας και συγκρίνοντας τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται σε καθένα από τα παραπάνω ραδιενεργά ισότοπα.

Εικόνα 4.103

Πίνακας που παρουσιάζει τη σύγκριση των δυνατοτήτων και των περιορισμών της τεχνικής των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be για τη μελέτη της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων. (Mabit et al., 2008)

	Radionuclide origin	Energy emission (keV)	Half life	Time span	Erosion assessment	Sample collection	Area studied	Equipment needs	Laboratory measurements	In situ measurement	Sediment dating
^{137}Cs	Man-made	662	30.2 years	50 years	Medium-term ^a	Simple	Plot to large watershed	Normal HPGe γ detector	Easy	Easy	Possible
$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$	Natural geogenic	46.5	22.3 years	100 years	Long-term	Simple	Plot to watershed	Broad energy range HPGe γ detector	More difficult	Limited and unreliable	Possible
^7Be	Natural cosmogenic	477.6	53.3 days	≤ 6 months	Short-term	Requires fine depth incremental sampling	Local scale, plot to field	Normal HPGe γ detector	Easy	Requires at least double the counting time in the field needed by ^{137}Cs ^b	Possible ^c

Παρόλο που σε πολλές έρευνες επιλέγεται ένα μόνο ραδιενεργό ισότοπο για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις μιας μελέτης, η συνδυαστική χρήση δύο ή ακόμη και τριών ραδιενεργών ισωτόπων μπορεί συχνά να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το ιστορικό της διάβρωσης μιας περιοχής, παράγοντας πληροφορίες για διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Η συνδυαστική χρήση των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be πρέπει να θεωρηθεί ότι μπορεί να προσφέρει σημαντικές μελλοντικές δυνατότητες. Με κριτήρια το χρόνο υποδιπλασιασμού και την προέλευσή τους, το ^{137}Cs και ο ^{210}Pb μπορούν να παρέχουν μια βάση για την εδραίωση του ιστορικού διάβρωσης ενός τόπου για μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες περιόδους, αντίστοιχα, ενώ το ^7Be παρέχει τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψη σύντομες χρονικές περίοδοι.

Έτσι, το ενδιαφέρον για τη χρήση πυρηνικών τεχνικών για την αξιολόγηση της επίπτωσης και της αποτελεσματικότητας των πρακτικών προστασίας του εδάφους έχει εστιαστεί στη χρήση του ^7Be , αφού μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για έρευνες διάβρωσης, που σχετίζονται με μεμονωμένα ακραία περιστατικά, τα οποία αναμένεται να γίνουν πιο συχνά ως αποτέλεσμα των κλιματικών αλλαγών.

Εναλλακτικά, η συστηματικά επαναλαμβανόμενη δειγματοληψία για τον προσδιορισμό της παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs θα μπορούσε να αποτελέσει μια άλλη προσέγγιση για την ποσοτικοποίηση πρόσφατων αλλαγών στην ανακατανομή του χώματος σε απάντηση αφενός μεν των κλιματικών αλλαγών και αφετέρου των αλλαγών στη χρήση και τη διαχείριση του εδάφους. Όμως, η εφαρμογή αυτής της μεθόδου περιορίζεται από την ανάγκη ύπαρξης περιόδων επαρκούς διάρκειας ανάμεσα στις εκστρατείες των μετρήσεων προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι η αλλαγή στην παραμένουσα απόθεση είναι μεγαλύτερη από την αβεβαιότητα, που σχετίζεται με τις διαδικασίες της δειγματοληψίας και των εργαστηριακών μετρήσεων.

Διάφορα άλλα τρέχοντα σημαντικά θέματα, που σχετίζονται με τη βελτίωση της μεθόδου των FRNs και αντιμετωπίζονται από την επιστημονική κοινότητα, είναι τα εξής:

- Έλεγχος των υποθέσεων που σχετίζονται με την αρχική κατανομή της εναπόθεσης στην επιφάνεια του εδάφους από την ατμόσφαιρα.
- Καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be , μετά την εναπόθεσή τους, στα εδάφη και τα συσχετιζόμενα περιβάλλοντα (π.χ. αναχαίτιση από τα φυτά, προτιμώμενοι μηχανισμοί προσρόφησης).
- Παροχή πιο σχολαστικών κατευθυντήριων γραμμών για την επιλογή της περιοχής αναφοράς.
- Ευρύτερη εφαρμογή των επιτόπιων μετρήσεων για το ^7Be και το ^{137}Cs .
- Βελτίωση των μεθόδων δειγματοληψίας για τον ακριβέστερο προσδιορισμό των κατά βάθος κατανομών των FRNs, ειδικά του ^7Be και του ^{210}Pb .
- Βελτίωση των εργαστηριακών διαδικασιών για τη μέτρηση του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$.
- Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των ραδιενεργειών των FRNs και των εδαφικών δεικτών ποιότητας (Mabit et al., 2008b).
- Χρήση των FRNs σε μελέτες ανίχνευσης της προέλευσης ιζημάτων (Walling et al., 2006).
- Επέκταση σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα. Μέχρι σήμερα οι περισσότερες μελέτες έχουν διεξαχθεί σε κλίμακα μεμονωμένων πεδίων, αν και μερικές δουλειές έχουν επίσης πραγματοποιηθεί σε μικρές λεκάνες απορροής. Ένα σημαντικό και λογικό επόμενο βήμα,

το οποίο έχει γίνει σήμερα μόνο από λίγους ερευνητές που χρησιμοποιούν την τεχνική των FRNs, είναι η αναβάθμιση της αξιολόγησης των επιπτώσεων της γεωργικής δραστηριότητας στη διάβρωση του εδάφους και την ανακατανομή του χώματος από την κλίμακα πεδίου στην κλίμακα μεγάλων λεκανών απορροής. Αυτό απαιτεί διαφορετικές στρατηγικές και μεθόδους δειγματοληψίας [Βλ. § 4.4.4 – Εικ. 4.16 (Mabit et al., 2007) και Εικ. 4.17 (Mabit et al., IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77)]. Εντούτοις, αυτή η προσέγγιση χρειάζεται περαιτέρω ανάπτυξη και επικύρωση κάτω από ένα εύρος διαφορετικών αγροτικών και περιβαλλοντικών συνθηκών (κλίμα, εδάφη, τοπογραφία και συστήματα καλλιεργειών).

- Βελτίωση των μοντέλων μετατροπής που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή εκτιμήσεων των ρυθμών ανακατανομής χώματος από τις μετρήσεις της παραμένουσας απόθεσης των FRNs: ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και ^7Be (Yin and Ji, 2015). Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να αναφέρουμε δύο πρόσφατες δημοσιεύσεις (Arata et al, 2016, Part 1 & 2), στις οποίες προτείνεται ένα καινοτόμο μοντέλο μετατροπής, το **MODERN (Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides)**, το οποίο μπορεί εύκολα και περιεκτικά να χρησιμοποιεί διαφορετικά FRNs, διαφορετικές χρήσεις γης και διαφορετικές διεργασίες ανακατανομής χώματος. Τα κύρια πλεονεκτήματα του MODERN είναι τα εξής: **(i)** είναι εφαρμόσιμο τόσο στην περίπτωση της διάβρωσης όσο και της απόθεσης ιζημάτων, **(ii)** λαμβάνει υπόψη τον ακριβή προσδιορισμό της κατά βάθος κατανομής του FRN ανεξάρτητα από την μορφή/σχήμα της, **(iii)** οι παράμετροι που απαιτούνται για την εφαρμογή του είναι απλές και μπορούν να προσδιοριστούν με βεβαιότητα και **(iv)** μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε διαφορετικές χρήσεις της γης (π.χ. καλλιεργούμενες ή μη καλλιεργούμενες τοποθεσίες). Επιπλέον, η εφαρμογή του MODERN δεν απαιτεί την πραγματοποίηση δειγματοληψίας που περιλαμβάνει διατομές, αλλά μπορεί να αποδώσει πολύ καλά ακόμα κι όταν τα σημεία δειγματοληψίας είναι χωρικά διασκορπισμένα. Η ευελιξία και η αποδοτικότητα του MODERN, ως προς την ικανότητα μετατροπής της παραμένουσας απόθεσης διαφορετικών FRNs σε ρυθμούς ανακατανομής χώματος, δοκιμάστηκε (Arata et al., 2016, Part 1) για δύο μελέτες περιπτώσεων: **(1)** εφαρμογή της τεχνικής του ^{137}Cs σε μη καλλιεργούμενο έδαφος λεκάνης απορροής σε περιοχή των Ιταλικών Άλπεων με χρήση του Μοντέλου Κατανομής-Προφίλ (Profile Distribution Model) (Ceaglio et al., 2012) και **(2)** εφαρμογή της τεχνικής του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ για καλλιεργούμενο έδαφος στην Τρανσυλβανία, Ρουμανία, με χρήση του Μοντέλου Ισοζυγίου Μάζας (Mass Balance Model) (Iurian et al., 2013). Προέκυψε μια υψηλά σημαντική ανταπόκριση (συντελεστής συσχέτισης 0,91) μεταξύ των αποτελεσμάτων του MODERN και των άλλων μοντέλων. Επίσης, εξετάστηκε η δυνατότητα του MODERN για την επέκταση της τεχνικής των FRNs και σε άλλα ραδιενεργά ισότοπα όπως είναι τα $^{239+240}\text{Pu}$ (Arata et al., 2016, Part 2). Η πρόσβαση του MODERN είναι ελεύθερη (modern.umweltgeo.unibas.ch), γεγονός που θα προωθήσει την ευρύτερη εφαρμογή των FRNs ως ιχνηλατών της διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων κάτω από διαφορετικές αγρο-κλιματικές συνθήκες και διαφορετικές χρήσεις της γης.

Εάν, στο μέλλον, τα FRNs πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ευρύτερα σε μεγαλύτερη κλίμακα και να συνεισφέρουν πιο άμεσα στη λήψη αποφάσεων, μια άλλη σημαντική πρόκληση θα είναι η προώθηση της εφαρμογής τους από ερευνητικά εργαλεία σε άμεσα εφαρμόσιμα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

● *Η ατμόσφαιρα ...*

Ορισμένα ραδιενεργά ισότοπα, αμέσως μετά την παραγωγή τους, έχουν την τάση να προσκολλώνται στα σωματίδια του ατμοσφαιρικού αεροζόλ, με αποτέλεσμα να παίρνουν μέρος σε **ατμοσφαιρικές διεργασίες** και να αποτελούν **ιχνηλάτες** τους.

Το κοσμικής προέλευσης ^7Be , λόγω του κατάλληλου χρόνου υποδιπλασιασμού του ($T_{1/2}=53,3$ ημέρες) και της σχετικά εύκολης ανίχνευσής του μέσω της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, έχει ευρύτερα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της *μετακίνησης αερίων μαζών*, όπως είναι η ανταλλαγή στρατοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα, η κατακόρυφη ανάμιξη μέσα στην τροπόσφαιρα, η οριζόντια μεταφορά αερίων μαζών από τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη προς τους πόλους καθώς και η μεταφορά αερίων μαζών που οφείλεται σε τοπικούς παράγοντες. Έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε έρευνες μεταφοράς και απόθεσης σωματιδίων του *ατμοσφαιρικού αεροζόλ* καθώς και ρύπανσης οφειλόμενης σε ρυπαντές αεροζόλ. Επιπλέον, έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό *μοντέλων διάχυσης και γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας*.

Άλλα ραδιενεργά ισότοπα κοσμικής προέλευσης, όπως τα ^{10}Be ($T_{1/2}=1,5 \times 10^6$ έτη) και ^{22}Na ($T_{1/2}=2,6$ έτη), έχουν χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το ^7Be κι έχουν αποδειχτεί σημαντικοί *ιχνηλάτες στρατοσφαιρικών εισβολών*. Όμως, οι δυσκολίες στην ανίχνευσή τους αποτελούν τον κυριότερο περιορισμό που εμποδίζει την ευρύτερη χρήση τους. Εάν τέτοιοι περιορισμοί ξεπεραστούν, το ^{22}Na θα συμβάλλει σημαντικά στην καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την αναδίπλωση της τροπόπαυσης και την ανταλλαγή στρατοσφαιρικού - τροποσφαιρικού αέρα.

Από την άλλη, ο $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ($T_{1/2}=22,3$ έτη), επειδή προέρχεται από το έδαφος, αποτελεί κατάλληλο *ιχνηλάτη* της ηπειρωτικής ή θαλάσσιας *προέλευσης αερίων μαζών*. Η συνδυαστική χρήση του με το ^7Be καθιστά το λόγο τους *ιχνηλάτη της μεταφοράς που σχετίζεται με τη δυναμική των αερίων μαζών*. Οι μοναδικές πηγές προέλευσής τους επιτρέπουν την εκτίμηση της σχετικής σπουδαιότητας των στρατοσφαιρικών και τροποσφαιρικών διαδρομών μεταφοράς αερίων μαζών.

Τέλος, παρόλο που η παραγωγή του τεχνολογικά επαγόμενου ^{137}Cs ($T_{1/2}=30,2$ έτη) έχει πλέον σταματήσει, ωστόσο η επαναιώρησή του από το έδαφος έχει χρησιμεύσει ως *ιχνηλάτης μεταφοράς σκόνης*.

Η καλύτερη κατανόηση της ατμοσφαιρικής κατανομής τέτοιων ραδιενεργών ισωτόπων - ιχνηλατών, η οποία αποκτάται από λεπτομερείς μετρήσεις τους, μπορεί να διευκολύνει και να τελειοποιήσει τα μοντέλα γενικής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, ιδιαίτερα όταν είναι διαθέσιμες μακροπρόθεσμες σειρές δεδομένων, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν με δεδομένα ραδιενεργών ισωτόπων εξαρτώμενων από τον κύκλο του άνθρακα. Τέτοιες έρευνες μπορεί επίσης να έχουν ραδιοοικολογική σημασία για εκείνα τα ραδιενεργά ισότοπα που παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτά που θα μπορούσαν να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια πυρηνικών ατυχημάτων.

● Το έδαφος ...

Κάποια από τα ραδιενεργά ισότοπα, τα αποκαλούμενα **FRNs** (Fallout RadioNuclides), που απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα και εναποτίθενται στο έδαφος, μέσω των διεργασιών της υγρής και ξηρής εναπόθεσης, έχουν την ιδιότητα να προσροφώνται γρήγορα και ισχυρά από τα λεπτόκοκκα σωματίδια του χώματος. Τέτοια ραδιενεργά ισότοπα είναι το τεχνολογικά επαγόμενο ^{137}Cs , ο γεωγενής $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και το κοσμικής προέλευσης ^7Be . Λόγω της γεωχημικής συμπεριφοράς τους, τα παραπάνω ραδιενεργά ισότοπα μετακινούνται μαζί με το χώμα, μόνο μέσω φυσικών διεργασιών, με αποτέλεσμα να λειτουργούν ως **ιχνηλάτες της μετακίνησης του χώματος**, έτσι ώστε, καταγράφοντας μια μεταγενέστερη ανακατανομή τους στο έδαφος, να επιτυγχάνεται η ιχνηλασία των ρυθμών και των χωρικών μορφών της διάβρωσης και της απόθεσης ιζημάτων που συμβαίνει σε μια περιοχή.

Για την εκτίμηση των ρυθμών ανακατανομής χώματος σε μια τοποθεσία εφαρμόζεται η πυρηνική τεχνική που αποκαλείται τεχνική των FRNs, η θεμελιώδης ιδέα της οποίας βασίζεται στη σύγκριση μεταξύ της παραμένουσας απόθεσης (inventory, Bq m^{-2}) του ραδιενεργού ισότοπου στην υπό μελέτη τοποθεσία και της παραμένουσας απόθεσης στην τοποθεσία αναφοράς, δηλαδή σε μια τοποθεσία που δεν υφίσταται ούτε διάβρωση ούτε απόθεση ιζημάτων. Για την εφαρμογή της τεχνικής των FRNs, έχουν καθιερωθεί παγκοσμίως εναρμονισμένα πρωτόκολλα που αφορούν σε μια σειρά τυποποιημένων βημάτων που πρέπει να ακολουθηθούν. Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν το σχεδιασμό της δειγματοληψίας, τη συλλογή δειγμάτων χώματος από βάθος, την προετοιμασία και προ-επεξεργασία των δειγμάτων, τη μέτρηση της ειδικής ραδιενέργειάς τους, τη χρήση μοντέλων μετατροπής της παραμένουσας απόθεσης των ραδιενεργών ισότοπων σε ρυθμούς ανακατανομής χώματος και τέλος την απεικόνιση των εκτιμώμενων ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων σε αντίστοιχους χάρτες.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνικής, έναντι των κλασικών μεθόδων, είναι ότι παρέχει χρονικά ολοκληρωμένες εκτιμήσεις των ρυθμών διάβρωσης του εδάφους και της απόθεσης ιζημάτων καθώς και των χωρικών μορφών ανακατανομής χώματος για πεδία και ευρύτερες περιοχές, *αναδρομικά*, με μία μόνο εκστρατεία δειγματοληψίας, χωρίς την ανάγκη εφαρμογής μακροχρόνιων και δαπανηρών εγκαταστάσεων και προγραμμάτων συστηματικής παρακολούθησης και χωρίς να προκαλείται διαταραχή στην υπό μελέτη περιοχή από την εγκατάσταση του εξοπλισμού μέτρησης. Επιπλέον, οι μετρήσεις παρέχουν δεδομένα, τα οποία ενοποιούν τις επιδράσεις όλων των διεργασιών που οδηγούν σε μεταφορά χώματος μέσα σε μια ευρύτερη έκταση και προς το σύστημα υδάτινων ρευμάτων, παρέχοντας, έτσι, πληροφορίες για τους καθαρούς ρυθμούς ανακατανομής χώματος.

Αρχικά η τεχνική περιλάμβανε μόνο το ^{137}Cs , το οποίο είναι και το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο, ενώ σταδιακά η χρήση της συμπεριέλαβε τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και το ^7Be γεγονός που οφείλεται κυρίως στη βελτίωση των ανιχνευτικών διατάξεων. Λόγω του χρόνου υποδιπλασιασμού του, το ^{137}Cs ($T_{1/2}=30,2$ έτη) χρησιμοποιείται ως ιχνηλάτης *μεσοπρόθεσμων*, (χρονικής κλίμακας 50 ετών περίπου), ανακατανομών χώματος. Από την άλλη, η συνεχής παραγωγή του φυσικού ραδιενεργού ισότοπου σε συνδυασμό με το χρόνο υποδιπλασιασμού του $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ($T_{1/2}=22,3$ έτη) μπορεί να επεκτείνει τη χρονική κλίμακα, παρέχοντας εκτιμήσεις για πιο *μακροπρόθεσμους* (100 ετών περίπου) ρυθμούς ανακατανομής χώματος. Τέλος, ο μικρός χρόνος υποδιπλασιασμού του ^7Be ($T_{1/2}=53,3$ ημέρες), το καθιστά κατάλληλο *ιχνηλάτη βραχυπρόθεσμων* ανακατανομών χώματος, που σχετίζονται με

μεμονωμένες περιόδους έντονων βροχοπτώσεων, κυρίως σε μικρές χωρικές κλίμακες. Εντούτοις, η χρήση του παρουσιάζει περιορισμούς, εξαιτίας κυρίως του μικρού βήματος που πρέπει να επιτευχθεί στην κατά βάθος δειγματοληψία του, γεγονός που οδηγεί σε μικρές ποσότητες συλλεγόμενου χώματος, με αποτέλεσμα να εισάγονται αβεβαιότητες κατά τη γ-φασματοσκοπική του ανάλυση. Σήμερα, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη *συνδυασμένη χρήση FRNs* διότι έτσι παρέχεται η δυνατότητα του καθορισμού ρυθμών διάβρωσης για διαφορετικές χρονικές κλίμακες καθώς και για διαφορετικές τοπικές συνθήκες.

Υπάρχουν διάφορα τρέχοντα θέματα που σχετίζονται με τη βελτίωση της τεχνικής των FRNs και αντιμετωπίζονται από την επιστημονική κοινότητα, ανάμεσα στα οποία περιλαμβάνεται και η βελτίωση των μοντέλων μετατροπής. Απώτερος στόχος είναι η ευρύτερη χρήση της τεχνικής των FRNs σε μεγαλύτερη κλίμακα και η προώθησή της από ερευνητικό εργαλείο σε *άμεσα εφαρμόσιμο* εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την αποτελεσματική διαχείριση του εδάφους και την προστασία του από τη διάβρωση, η οποία αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα υποβάθμισής του.

Οι ωκεανοί ...

Θα ήταν παράλειψη αν δεν αναφέραμε ότι η χρήση ραδιενεργών ισοτόπων δεν περιορίζεται μόνο στη μελέτη της ατμόσφαιρας και του εδάφους, αλλά εκτείνεται και σε διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο **υδάτινο περιβάλλον**. Εκεί, τα εμπλεκόμενα ραδιενεργά ισότοπα - ιχνηλάτες είναι πολύ περισσότερα και δεν συμπεριελήφθησαν στην παρούσα ΔΕ εξαιτίας της μεγάλης έκτασής της. Ενδεικτικά αναφέρουμε μερικά παραδείγματα:

- Ο απεμπλουτισμός του ^{234}Th σε σχέση με το πατρικό του ^{238}U στην επιφάνεια των ωκεανών, χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ρυθμού απομάκρυνσης σωματιδίων από την εύρωτη ζώνη προς το βαθύ ωκεανό. Αυτή η μέθοδος αποτελεί έναν ανεξάρτητο τρόπο καθορισμού της ροής άνθρακα και άλλων στοιχείων από τα επιφανειακά ύδατα προς το βαθύ ωκεανό.
- Τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα ^{210}Pb και ^{210}Po , τα οποία προέρχονται από τη ραδιενεργό σειρά του ^{238}U , παρουσιάζουν διαφορετικές βιοχημικές ιδιότητες: ο ^{210}Pb προσκολλάται σε ιζηματογενή σωματίδια, ενώ το ^{210}Po σχετίζεται με βιολογικές δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στο φυτοπλαγκτόν κι επηρεάζουν την απορρόφηση CO_2 από τους ωκεανούς. Έτσι, η τιμή του λόγου $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ μπορεί να αποτελέσει ιχνηλάτη της συμβολής του φαινομένου του θερμοκηπίου σε κλιματικές αλλαγές.
- Το ^{226}Ra προέρχεται από εναποθέσεις από ηπειρωτικές ακτές, ενώ το ^{228}Ra από ιζήματα στα βάθη των θαλασσών. Λόγω των διαφορετικών τρόπων παραγωγής τους, αποτελούν πολύ καλούς ιχνηλάτες διεργασιών μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα στα σύνορα ακτών - ωκεανών.

Επειδή υπάρχουν πολλά ακόμη παραδείγματα, παραπέμπουμε στο διεθνές πρόγραμμα GEOTRACES (<http://www.geotraces.org/>). Το πρόγραμμα αποσκοπεί στην καλύτερη κατανόηση των βιοχημικών κύκλων και της μεγάλης κλίμακας κατανομής των ιχνοστοιχείων και των ισοτόπων τους στο θαλάσσιο περιβάλλον κι έχει σχεδιαστεί για να μελετήσει τις κυριότερες ωκεάνιες λεκάνες μέσα στην επόμενη δεκαετία.

● *Το περιβάλλον ...*

Αναμφισβήτητα, λοιπόν, πολλά ραδιενεργά ισότοπα έχουν αποδειχθεί πολύτιμοι ιχνηλάτες περιβαλλοντικών διεργασιών. Μετρώντας τη ραδιενέργειά τους και παρακολουθώντας τις μεταβολές των συγκεντρώσεών της, κατανοούμε καλύτερα τους μηχανισμούς που διέπουν τις διεργασίες αυτές. « Το περιβάλλον, αυτό το τόσο σημαντικό και τόσο άγνωστο καμιά φορά, θα το γνωρίσουμε καλύτερα και από μια άλλη σκοπιά. Τη ραδιενέργειά του και τη συμπεριφορά της μέσα σ' αυτό.» (Παπαστεφάνου, 2010: Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος). Η πρόοδος της τεχνολογίας και των αναλυτικών τεχνικών θα παίζει καθοριστικό ρόλο στη μελλοντική εξέλιξη της χρήσης τους σε περιβαλλοντικές έρευνες.

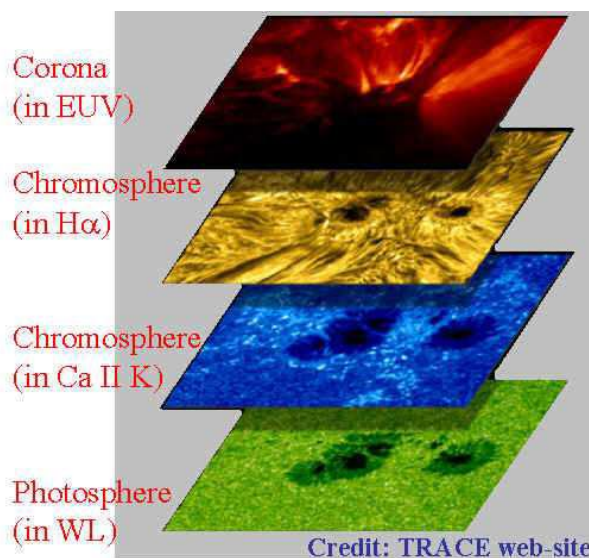
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

A.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Η ηλιακή δραστηριότητα αφορά στην κατάσταση εκείνη του Ήλιου κατά την οποία παρατηρείται στην ατμόσφαιρά του εκδήλωση έκτακτων και βίαιων φαινομένων. Τα φαινόμενα αυτά σχετίζονται με την ανάπτυξη πολύ ισχυρών μαγνητικών πεδίων πάνω στην επιφάνεια του, τα οποία αντλούν την προέλευσή τους από τη ζώνη μεταφοράς. Δηλαδή, ο όποιος σχηματισμός εμφανίζεται σε κάθε μια από τις ζώνες της ατμόσφαιρας αποτελεί συνέχεια ή απόρροια σχηματισμού της αμέσως προηγούμενης ζώνης. Τα φαινόμενα αυτά δεν παρουσιάζονται σε μόνιμη βάση, ούτε έχουν πάντα την ίδια ένταση. Έχουν περιοδικό χαρακτήρα και πολλές φορές οι μεταβολές τους είναι εκρηκτικές. Η περίοδος εμφάνισής τους, που είναι κατά μέσον όρο 11,6 χρόνια, ονομάζεται **ηλιακός κύκλος** ή **κύκλος ηλιακής δράσης**, με μία μετάβαση από το ελάχιστο της δράσης στο μέγιστο αυτής· είναι δε γνωστός και με το όνομα **ενδεκαετής κύκλος (11ετής κύκλος)**. Τα ποσά της ενέργειας που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια αυτού του κύκλου, κυρίως κατά τη διάρκεια του μεγίστου, είναι τεράστια και επηρεάζουν δραστικά τις μαγνητόσφαιρες των πλανητών (Εικόνα Α.5), αλλά και τη ζωή πάνω σε αυτούς.

Σημειώνουμε, πως οι διάφοροι σχηματισμοί που εξετάζονται στην ίδια ζώνη της ατμόσφαιρας του Ήλιου δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, καθώς μπορεί να αποτελούν χρονική εξέλιξη ο ένας του άλλου (π.χ. πυρσοί, πόροι, κηλίδες). Ακόμα, οι σχηματισμοί από ζώνη σε ζώνη δεν είναι, συνήθως, ανεξάρτητοι μεταξύ τους, αφού μπορεί να αποτελούν συνέχεια του ίδιου σχηματισμού. Απλώς, επειδή η ατμόσφαιρα του Ήλιου μελετάται μονοχρωματικά, κάθε φορά απεικονίζουμε και διαφορετικό βάθος (Εικόνα Α.1). Έτσι, δίνουμε στους σχηματισμούς που μελετάμε σε κάθε ζώνη – αλλά και σε διαφορετικές περιοχές της ίδιας ζώνης – διαφορετικά ονόματα, για να ξεχωρίζουμε ίσως με αυτό τον τρόπο τόσο το βάθος στο οποίο αναφερόμαστε, όσο και τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Επίσης, οι όποιοι σχηματισμοί μιας ζώνης μπορεί να απεικονίζονται και στην επόμενη, όμως συνηθίζουμε να τους κατατάσσουμε κατά την περιγραφή μας στη ζώνη, όπου αυτοί πρωτοεμφανίζονται. Για παράδειγμα, οι κηλίδες, αν και σχηματισμοί της φωτόσφαιρας, απεικονίζονται και στα μήκη κύματος που μελετάμε τη χρωμόσφαιρα.

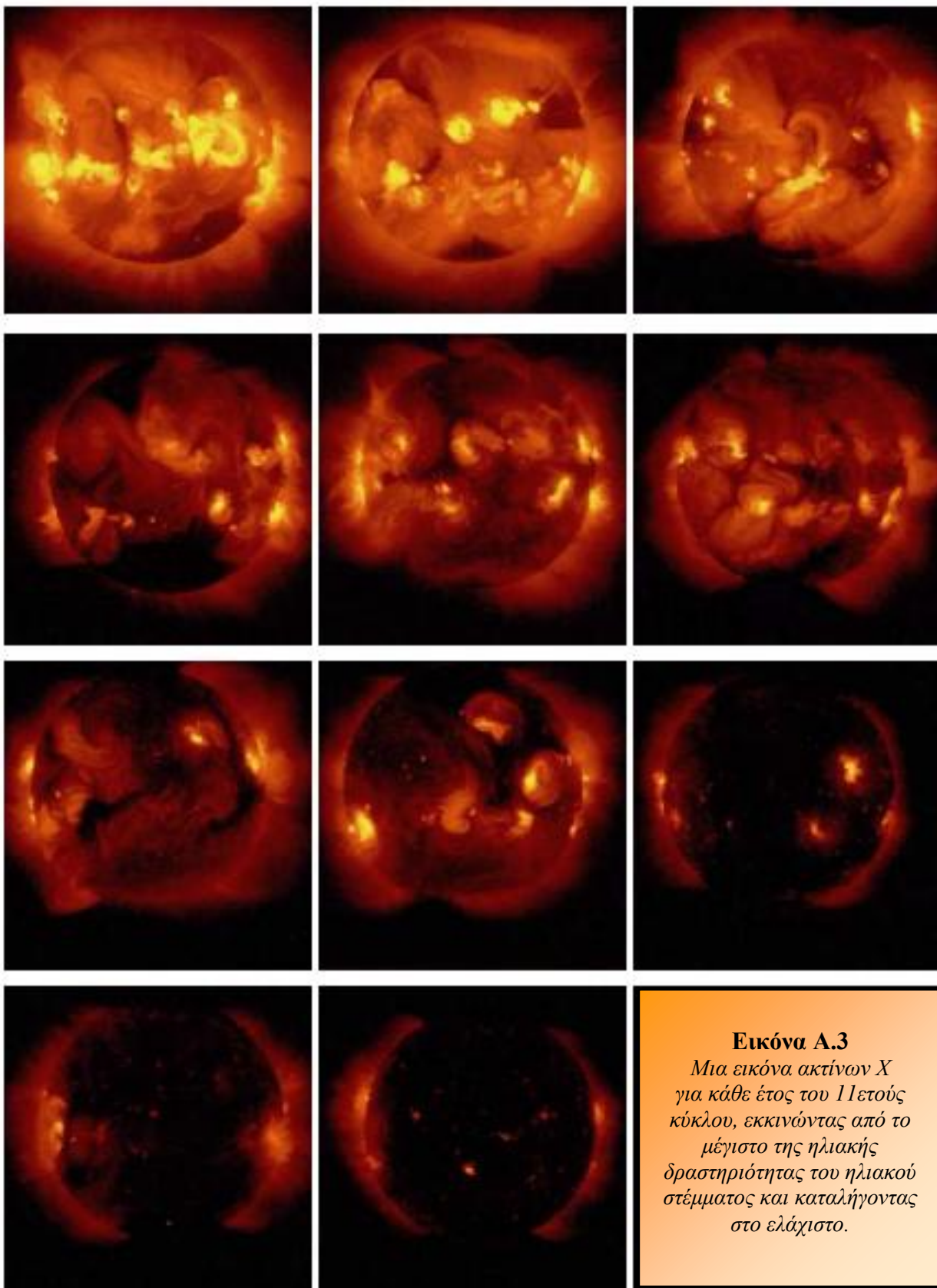


Εικόνα Α.1

Στον πίνακα της Εικόνας Α.2 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη των φαινομένων της ηλιακής δραστηριότητας – τα οποία συσχετίζονται άμεσα με την εξέλιξη του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου – όπου η χρονική εξέλιξη των φαινομένων δίνεται από πάνω προς τα κάτω για το ίδιο στρώμα και από αριστερά προς τα δεξιά για διαφορετικά ηλιακά στρώματα.

Εικόνα Α.2 Χρονική εξέλιξη των φαινομένων της ηλιακής δραστηριότητας, τα οποία συσχετίζονται άμεσα με την εξέλιξη του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου. (Πρέκα - Παπαδήμα Π., Δανέζης, Μ., Θεοδοσίου, Σ., Καργιολάκη, Δ., 2009. Στα μονοπάτια του ήλιου – Εισαγωγή στην ηλιακή φυσική).

Εσωτερικό του Ήλιου	Ηλιακή ατμόσφαιρα			
	ΖΩΝΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	ΦΩΤΟΣΦΑΙΡΑ	ΧΡΩΜΟΣΦΑΙΡΑ	ΣΤΕΜΜΑ
Δημιουργία του ασθενούς μαγνητικού πεδίου του Ήλιου B = 1 Gauss				
Διαφορική περιστροφή του Ήλιου και αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου	Κέντρο δράσης			
Δημιουργία μαγνητικών κορδονιών B = 800 Gauss	Φωτοσφαιρικοί πυρσοί	Χρωμοσφαιρικοί πυρσοί ή Λαμπρές εκτάσεις		
Έναρξη ανάδυσης μαγνητικού κορδονιού B = 1.500 Gauss	Πόροι			
Ανάδυση μαγνητικού κορδονιού στη φωτόσφαιρα B = 3.000 - 4.000 Gauss	Κηλίδες	<ul style="list-style-type: none"> • Χρωμοσφαιρική υπερπαρασκιά • Νημάτια • Λαμπρές ψηφίδες 	Μαγνητικοί βρόχοι	
	Ομάδα κηλίδων Διπολική μαγνητική περιοχή (κέντρο δράσης)	Νημάτια ή προεξοχές ↓ Εκλάμπειες	<ul style="list-style-type: none"> • Ανοιχτές δομές στέμματος • Μαγνητικά κορδόνια • Συμπυκνώσεις • Ενεργά streamers • Στεμματικές οπές CMEs (πλασμοειδές)	
			Μαγνητικά νέφη	
			Διαταραχή ηλιακού ανέμου	
			Διαστημικός καιρός (μαγνητικές καταιγίδες και υποκαταιγίδες)	



Εικόνα Α.3

Μια εικόνα ακτίνων Χ για κάθε έτος του 11ετούς κύκλου, εκκινώντας από το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας του ηλιακού στέμματος και καταλήγοντας στο ελάχιστο.

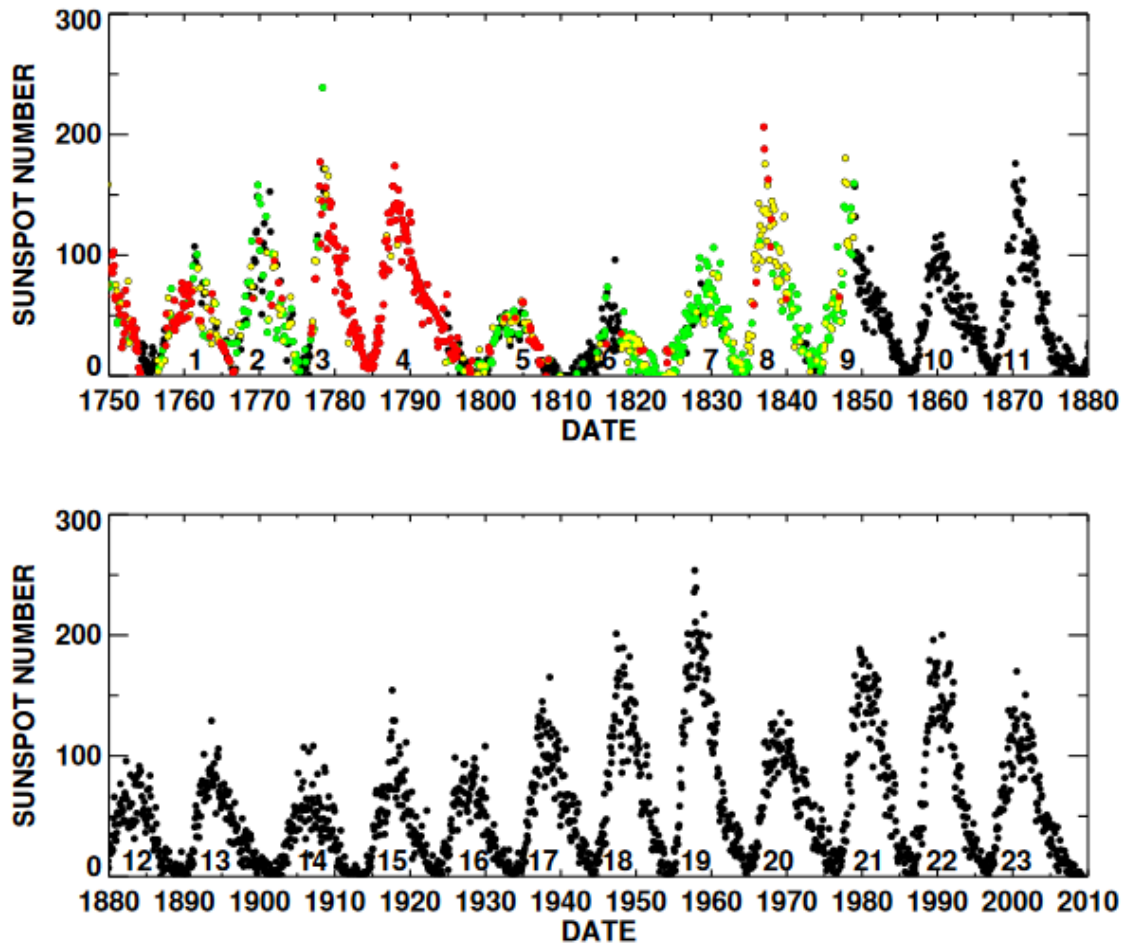


Figure 2: Monthly averages of the daily International Sunspot Number. This illustrates the solar cycle and shows that it varies in amplitude, shape, and length. Months with observations from every day are shown in black. Months with 1–10 days of observation missing are shown in green. Months with 11–20 days of observation missing are shown in yellow. Months with more than 20 days of observation missing are shown in red. [Missing days from 1818 to the present were obtained from the International daily sunspot numbers. Missing days from 1750 to 1818 were obtained from the Group Sunspot Numbers and probably represent an over estimate.]

Εικόνα Α.4

Η αρίθμηση των 11ετών κύκλων του ήλιου. (Hathaway, 2010)

A.2 Κοσμική ακτινοβολία

Κοσμική ακτινοβολία είναι μία κατηγορία ακτινοβολίας που αποτελείται από σωματίδια υψηλών ενεργειών, τα οποία παράγονται στο Σύμπαν και προσκρούουν στην ατμόσφαιρα της Γης με ανιχνεύσιμα αποτελέσματα. Τα είδη της κοσμικής ακτινοβολίας είναι:

- **Πρωτογενής** σωματιδιακή ακτινοβολία πολύ υψηλής ενέργειας, η οποία προέρχεται:
 - Από τον γαλαξία με ενέργεια που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 10^8 - 10^{11} keV και μπορεί να φτάσει τα 10^{20} keV. Αποτελείται κυρίως από:
 - πρωτόνια (~87%),
 - σωματίδια-α (~11%),
 - βαρύτερα σωματίδια (~1%).
 - Από τον ήλιο με ενέργεια που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1-100 MeV και μπορεί να φτάσει έως αρκετά GeV. Αποτελείται κυρίως από:
 - πρωτόνια,
 - σωματίδια-α
- **Δευτερογενής** ακτινοβολία, η οποία παράγεται κατά την αλληλεπίδραση της πρωτογενούς με την ατμόσφαιρα, μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται θρυμματισμός ή **κατακερματισμός (spallation)**. Η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από τρεις κύριες συνιστώσες, τη νουκλεονική συνιστώσα, τη σκληρή ή μεσονική συνιστώσα και τη μαλακή ή ηλεκτρονική-φωτονική συνιστώσα. Η **νουκλεονική** συνιστώσα αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια, η **σκληρή** ή **μεσονική** συνιστώσα αποτελείται από μίονια και είναι πολύ διεισδυτική και η **μαλακή ηλεκτρονική - φωτονική** συνιστώσα αποτελείται από ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Η ατμόσφαιρα της Γης

B.1 Εισαγωγή

Η **ατμόσφαιρα** είναι το αεριώδες περίβλημα της Γης, το οποίο συμμετέχει στις κινήσεις της, καθώς συγκρατείται από τις βαρυτικές δυνάμεις. Συνεπώς η ατμόσφαιρα, εκτός των άλλων κινήσεών της, περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της Γης, από τα δυτικά προς τα ανατολικά με ταχύτητα διαφορετική από αυτήν της περιστροφής της Γης.

Το ύψος στο οποίο φτάνει η ατμόσφαιρα, είναι δύσκολο να υπολογιστεί, γι' αυτό και δεν έχει σαφή όρια. Τα ανώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας είναι τόσο αραιά, ώστε είναι δύσκολο να προσδιοριστεί το ακραίο σημείο ανάμεσα σ' αυτήν και το ενδοπλανητικό διάστημα.

Η σύσταση της γήινης ατμόσφαιρας στα κατώτερα στρώματά της, αποτελείται από:
(i) ένα μίγμα αερίων που αποτελούν τον ξηρό αέρα, (ii) υδρατμούς και γενικά από νερό και στις τρεις καταστάσεις (στερεή, υγρή και αέρια), (iii) διάφορα αιωρούμενα σωματίδια σε στερεή ή υγρή κατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, ο ξηρός αέρας αποτελείται από άζωτο (N_2) σε ποσοστό περίπου 78%, από οξυγόνο (O_2) σε ποσοστό περίπου 21% και από διάφορα άλλα αέρια, όπως το αργό (Ar), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το ήλιο (He), το νέο (Ne), το κρυπτό (Kr), το όζον (O_3) και άλλα σε ποσοστό που φτάνει μόλις το 1 %. Οι υδρατμοί που θεωρούνται φορείς της θερμικής ενέργειας του πλανήτη Γη, είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία νεφών, ομιχλών και άλλων ατμοσφαιρικών υδατωδών κατακρημνισμάτων, όπως είναι η βροχή, το χιόνι, το χαλάζι κ.α. Τέλος, τα αιρούμενα σωματίδια διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο με την επίδρασή τους σε διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα.

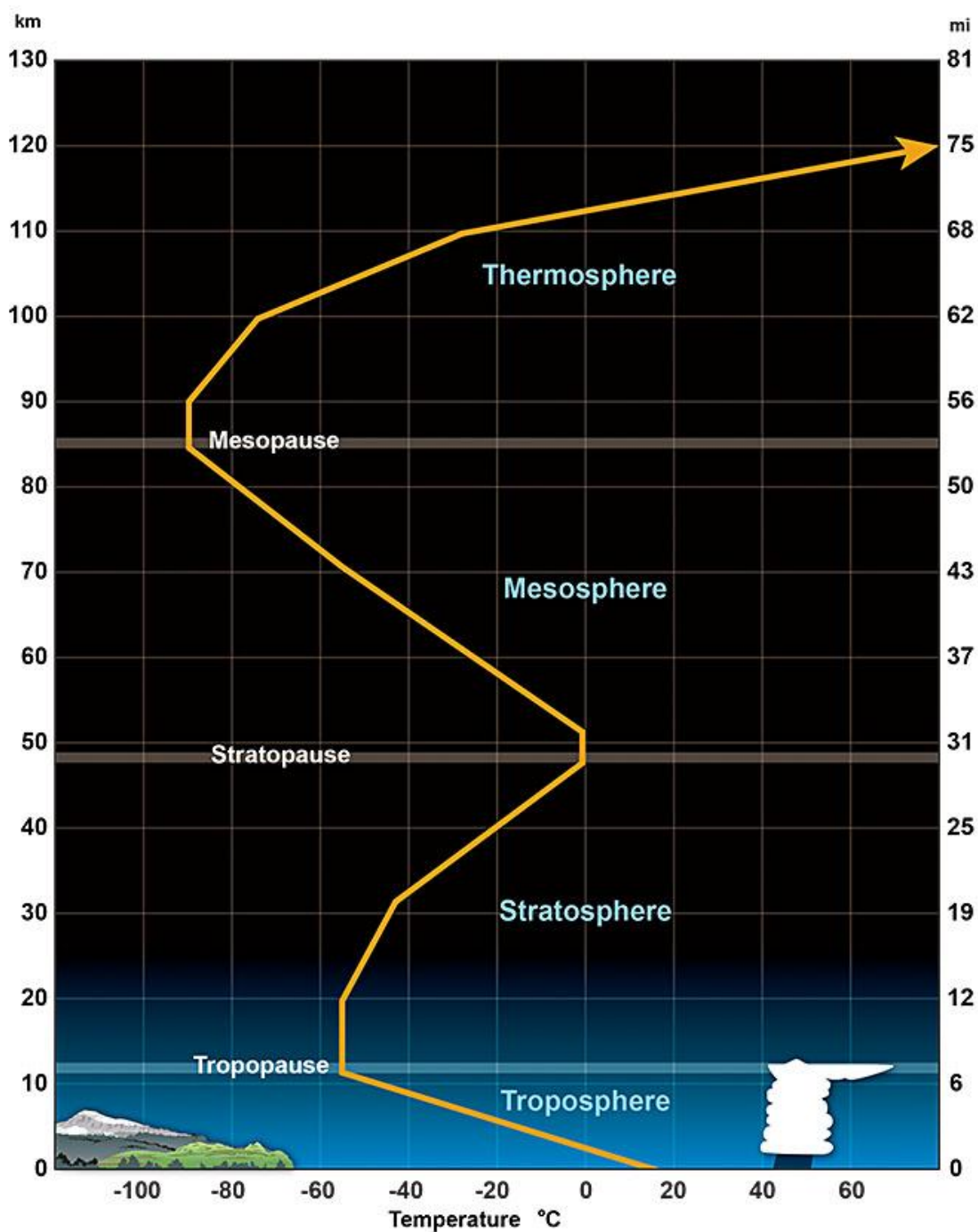
B.2 Κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας

Το κατακόρυφο προφίλ της ατμόσφαιρας μάς δείχνει ότι αυτή μπορεί να διαιρεθεί σε διάφορα στρώματα. Η ατμόσφαιρα αποτελείται από αλληπάλλληλα στρώματα, των οποίων όμως τα ακριβή όρια εξαρτώνται από τον τρόπο με τον οποίο ορίζεται κάθε στρώμα, αφού ο προσδιορισμός τους μπορεί να γίνει είτε με τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η θερμοκρασία μέσα σε αυτά είτε με τα αέρια τα οποία συνιστούν το στρώμα είτε τέλος με βάση τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας. Στη Μετεωρολογία ακολουθείται η ταξινόμηση που χρησιμοποιεί η Διεθνής Ένωση Γεωδαισίας και Γεωφυσικής, η οποία διαιρεί την ατμόσφαιρα σε διάφορα στρώματα με βάση τα *θερμικά* τους χαρακτηριστικά. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τα ακόλουθα στρώματα, ξεκινώντας από την επιφάνεια της Γης (Εικόνα B.1):

- Τροπόσφαιρα ($0 \leq H \leq 11$ km)
- Στρατόσφαιρα ($11 \leq H \leq 47$ km)
- Μεσόσφαιρα ($47 \leq H \leq 84,9$ km)
- Θερμόσφαιρα ($84,9 \leq H$ km)

Μεταξύ των στρωμάτων αυτών παρεμβάλλονται τρεις μεταβατικές ζώνες οι οποίες φέρουν τα ονόματα:

- Τροπόπαυση (H = 11 km)
- Στρατόπαυση (H = 47 km)
- Μεσόπαυση (H = 84.9 km)



Εικόνα Β.1

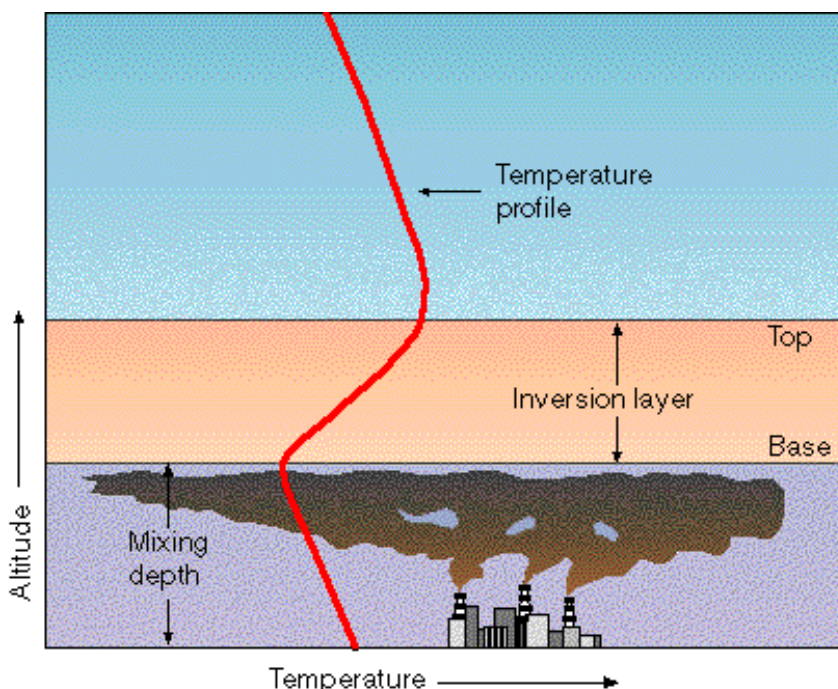
Κατακόρυφο προφίλ της μέσης θερμοκρασία στα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Πηγή: <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/atmos/layers.html>

Η **τροπόσφαιρα**, το κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας, περιέχει το 75% της μάζας όλων των ατμοσφαιρικών αερίων, καθώς επίσης το σύνολο σχεδόν της μάζας των υδρατμών και μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων. Στην *τροπόσφαιρα* η *θερμοκρασία παρουσιάζει μια συνεχή ελάττωση από την επιφάνεια της Γης μέχρι ένα ύψος περίπου 11 km*. Η ελάττωση της θερμοκρασίας με την αύξηση του ύψους οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι ο Ήλιος θερμαίνει την επιφάνεια της Γης, η οποία με τη σειρά της θερμαίνει τον υπερκείμενο αέρα. Ο ρυθμός με τον οποίο ελαττώνεται η θερμοκρασία του αέρα με το ύψος ονομάζεται **κατακόρυφη θερμοβαθμίδα**. Η μέση ή η κανονική θερμοβαθμίδα στην τροπόσφαιρα ισούται με 6,5°C για κάθε 1000 m ύψους. Το τμήμα αυτό της ατμόσφαιρας, η τροπόσφαιρα, περικλείει όλα τα γνωστά καιρικά φαινόμενα τα οποία συμβαίνουν στη Γη. Στη ζώνη αυτή εκδηλώνονται όλα τα ανοδικά και καθοδικά ρεύματα του αέρα και τα μόρια των αερίων μπορούν να κυκλοφορούν μέσα στο πάχος των 10 km μέσα σε λίγες μόνο ημέρες.

Το κατώτερο στρώμα της τροπόσφαιρας που είναι σε άμεση επαφή με την επιφάνεια της Γης ορίζει το **Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα** (Atmospheric Boundary Layer, ABL). Οι μεταβολές που συμβαίνουν μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα της γης προκαλούνται από τις δυνάμεις τριβής, την εξάτμιση, την μεταφορά θερμότητας, τις εκπομπές αερίων και στερεών ρύπων, καθώς επίσης και από την τοπογραφία της περιοχής (πχ πεδιάδες, χαμηλοί λόφοι, βουνά, κλπ).

Εικόνα Β.2
Αναστροφή θερμοκρασίας.



© 1998 Wadsworth Publishing Company/ITP

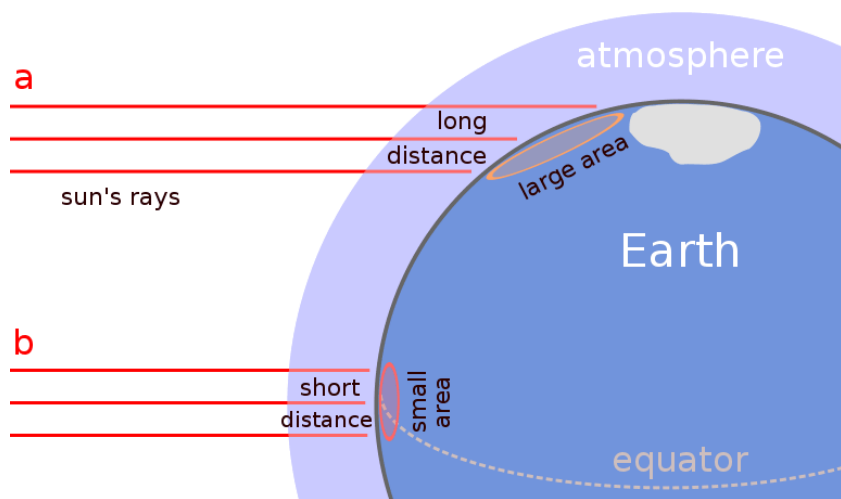
Όταν η ατμόσφαιρα παρουσιάζει κανονική θερμοκρασιακή στρωμάτωση, τότε η θερμοκρασία είναι φυσιολογικό να μειώνεται συνεχώς όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της Γης. Μερικές φορές, όταν επικρατούν ειδικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, η θερμοκρασία πάνω από ένα ορισμένο ύψος αρχίζει να αυξάνεται αντί να συνεχίζει τον ρυθμό της ελάττωσής της. Αυτό το φαινόμενο της αντιστροφής της θερμοβαθμίδας είναι γνωστό ως **αναστροφή της θερμοκρασίας** ή θερμοκρασιακή αναστροφή και το στρώμα του αέρα μέσα στο οποίο εκδηλώνεται αυτή ονομάζεται **στρώμα αναστροφής (inversion layer)** (Εικόνα Β.2).

Επάνω από τα 11 km η θερμοκρασία παύει να ελαττώνεται με το ύψος. Εδώ η θερμοβαθμίδα είναι μηδενική. Αυτή η περιοχή όπου η θερμοκρασία παραμένει σταθερή με το ύψος χαρακτηρίζεται ως *ισοθερμική ζώνη*. Η βάση αυτής της ζώνης οριοθετεί την κορυφή της τροπόσφαιρας και η κορυφή της την αρχή του επόμενου στρώματος, της στρατόσφαιρας. Αυτό το ισόθερμο στρώμα που χωρίζει την τροπόσφαιρα από την στρατόσφαιρα ονομάζεται **τροπόπαυση**. Το ύψος της ποικίλλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή. Η *τροπόπαυση βρίσκεται υψηλότερα στην Ισημερινή περιοχή και μειώνει το ύψος της καθώς κινούμαστε προς τους πόλους*. Επίσης, η *τροπόπαυση βρίσκεται υψηλότερα το καλοκαίρι και χαμηλότερα το χειμώνα σε όλα τα γεωγραφικά πλάτη*.

Σε ύψος περίπου 20 km μέσα στην **στρατόσφαιρα**, η θερμοκρασία του αέρα αρχίζει να αυξάνεται με το ύψος, δηλαδή πρόκειται για αναστροφή της θερμοκρασίας. Το στρώμα της αναστροφής μαζί με το υποκείμενο ισοθερμικό στρώμα της τροπόπαυσης δεν επιτρέπουν στα ανοδικά ρεύματα της τροπόσφαιρας να διεισδύσουν στη στρατόσφαιρα. Επίσης, η αναστροφή αποτρέπει τις ανοδικές κινήσεις μέσα στη στρατόσφαιρα, καθιστώντας την ένα σχεδόν αδιατάρακτο στρώμα. Μολονότι η θερμοκρασία αυξάνεται με το ύψος, θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι σε τέτοια υψόμετρα οι θερμοκρασίες παραμένουν αρκετά κάτω του μηδενός. Το αίτιο της δημιουργίας της αναστροφής στη στρατόσφαιρα είναι η συγκέντρωση μεγάλων ποσοτήτων όζοντος (O₃) στα ύψη αυτά. Το O₃ απορροφά μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας θερμαίνοντας την ατμόσφαιρα και δημιουργώντας την αναστροφή της θερμοκρασίας.

B.3 Γεωγραφική κατανομή ισοζυγίου ενέργειας και μεταφορά της

Η βασική πηγή ενέργειας της Γης είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν φτάνει παντού στην επιφάνεια της Γης με τον ίδιο τρόπο. Σ' αυτό ευθύνεται το σχήμα της Γης, το οποίο είναι σχεδόν σφαιρικό, με αποτέλεσμα οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν σχεδόν κάθετα μόνο στην περιοχή του ισημερινού, καθώς και σε μικρά γεωγραφικά πλάτη πάνω και κάτω από αυτόν. Στις περιοχές των μεγαλύτερων γεωγραφικών πλατών, οι ηλιακές ακτίνες, αν και παρέχουν τα ίδια ποσά ενέργειας με αυτά των μικρότερων πλατών, προσπίπτουν πλάγια, με αποτέλεσμα η ενέργεια να πρέπει να κατανεμηθεί σε μεγαλύτερη επιφάνεια (Εικ. B.3). Επομένως, οι περιοχές κοντά στους πόλους δεν θερμαίνονται το ίδιο ισχυρά με αυτές γύρω από τον ισημερινό.



Εικόνα B.3

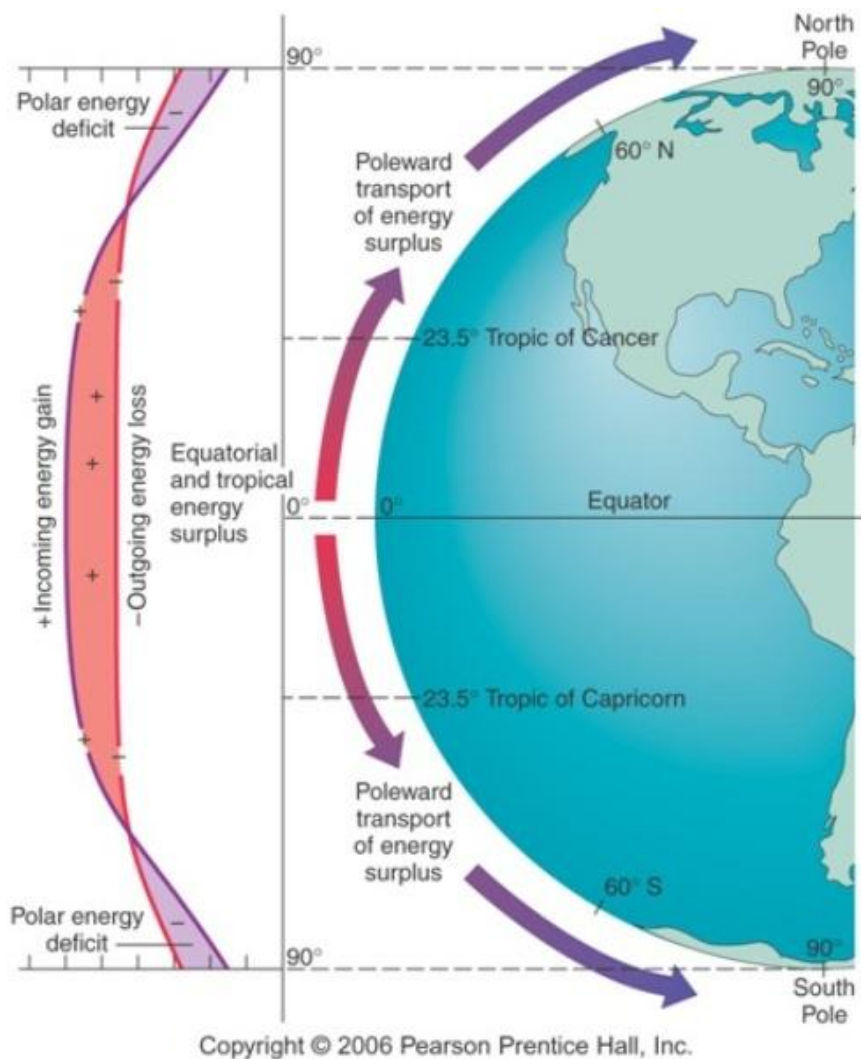
Σχηματική απεικόνιση της γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών πάνω στην επιφάνεια της γης σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος.

Πηγή: https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/factors_affecting_climate_weather.html

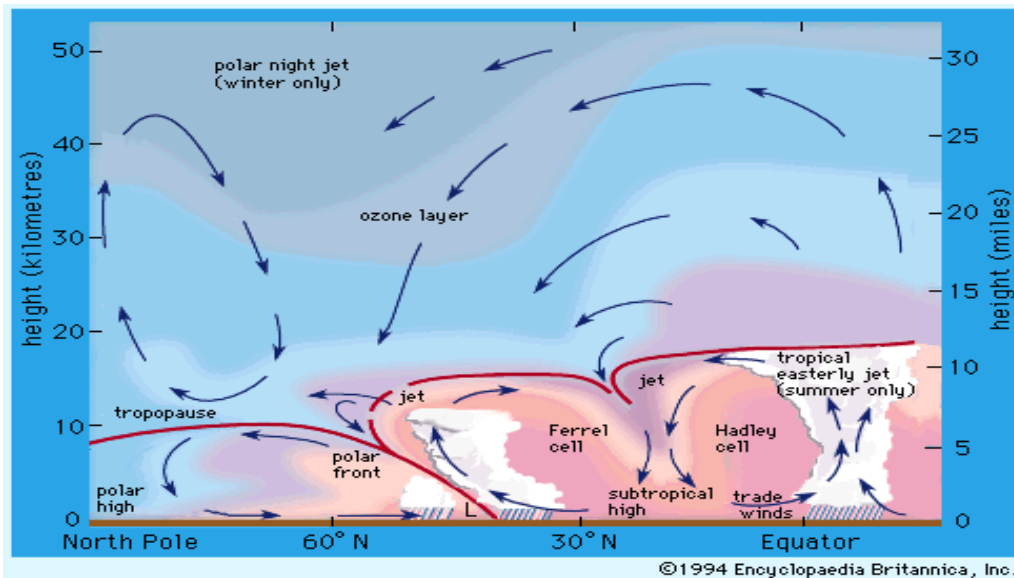
Η κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και της εκπεμπόμενης πλανητικής ακτινοβολίας δεν είναι ομοιόμορφη σε όλα τα γεωγραφικά πλάτη. Υπάρχει ένα ενεργειακό πλεόνασμα σε μια εκτεταμένη ζώνη γύρω από τον ισημερινό (γεωγραφικά πλάτη $<35^\circ$) και ένα έλλειμμα στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη ($>35^\circ$), όπως φαίνεται στην Εικόνα Β.4. Αυτό το πλεόνασμα ενέργειας, μεταφέρεται σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, όπου υπάρχει έλλειμμα ενέργειας.

Εικόνα Β.4

Γεωγραφική κατανομή ισοζυγίου ενέργειας και μεταφοράς του πλεονάσματος ενέργειας προς τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.



Εφόσον η θέρμανση της Γης είναι μεγαλύτερη στον ισημερινό, ο ζεστός αέρας διαστέλλεται και ανεβαίνει προς τα πάνω. Αέριες μάζες από άλλες περιοχές τείνουν να τον αντικαταστήσουν. Αυτή η ροή προς τις πολικές περιοχές, με ταυτόχρονη ψύξη λόγω ακτινοβολίας, ισοσταθμίζεται με ροή αέρα προς τον ισημερινό. Περίπου στις 30° βόρειου και νότιου πλάτους ο αέρας κατεβαίνει ξανά, κλείνοντας την κυψελίδα κυκλοφορίας Hadley. Η μεσημβρινή κυκλοφορία της ατμόσφαιρας τροποποιείται σημαντικά από την επίδραση της περιστροφής της Γης, μεταφέροντας ενέργεια κατά μήκος των γεωγραφικών παραλλήλων. Μια ασθενέστερη μεσημβρινή συνιστώσα της κυκλοφορίας μεταφέρει ενέργεια από τις υποτροπικές προς τις πολικές περιοχές (Εικόνα Β.5i).

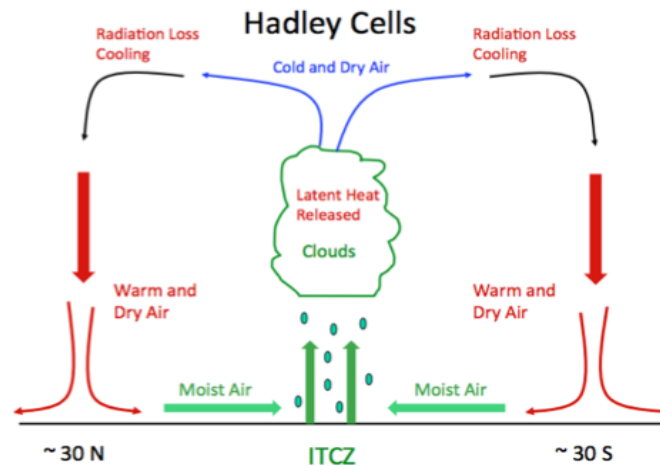


(i)

Εικόνα Β.5

Σχηματική απεικόνιση

- (i) της μεσημβρινής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας και
- (ii) της κυψελίδας Hadley.

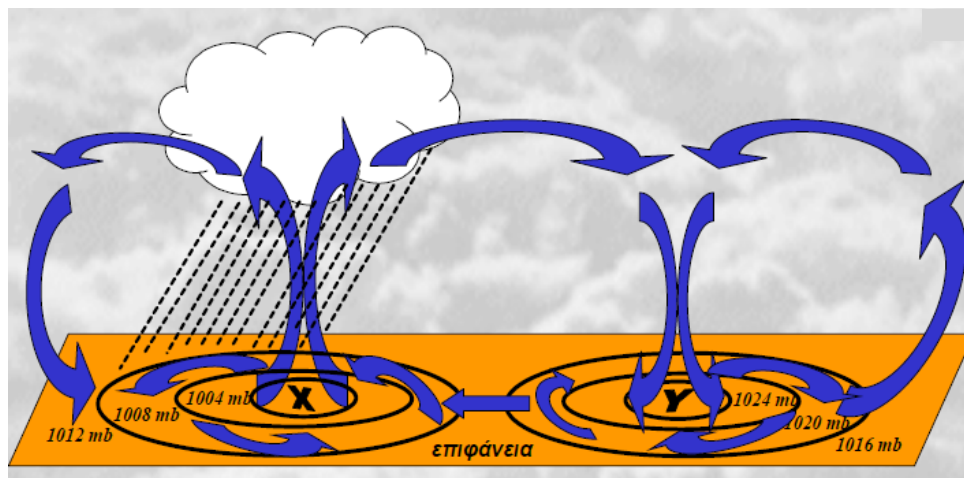


(ii)

Στο απλοποιημένο αυτό σχήμα της κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ορισμένοι περιορισμοί, όπως η διατήρηση του ισοζυγίου νερού, του ισοζυγίου μάζας της ατμόσφαιρας και του ισοζυγίου γωνιακής ορμής του πλανήτη (ανατολικοί – δυτικοί άνεμοι σε ισορροπία).

Στις τροπικές περιοχές, οι ανοδικές κινήσεις του ζεστού αέρα οδηγούν στη δημιουργία μεγάλων νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης. Ο σχηματισμός των νεφών αυτών, τα οποία φθάνουν και μέσα στη στρατόσφαιρα, απαιτεί αρχικά και απελευθερώνει αργότερα μεγάλα ποσά ενέργειας, με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Με την εξάτμιση απορροφάται ενέργεια, ενώ με τη συμπύκνωση των υδρατμών απελευθερώνεται ξανά θερμότητα. Με τον μηχανισμό της λανθάνουσας θερμότητας επιτυγχάνεται η κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας (Εικόνα Β.5ii).

Η διαφορετική θέρμανση των διαφόρων περιοχών της Γης προκαλεί διαφορές στην πίεση. Η σχέση μεταξύ των βαρομετρικών συστημάτων και των **ανοδικών** και **καθοδικών** κινήσεων των αερίων μαζών, όπως αυτών που περιγράψαμε παραπάνω, φαίνονται στην Εικόνα Β.6.

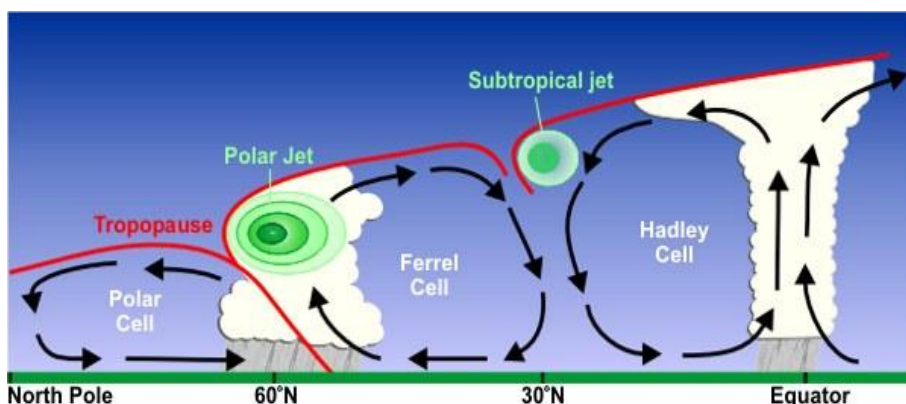


Εικόνα Β.6

Σχηματική παράσταση της κυκλοφορίας στην επιφάνεια και σε μεγαλύτερα ύψη εντός της τροπόσφαιρας, για την περίπτωση κυκλωνικού (X) και αντικυκλωνικού (Y) βαρομετρικού συστήματος. Σύγκλιση προς το κέντρο της ύψησης δημιουργεί **ανοδικές κινήσεις** των αερίων μαζών (εκτόνωση → υγροποίηση → δημιουργία νεφών → βροχοπτώσεις). Απόκλιση των αερίων μαζών στο κέντρο του αντικυκλώνα προκαλεί **καθοδικές κινήσεις** (θέρμανση).

B.4 Ύψος τροπόπαυσης - Αναδίπλωση της τροπόπαυσης - Ανταλλαγή στρατοσφαιρικού και τροποσφαιρικού αέρα - Αεροχειμάρροι - Κύματα Rossby

Σε περιοχές με μεγάλη κατακόρυφη διάτμηση και έντονες μεσημβρινές θερμοβαθμίδες, η τροπόπαυση παρουσιάζει ασυνέχειες, συμβαίνει δηλαδή η λεγόμενη **αναδίπλωση της τροπόπαυσης (Tropopause Folding)** (Εικόνα Β.9). Έχει παρατηρηθεί ότι στις θέσεις αυτές γίνεται ανάμιξη στρατοσφαιρικού και τροποσφαιρικού αέρα (Stratosphere to Troposphere Exchange, **STE**) (Εικόνα Β.8). Επίσης, οι ασυνέχειες αυτές οριοθετούν τις θέσεις των **αεροχειμάρρων (jet streams)** (Εικόνα Β.7), δηλαδή των πολύ ισχυρών ανέμων, που δρουν σε περιορισμένο χώρο και που υπερβαίνουν σε ένταση και τους 100 κόμβους (1 κόμβος = 1,9 km/h).



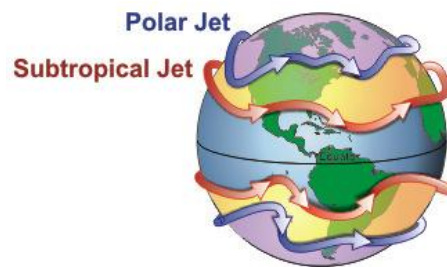
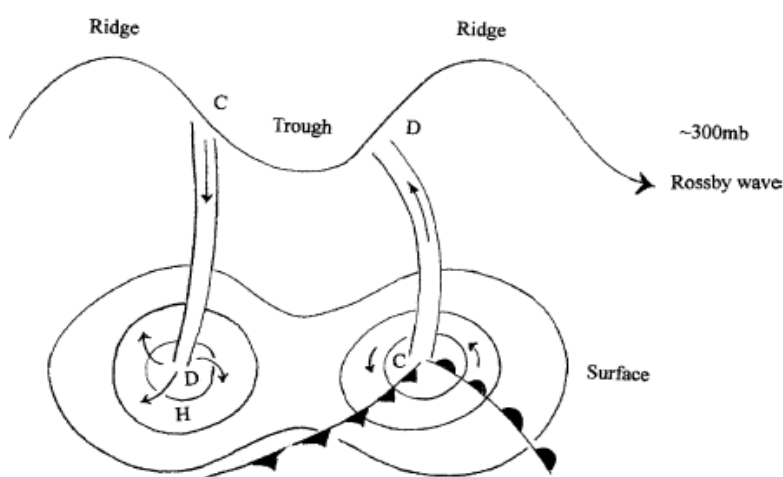
Εικόνα Β.7

Σχηματική απεικόνιση αεροχειμάρρων.

Πηγή:

<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/global/jet.htm>

Οι αεροχείμαρροι δημιουργούν μεγάλης κλίμακας κυματοειδείς σχηματισμούς, τα **κύματα Rossby**, που αποτελούνται από ζεύγος αντικυκλώνα και κυκλώνα (Εικόνα Β.8)..



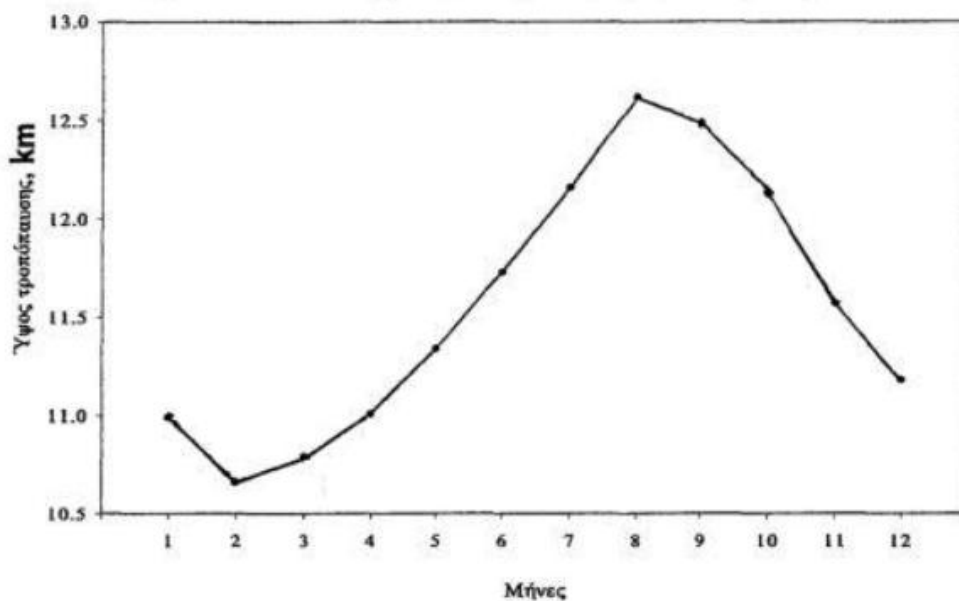
Εικόνα Β.8

Σχηματική απεικόνιση των **κυμάτων Rossby**

(H: αντικυκλώνας, L: κυκλώνας, C: σύγκλιση, D: απόκλιση).

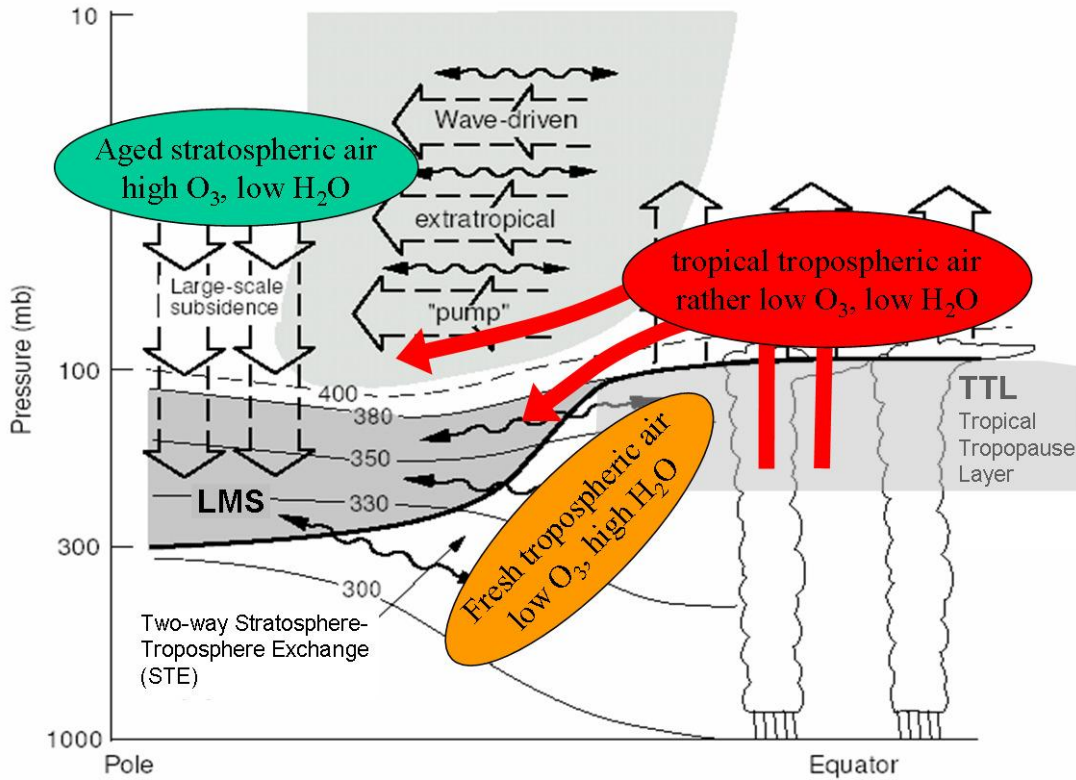
(Yoshimori, 2005a)

Το **ύψος της τροπόπαυσης** δεν είναι σταθερό εξαιτίας της μη ομοιόμορφης κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. Έτσι, εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, τη εποχή και τα καιρικά φαινόμενα. Είναι μεγαλύτερο (~16 km) πάνω από τις τροπικές περιοχές και μικρότερο (~ 8 km) στους πόλους. Επίσης, το ύψος της τροπόπαυσης είναι μεγαλύτερο πάνω από αντικυκλώνες καθώς και όταν η θερμοκρασία της τροπόσφαιρας αυξάνεται (Εικόνα Β.9).



Εικόνα Β.9

Μεταβολή του ύψους της τροπόπαυσης στη Θεσσαλονίκη κατά τους μήνες του έτους για την περίοδο 1987-1993. (Ιωαννίδου, 1995)



Εικόνα Β.10

Σχηματική απεικόνιση των διαδρομών μεταφοράς των αερίων μαζών που επηρεάζουν την Ανώτερη Τροπόσφαιρα και τη Χαμηλότερη Στρατόσφαιρα (Upper Troposphere / Lower Stratosphere, UTLS). Η τροπόπαυση απεικονίζεται με την παχιά γραμμή. (Holton et al., 1995, Engel and Bonisch, 2011)

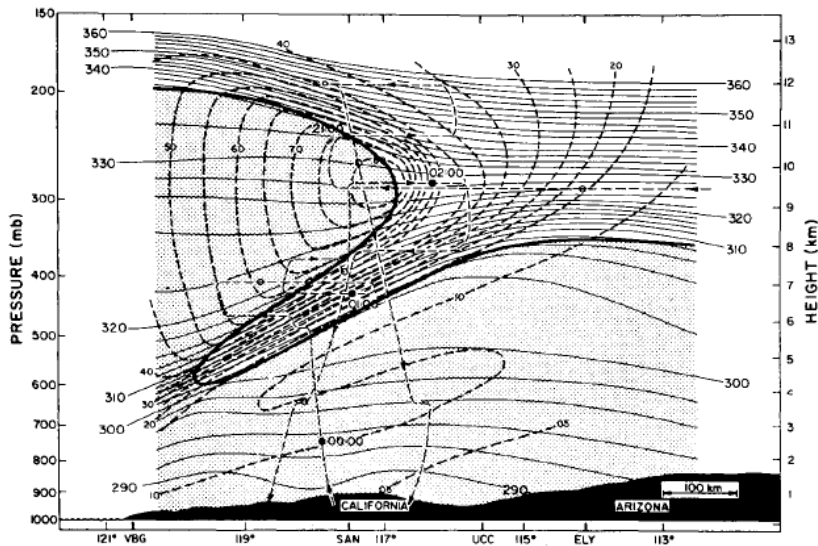


Figure 7. Cross section through strong three-dimensional tropopause-folding event of March 13, 1978, showing region of tropospheric air (stippled), potential temperature (thin solid contours), wind speed (in meters per second; dashed contours), research aircraft flight track (thin dashed lines), and potential vorticity tropopause (heavy solid line). (From Shapiro [1980]; copyright American Meteorological Society.)

Εικόνα Β.11

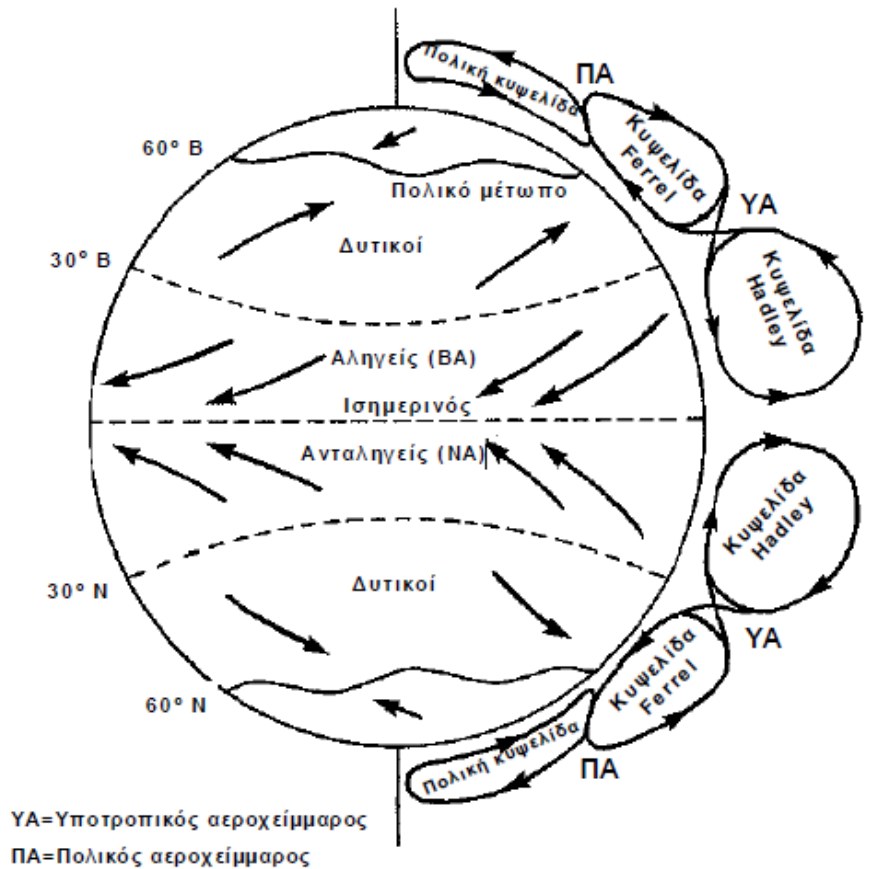
Αναδίπλωση της τροπόπαυσης. (Holton et al., 1995)

B.5 Γενική Κυκλοφορία της Ατμόσφαιρας

Οι παράγοντες που προκαλούν και διαμορφώνουν τις κινήσεις του ατμοσφαιρικού αέρα, δηλαδή των ανέμων, είναι κυρίως τρεις: **(i)** η ακτινοβολία ενέργεια του Ήλιου, την οποία προσλαμβάνει η ατμόσφαιρα και η επιφάνεια της Γης, **(ii)** η ανομοιομορφία της διανομής του ανάγλυφου των ξηρών και θαλασσών και **(iii)** η περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της. Εξαιτίας της επίδρασης των παραγόντων αυτών, η ατμοσφαιρική πίεση κατανέμεται ανομοιόμορφα στην επιφάνεια της Γης (Εικ. Β.11) με αποτέλεσμα να προκαλούνται κινήσεις του αέρα, οι οποίες υπόκεινται σε συνεχείς μεταβολές κατά διεύθυνση και ένταση.

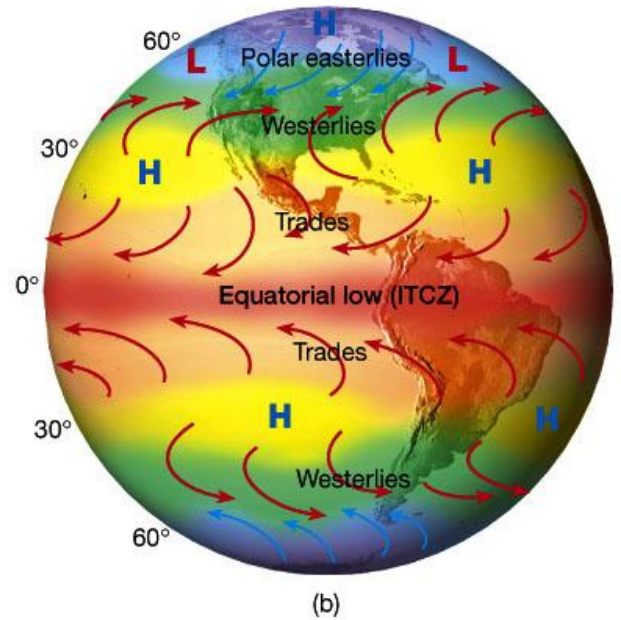
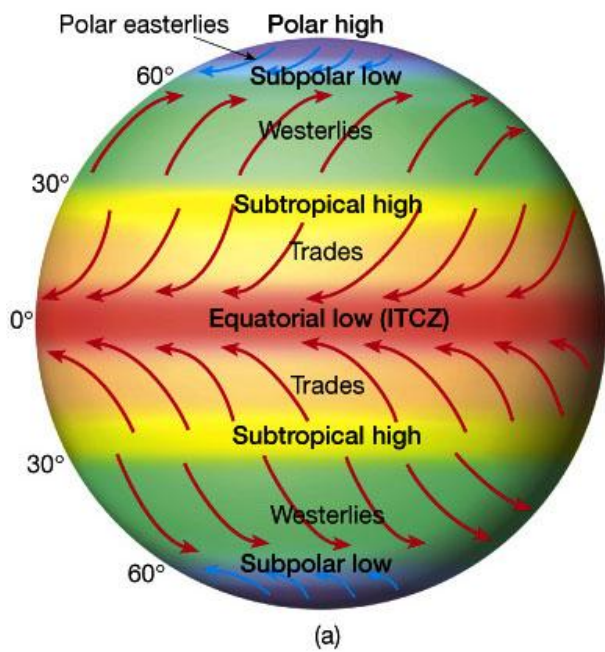
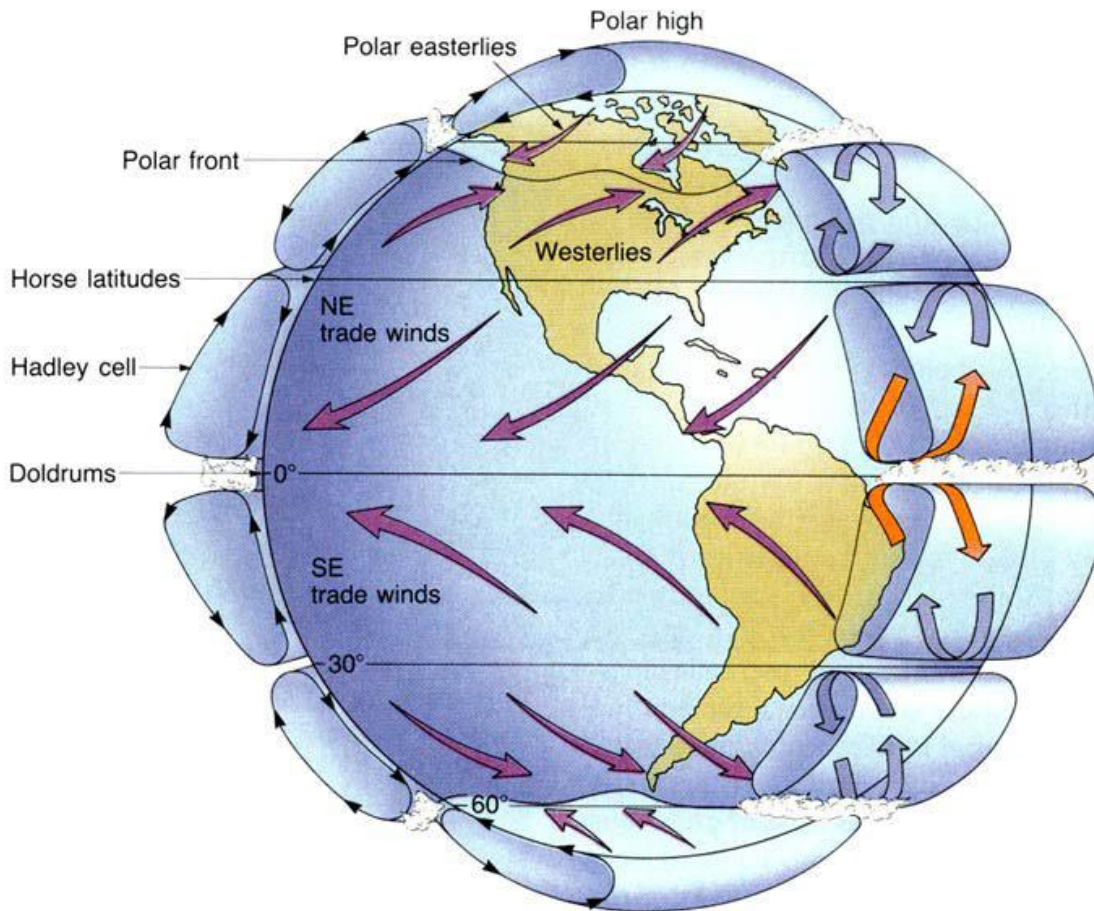
Το πρότυπο της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια και κατακόρυφα φαίνεται στις Εικόνες Β.10 i, ii.

- Διακρίνονται οι **κυψελίδες κυκλοφορίας**:
 - Hadley κοντά στον ισημερινό,
 - Ferrel στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και
 - Πολικές.
- Στην επιφάνεια, επικρατούν οι εξής **άνεμοι**:
 - Βορειοανατολικοί άνεμοι σε γεωγραφικά πλάτη 0-30° Β (*αληγείς άνεμοι, NE trade winds*),
 - Νοτιοανατολικοί άνεμοι σε γεωγραφικά πλάτη 0-30° Ν, (*ανταληγείς άνεμοι, SE trade winds*),
 - Δυτικοί στα μέσα γεωγραφικά πλάτη 30°-60° Β και 30°-60° Ν (*westerlies*) και
 - Βορειοανατολικοί και Νοτιοανατολικοί κοντά στον Βόρειο και Νότιο Πόλο, αντίστοιχα (*polar easterlies*).
- Η περιοχή σύγκλισης των αληγών και ανταληγών ανέμων του Βορείου και Νοτίου ημισφαιρίου, αντίστοιχα, ονομάζεται **ενδοτροπική ζώνη σύγκλισης** (*Intertropical Convergence Zone, ITCZ*).
- Οι περιοχές των υποτροπικών και πολικών **αεροχειμάρρων** (*jetstreams*).



Εικόνα Β.12 (i)

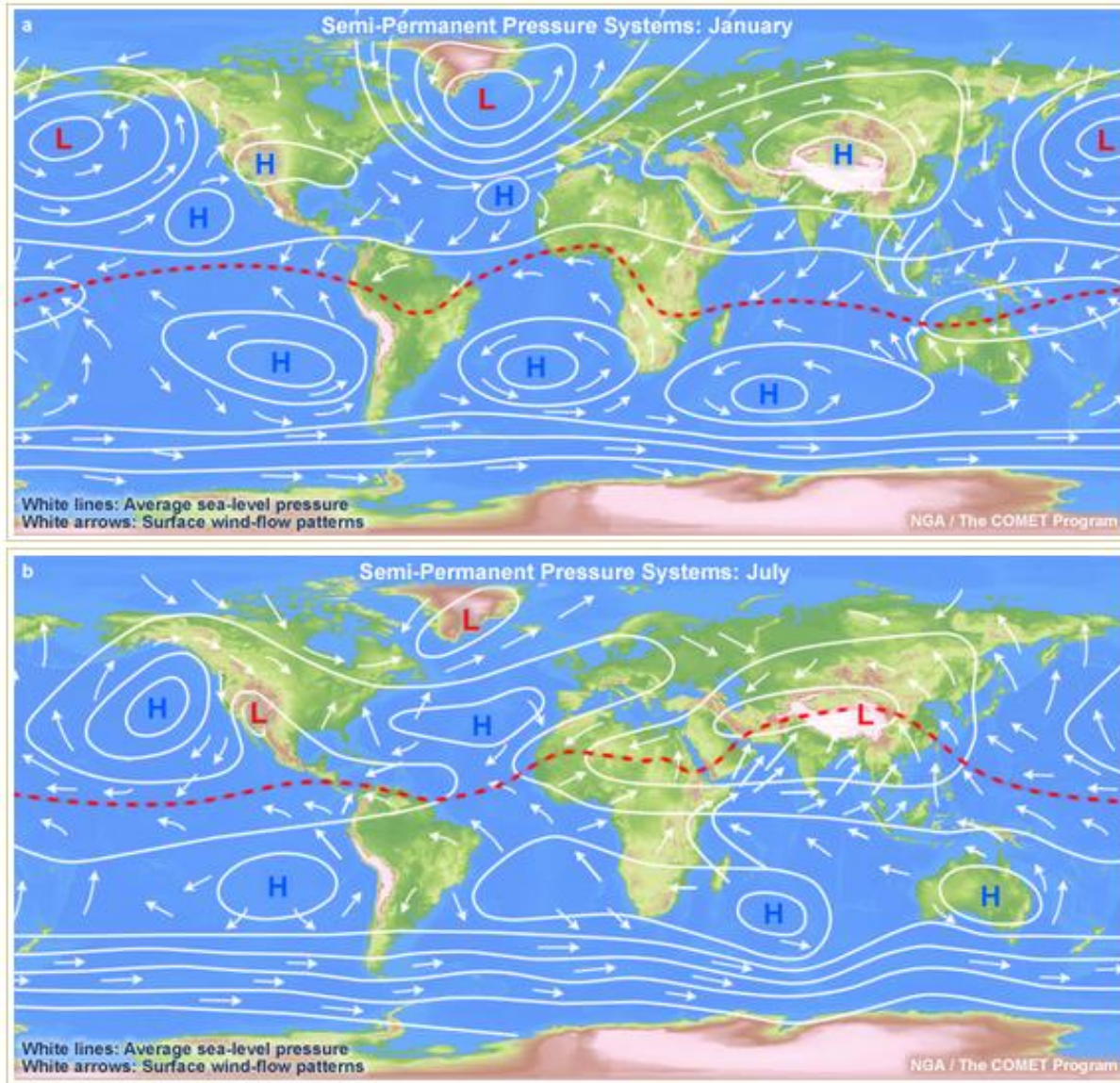
Γενική Κυκλοφορία της Ατμόσφαιρας



Εικόνα Β.12 (ii)

Γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας.

(Πηγή: The Atmosphere, 8th edition, Lutgens and Tarbuck, 8th edition, 2000)



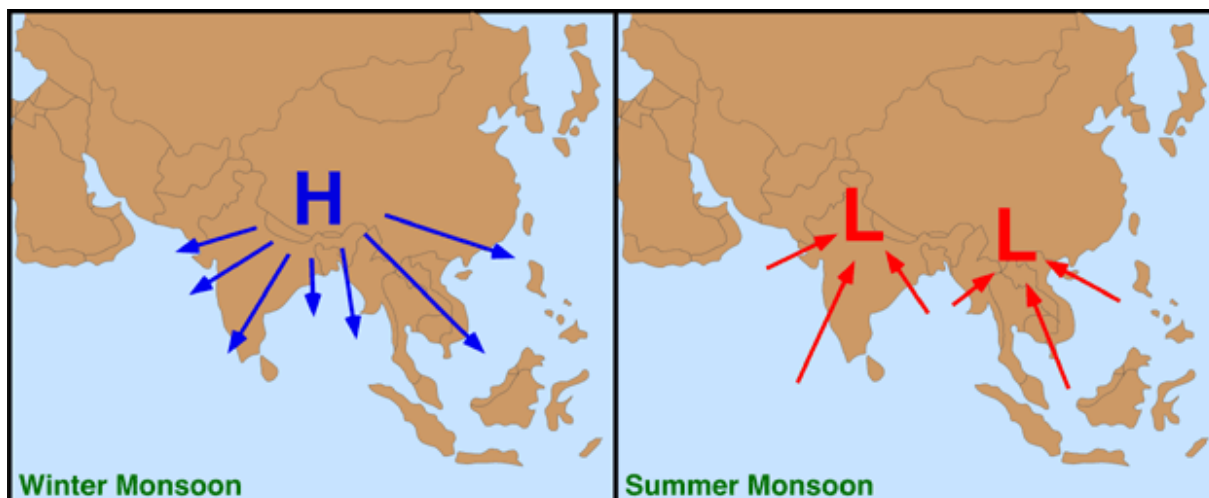
Εικόνα Β.13

Μέσα επιφανειακά βαρομετρικά συστήματα και αντιπροσωπευτικά διανύσματα επιφανειακών ανέμων για τον (α) Ιανουάριο και (β) Ιούλιο.

B.6 Εποχικοί άνεμοι ή μουσσώνες

Οι εποχικοί άνεμοι ή **μουσσώνες** είναι άνεμοι, οι οποίοι πνέουν σε ορισμένα τμήματα των ωκεανών πλησίον των ηπείρων και οι οποίοι δημιουργούνται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας και πίεσης μεταξύ του εσωτερικού των ηπείρων και των ωκεανών. Αυτό συμβαίνει τόσο το χειμώνα όσο και το καλοκαίρι. Τον χειμώνα, οι θάλασσες είναι πολύ θερμότερες από τις ηπείρους και γι' αυτό η ατμοσφαιρική πίεση είναι μεγαλύτερη πάνω από τις ηπείρους και μικρότερη πάνω από τους ωκεανούς. Οι άνεμοι συνεπώς θα πνέουν από την

ξηρά προς τη θάλασσα. Το καλοκαίρι, οι θάλασσες είναι ψυχρότερες από το εσωτερικό των ηπείρων, οι οποίες γίνονται κέντρα υψηλών πιέσεων. Άρα οι άνεμοι θα πνέουν από τη θάλασσα προς την ξηρά. Κλασικό παράδειγμα τέτοιων ανέμων είναι οι μουσσώνες του Ινδικού ωκεανού (Εικόνα Β.12).



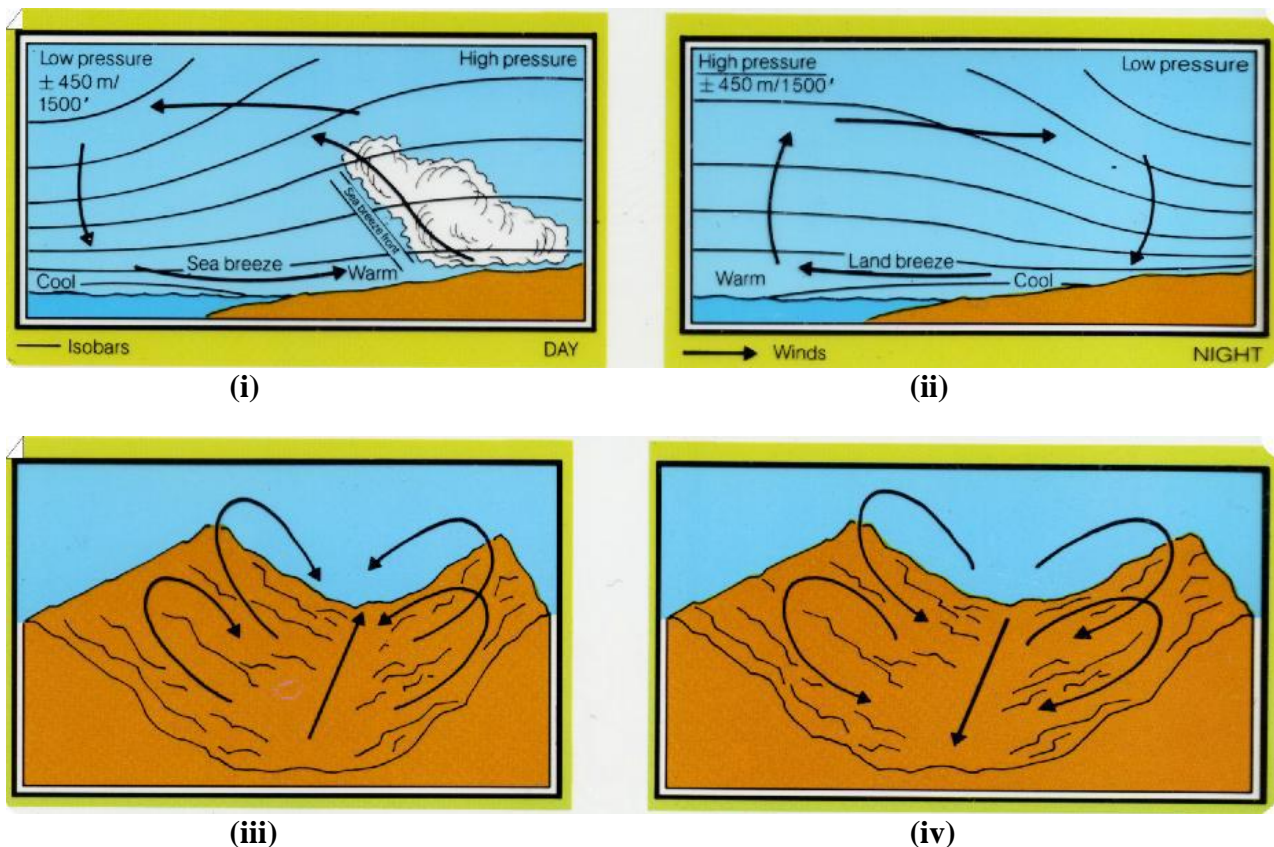
Εικόνα Β.14

Χειμερινοί και θερινοί μουσσώνες στη νοτιοανατολική Ασία.

Πηγή: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7o.html>

B.7 Ημερήσιοι άνεμοι

- (i) **Θαλάσσια αύρα** είναι ο άνεμος που πνέει από τη θάλασσα προς την ξηρά κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αίθριο συνήθως καιρό, ως αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του νερού της θάλασσας και της παρακείμενης ξηράς εξαιτίας της ταχύτερης θέρμανσης της ξηράς από τη θάλασσα (Εικόνα Β.13 i).
- (ii) **Απόγειος αύρα** είναι ο άνεμος που πνέει από τη ξηρά προς τη θάλασσα κατά τη διάρκεια της νύκτας, ως αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ ξηράς και θάλασσας, εξαιτίας της ταχύτερης ψύξης της ξηράς από τη θάλασσα (Εικόνα Β.13 ii).
- (iii) **Αναβατικός άνεμος (αύρα των κοιλάδων)** είναι ο άνεμος που πνέει κατά μήκος της πλαγιάς από τους πρόποδες προς την κορυφή του βουνού, που προκαλείται από τη μικρότερη πυκνότητα του αέρα κατά μήκος της πλαγιάς σε σχέση με αυτήν σε κάποια απόσταση, οριζόντια, από αυτόν λόγω επιφανειακής θέρμανσης της πλαγιάς (Εικόνα Β.13 iii).
- (iv) **Καταβατικός άνεμος (αύρα των βουνών)** είναι ο άνεμος που πνέει κατά μήκος της πλαγιάς από την κορυφή προς τους πρόποδες του βουνού, που προκαλείται από τη μεγαλύτερη πυκνότητα του αέρα κατά μήκος της πλαγιάς σε σχέση με αυτήν σε κάποια απόσταση, οριζόντια, από αυτόν, λόγω της επιφανειακής ψύξης της πλαγιάς (Εικόνα Β.13 iv).



(i)

(ii)

(iii)

(iv)

Εικόνα Β.15

Μηχανισμοί δημιουργίας της θαλάσσιας (i) και της απόγειας αύρας (ii). Η διαφορετική θέρμανση επιπέδων και κεκλιμένων επιφανειών έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της αύρας κοιλάδας (iii) και της αύρας των βουνών (iv).

B.8 Αέριες Μάζες

Ως **αέρια μάζα** ορίζεται ένα τεράστιο σώμα αέρα στην κατώτερη ατμόσφαιρα το οποίο χαρακτηρίζεται από τα ομοιογενή φυσικά χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της πυκνότητας κατά την οριζόντια έννοια σε οποιοδήποτε γεωγραφικό πλάτος.

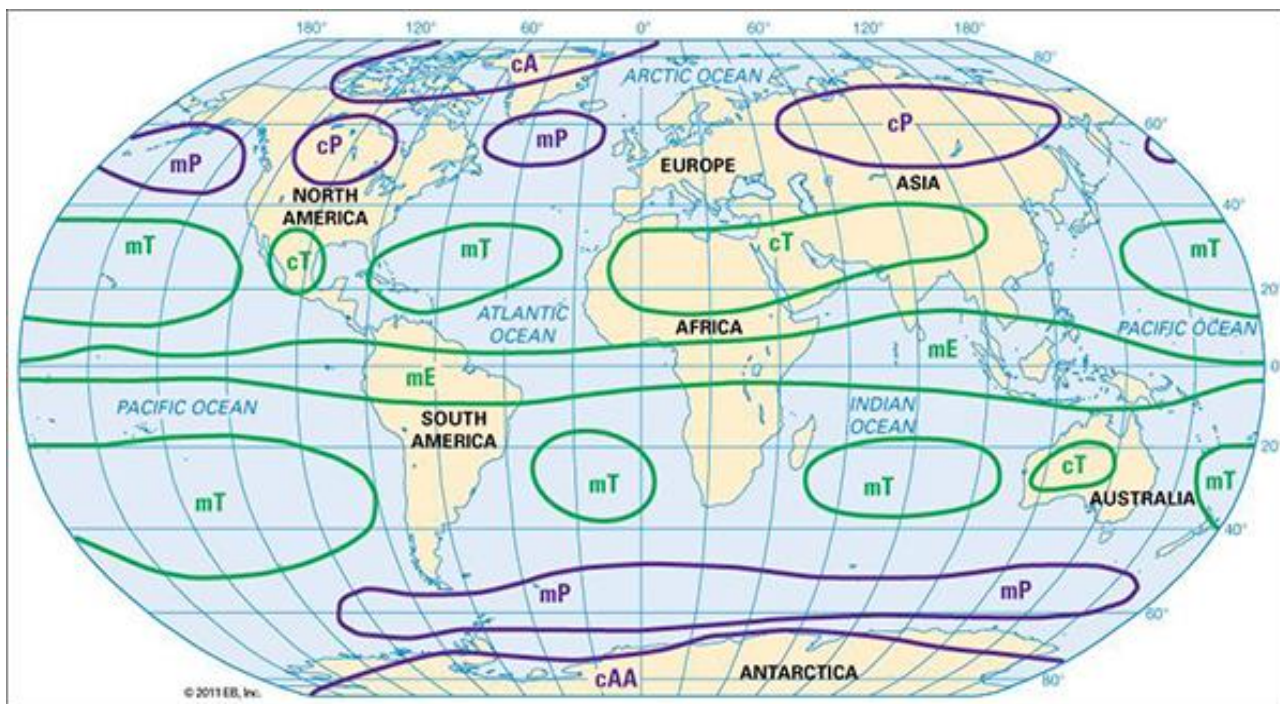
Οι αέριες μάζες δημιουργούνται πάνω από ορισμένες περιοχές του πλανήτη, οι οποίες ονομάζονται πηγές των αέριων μαζών. Επειδή η θέρμανση του αέρα αλλά και η τροφοδοσία του σε υγρασία πραγματοποιούνται ουσιαστικά από την επιφάνεια, η φύση της πηγής θα καθορίσει και τα χαρακτηριστικά της αέριας μάζας. Οι περιοχές, στις οποίες δημιουργούνται οι αέριες μάζες πέρα από τη φύση της υποκείμενης επιφάνειας (ξηρά, θάλασσα), έχουν επίσης διαφορετικά θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο σχηματίζονται. Έτσι, οι αέριες μάζες, ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή όπου γεννιούνται και ανάλογα με τη φύση της επιφάνειας, διακρίνονται σε *θερμές, ψυχρές, υγρές και ξηρές*:

- **Θαλάσσιες (m)**, οι οποίες είναι υγρές,
- **Ηπειρωτικές (c)**, οι οποίες είναι ξηρές,

- **Αρκτικές (A, ή AA για την Ανταρκτική) και Πολικές (P)**, οι οποίες είναι ψυχρές και κινούνται από τα μεγαλύτερα προς τα μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, μεταφέροντας ψύχος.
- **Τροπικές (T) και Ισημερινές (E)**, οι οποίες είναι θερμές και κινούνται προς τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, μεταφέροντας θερμότητα.

Από τον συνδυασμό όλων των κατηγοριών αερίων μαζών προκύπτουν οι εξής τύποι αερίων μαζών που εμφανίζονται στη Γη (Εικόνα Β.14):

cA :	ηπειρωτική αρκτική	mA :	θαλάσσια αρκτική
cP :	ηπειρωτική πολική	mP :	θαλάσσια πολική
cT :	ηπειρωτική τροπική	mT :	θαλάσσια τροπική
E :	ισημερινή.		



Εικόνα Β.16

Οι τύποι των αερίων μαζών και η παγκόσμια κατανομή τους.

Στη Μεσόγειο συναντάται μια ακόμη αέρια μάζα η οποία δεν περιλαμβάνεται στη γενική ταξινόμηση. Πρόκειται για τη λεγόμενη **μεσογειακή** αέρια μάζα (**M**), η οποία δημιουργείται όταν οι αέριες μάζες που επισκέπτονται τη Μεσόγειο λιμνάζουν για αρκετό χρονικό διάστημα και αποκτήσουν μεσογειακά χαρακτηριστικά. Στην Ελλάδα περισσότερο συχνές είναι οι mP (4 ημέρες στις 10) και η cP (3 ημέρες στις 10). Τις υπόλοιπες ημέρες κυριαρχούν οι άλλες αέριες μάζες και η μεσογειακή.

B.9 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (υετός)

Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα ή υετός (κατακρήμνιση: precipitation) λέγεται το νερό σε υγρή ή στερεή μορφή που πέφτει στη γη και είναι αποτέλεσμα συμπύκνωσης ή εξάτμισης ή συνδυασμός και των δύο. Οι συνήθεις μορφές κατακρημνίσεων είναι η βροχή (rain), οι ψεκάδες (drizzle), το χιόνι (snow), το χιονόβροχο (rainsnow ή sleet) και το χαλάζι (hail). Από αυτές μόνο οι ψεκάδες και το ασθενές και λεπτό χιόνι προέρχονται από νέφη μικρής έκτασης ή χωρίς κατακόρυφη ανάπτυξη. Η δημιουργία των άλλων μορφών κατακρημνίσεων συμβαίνει κυρίως σε νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης, εντός των οποίων γίνονται συγκρούσεις και συνενώσεις υδροσταγονιδίων ή υδροσταγονιδίων και παγοκρυστάλλων. Το μέγεθος των υδροσταγόνων και παγοκρυστάλλων που σχηματίζονται έξω από τα νέφη, εξαρτάται από την περιεκτικότητα των νεφών σε νερό, την κατακόρυφη ανάπτυξή τους, την ταχύτητα των ανοδικών ρευμάτων μέσα σ' αυτά από το μέγεθος των υδροσταγονιδίων και είναι συνάρτηση του μεγέθους των πυρήνων συμπύκνωσης. Η συμπύκνωση των υδρατμών απαιτεί ψύξη της αέριας μάζας, η οποία μπορεί να συμβεί με ακτινοβολία, με ανάμιξη και με κατακόρυφη ή οριζόντια μεταφορά

• Ετήσια πορεία κατακρήμνισης

Υπάρχουν πολυάριθμοι τύποι της ετήσιας πορείας των κατακρημνίσεων, οι οποίοι εξαρτώνται από δυναμικά και τοπικά αίτια. Οι σπουδαιότεροι είναι οι εξής:

- Ο **ισημερινός** τύπος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από δύο μέγιστα της βροχής, τα οποία συμβαίνουν λίγο μετά τις ισημερίες. Ο τύπος αυτός παρουσιάζεται μεταξύ των παραλλήλων 10° βόρειου και νότιου γεωγραφικού πλάτους.
- Ο **τροπικός** τύπος, ο οποίος εμφανίζει ένα μέγιστο το θέρος και ένα ελάχιστο το χειμώνα, λόγω της μετακίνησης της ζώνης των ισημερινών νηνεμιών, προς βορρά το θέρος και προς νότο το χειμώνα.
- Ο **μουσσωνικός** τύπος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από άφθονη βροχόπτωση το θέρος και ξηρασία το χειμώνα, λόγω της πνοής των αντίστοιχων μουσσώνων.
- Ο **υποτροπικός** τύπος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από χειμερινές βροχές και θερινή ξηρασία. Ο τύπος αυτός εμφανίζεται στις περιοχές όπου επικρατεί μεσογειακό κλίμα, γι' αυτό και καλείται και «μεσογειακός τύπος».
- Ο **ηπειρωτικός** τύπος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από θερινές βροχές και άλλες μορφές κατακρημνίσεων και από χειμερινή μάλλον ξηρασία. Παρατηρείται στα εσωτερικά των ηπείρων.
- Ο **θαλάσσιος** τύπος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από φθινοπωρινές και χειμερινές βροχές.

• Ημερήσια πορεία κατακρημνίσεων

Ο **θαλάσσιος** τύπος παρουσιάζει το μέγιστο της βροχής κατά τη νύχτα ή νωρίς το πρωί, ενώ ο **ηπειρωτικός** κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες ή και αργότερα. Πολλές φορές όμως παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις από τον κανόνα αυτό, οι οποίες οφείλονται τόσο σε δυναμικά όσο και σε τοπικά αίτια. Ο ηπειρωτικός τύπος, οφείλεται στις ανοδικές κινήσεις του αέρα, οι οποίες είναι ισχυρές κατά τις απογευματινές ώρες.

• Συστήματα βροχής ανά περιοχή μεγάλης κλίμακας

Τα κυριότερα συστήματα βροχής ανά περιοχή είναι:

- **Βροχή ισημερινών περιοχών.** Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από άφθονο ποσό βροχής και από απουσία ξηρής εποχής. Η βροχή είναι κυρίως μεταφοράς, αλλά δυνατόν να είναι μετωπική εκεί, όπου συμβαίνει σύγκλιση των αερίων μαζών κατά μήκος του ενδοτροπικού μετώπου.
- **Βροχή μεσογειακών περιοχών.** Η βροχή περιορίζεται κυρίως κατά τη χειμερινή εποχή, όταν οι περιοχές αυτές (από 30° - 40° γεωγραφικό πλάτος) βρίσκονται υπό την επίδραση των υφιστάμενων ζωνών χαμηλής πίεσεως. Τα ξηρά θέρη συνοδεύονται από τον κατερχόμενο αέρα των υποτροπικών ζωνών υψηλής πίεσεως.
- **Βροχή Δυτικής Ευρώπης.** Οι δυτικές παρυφές των ξηρών (από 40° - 60° γεωγραφικό πλάτος) επηρεάζονται από τους ισχυρούς Δυτικούς ανέμους και από τις περιοχές των χαμηλών πιέσεων των υφέσεων. Η βροχή είναι άφθονη. Το ποσό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υψόμετρο των ακτών. Δεν υπάρχει ξηρή εποχή, αν και υπάρχει μία τάση για περισσότερη βροχή κατά το χειμώνα παρά κατά το θέρος.
- **Ηπειρωτική βροχή.** Η απόσταση από τους ωκεανούς είναι ο κύριος παράγοντας που διέπει το καθεστώς της βροχής στο εσωτερικό των ηπείρων. Κανονικά, η περισσότερη βροχή εμφανίζεται κατά το θέρος, όταν η υψηλή εποχική θερμοκρασία δημιουργεί ένα μέγιστο απόλυτης υγρασίας και όταν υπάρχει μία ροή αέρα προς την ηπειρωτική περιοχή χαμηλής πίεσεως.
- **Βροχή των ανατολικών παρυφών (ακτών).** Στα χαμηλά γεωγραφικά πλάτη, οι ζώνες των ανατολικών ακτών τείνουν να έχουν υψηλή βροχόπτωση. Η βροχή αυτή προκύπτει από τα μουssonικά συστήματα ανέμου με την εισροή θερμής και υγρής αέρας μάζας κατά το θέρος και από συνθήκες κυκλωνικής χαμηλής πίεσεως κατά το χειμώνα.
- **Πολική βροχή.** Οι χαμηλές θερμοκρασίες και οι κατ' ακολουθία χαμηλές απόλυτες υγρασίες έχουν σαν αποτέλεσμα μικρά ποσά βροχής. Η αντικυκλωνική πίεση ελέγχει και αντιστρατεύεται επίσης, τις συνθήκες που ευνοούν τη βροχή. Το μέγιστο της βροχής πιθανώς συμβαίνει κατά τη διάρκεια της εποχής των υψηλότερων θερμοκρασιών, όταν υπάρχει περισσότερη υγρασία στον αέρα και όταν η υφιστάμενη επίδραση δύναται να φθάσει καλύτερα προς τους Πόλους.

• Ύψος βροχής

Η ένταση των βροχοπτώσεων μετρείται με βάση τα χιλιοστά βροχής που πέφτουν ανά ώρα και μετρείται με ειδικά όργανα, τα βροχόμετρα. Ανάλογα με το παρατηρούμενο ύψος, διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες:

- ασθενής (< 2 mm/h),
- μέτρια (2-6 mm/h),
- ισχυρή (> 6 mm/h και
- βίαιη (> 50 mm/h, σπάνιο φαινόμενο).

Τα ημερήσια ύψη βροχής πρέπει να μετρώνται με ακρίβεια τουλάχιστον ίση με 0,2 mm και στην καλύτερη περίπτωση με ακρίβεια 0,1 mm, ενώ τα εβδομαδιαία, μηνιαία ή εποχιακά με ακρίβεια 1 mm.

- **Χιόνι**

Όταν οι παγοκρύσταλλοι, που σχηματίζονται και μεγεθύνονται μέσα στα νέφη, το εγκαταλείψουν και φθάσουν στο έδαφος προτού λιώσουν τότε δημιουργούν το φαινόμενο του χιονιού. Οι παγοκρύσταλλοι του χιονιού είναι διαφανείς ή αδιαφανείς και παρουσιάζουν πολύπλοκους εξαγωνικούς σχηματισμούς με διάμετρο 1-3 mm κατά μέσον όρο. Όταν η θερμοκρασία του αέρα δεν είναι πολύ κάτω από τους 0°C, τότε οι παγοκρύσταλλοι του χιονιού έχουν υγρή επιφάνεια, οπότε αλληλοσυγκρουόμενοι κατά την πτώση τους σχηματίζουν τις νιφάδες του χιονιού, οι οποίες έχουν ακανόνιστο σχήμα και μεγάλες διαστάσεις, αρκετών μερικές φορές εκατοστών και γι' αυτό πέφτουν αργά. Αν όμως οι θερμοκρασίες είναι πάρα πολύ χαμηλές, τότε οι κρύσταλλοι του χιονιού δεν παρουσιάζουν υγρή επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει στις πολικές περιοχές, τα ψηλά όρη και τις ηπειρωτικές περιοχές των μεγάλων γεωγραφικών πλατών κατά το χειμώνα. Στις περιπτώσεις αυτές, τα στρώματα χιονιού στο έδαφος αποτελούνται από κόκκους πάγου με διάμετρο μικρότερη από 1mm, οι οποίοι μεταφέρονται από ισχυρούς ανέμους από περιοχή σε περιοχή.

B.10 Σχετική υγρασία

Η **σχετική υγρασία** (relative humidity, RH) του αέρα αποτελεί την κοινότερη έκφραση της ατμοσφαιρικής υγρασίας και εκφράζεται με το μέγεθος που προκύπτει, αν διαιρεθεί η ποσότητα των υδρατμών που πράγματι υπάρχουν στον αέρα, σε μια δεδομένη τιμή πίεσης και θερμοκρασίας, προς τη μέγιστη ποσότητα αυτών που θα μπορούσε να κατακρατήσει η ίδια αέρια μάζα υπό τις ίδιες συνθήκες. Η σχετική υγρασία εκφράζεται σε εκατοστιαία αναλογία και υπολογίζεται με διάφορους τρόπους. Στην πράξη, υπολογίζεται με τη βοήθεια ειδικών πινάκων, αν γνωρίζουμε τη θερμοκρασία του ξηρού και του υγρού θερμομέτρου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Ατμοσφαιρικά αερολύματα (aerosol) ή αιωρούμενα σωματίδια

Γ.1 Εισαγωγή

Ως *σωματιδιακή ύλη* στην ατμόσφαιρα ορίζεται η στερεή ή υγρή ύλη που βρίσκεται σε διασπορά στον αέρα και αποτελείται από διακριτά σωματίδια με μέγεθος από 0,001 μm έως 100 μm περίπου. Στις επιστήμες της ατμόσφαιρας, αυτά τα αιωρήματα των στερεών ή υγρών σωματιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα αποδίδονται με το γενικότερο όρο *αερολύματα (aerosol)* ή *αιωρούμενα σωματίδια (Suspended Particulate Matter, SPM ή PM)*.

Οι επιδράσεις των αιωρούμενων σωματιδίων είναι σημαντικές και ποικιλόμορφες σε όλους τους τομείς του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν έμμεσα ή άμεσα το κλίμα, καθορίζουν την ποιότητα του αέρα, επιδρούν στην υγεία, επηρεάζουν την ατμοσφαιρική χημεία, τον τρόπο διάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας και τη δημιουργία νεφών. Αν η ατμόσφαιρα ήταν απαλλαγμένη από τα αερολύματα, θα ήταν πολύ δύσκολη ή και αδύνατη η συμπύκνωση των υδρατμών μέσα στα πλαίσια που μεταβάλλονται οι παράμετροι της ατμόσφαιρας. Θα ήταν δυνατή η παρατήρηση αυτού του φαινομένου μόνο με υπερβολική αύξηση της ποσότητας των υδρατμών ή με έντονη ψύξη της ατμοσφαιρικής μάζας, πέρα από τα συνήθη όρια.

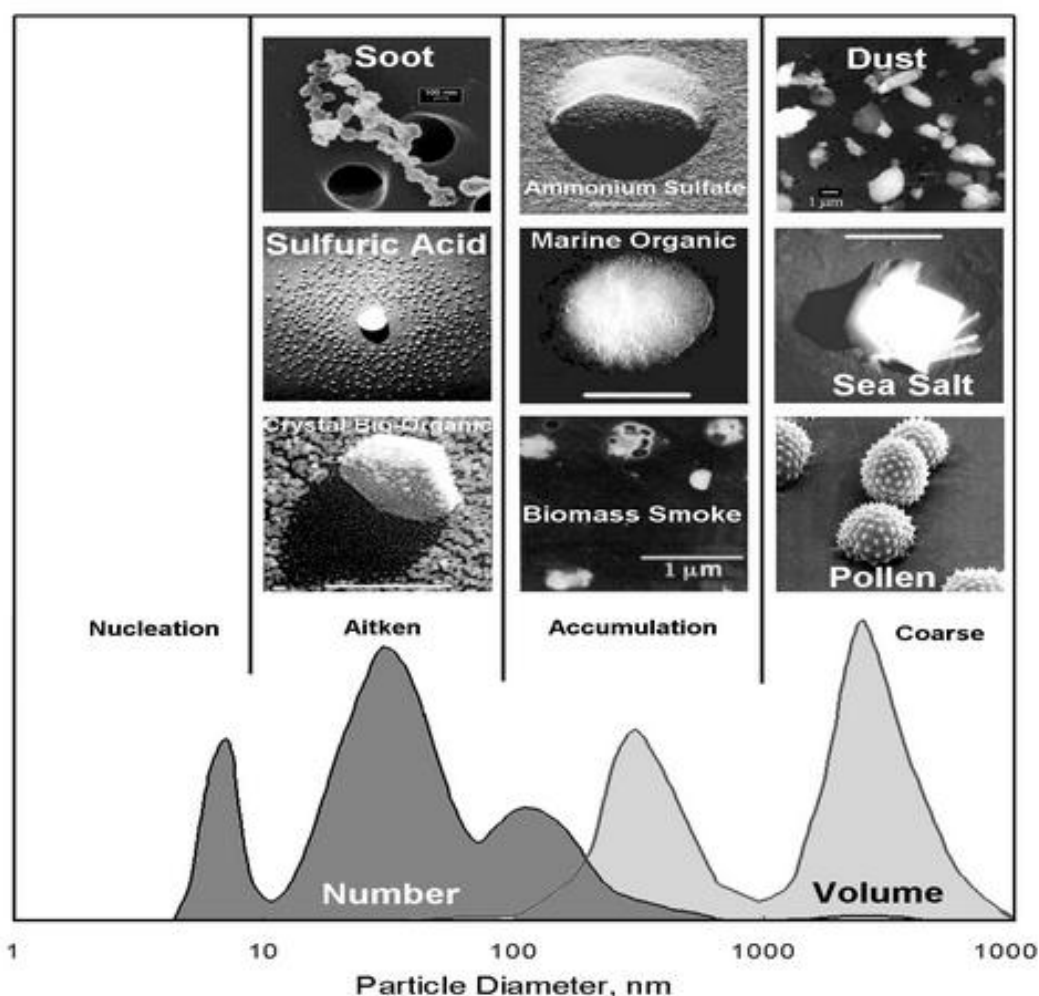
Γ.2 Μορφές αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια απαντώνται στην ατμόσφαιρα σε διάφορες μορφές (Εικόνα Γ.1), οι πιο συνηθισμένες από τις οποίες είναι οι εξής:

- Αιθάλη (Fume): Μικρά, στερεά σωματίδια, τα οποία σχηματίζονται από την συμπύκνωση ατμών στερεών υλικών, συχνά οξειδίων των μετάλλων (όπως είναι τα οξείδια του ψευδαργύρου και του μολύβδου) και στοιχειακό άνθρακα (soot, carbon black). Τυπικό μέγεθος: 0.03 έως 1 μm .
- Σκόνη (Dust): Μικρά στερεά σωματίδια που προκύπτουν από τη θραύση μεγαλύτερων μαζών κατά την διάρκεια διαδικασιών όπως σύνθλιψη, τριβή, έκρηξη. Η χρήση του όρου σκόνη υποδηλώνει σωματίδια φυσικής και συνήθως γεωλογικής προέλευσης. Τυπικό μέγεθος > 1 μm .
- Καπνός (Smoke): Μικρά στερεά σωματίδια που προκύπτουν από την ατελή καύση οργανικών υλών όπως το κάρβουνο, ο καπνός ή το ξύλο. Τυπικό μέγεθος: 0.5 έως 1 μm .
- Ιπτάμενη τέφρα (Fly ash): Μικρά, ορυκτά σωματίδια που διαφεύγουν από τις καπνοδόχους κατά τη καύση ορυκτών καυσίμων. Η σύσταση της ιπτάμενης τέφρας εξαρτάται από το είδος του καυσίμου. Τα κύρια συστατικά της είναι οξείδια του αργιλίου, του ασβεστίου, του σιδήρου και του πυριτίου, αλλά και ιχνοστοιχεία, όπως Mg, S, Ti, Na, K. Τυπικό μέγεθος: 1 έως 100 μm .
- Ομίχλη (Mist): Υγρά σωματίδια ή σταγονίδια που δημιουργούνται από τη συμπύκνωση ατμών. Τυπικό μέγεθος: 0.1 έως 10 μm .
- Σπρέι (Spray): Υγρά σωματίδια που μορφοποιούνται από το ράντισμα υγρών, όπως τα φυτοφάρμακα ή τα παρασιτοκτόνα.

Στην ατμόσφαιρα και τα ατμοσφαιρικά υγρά αερολύματα, η μάζα των συμπυκνωμένων υδρατμών πάνω από το έδαφος, υπό μορφή συγκέντρωσης υδροσταγονιδίων, παγοκρυστάλλων ή και των δύο, ονομάζεται νέφος (cloud) ή απλά σύννεφο. Ο μετεωρολογικός όρος ομίχλη (fog) υποδηλώνει την ύπαρξη νέφους σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους και με πυκνότητα τέτοια ώστε η ορατότητα σε οριζόντια διεύθυνση να είναι μικρότερη από 1000 m. Κάτω από παρόμοιες συνθήκες, αλλά με ορατότητα μεγαλύτερη των 1000 m, το αερόλυμα ονομάζεται αχλύς (haze). Το τυπικό μέγεθος των σωματιδίων των νεφών κυμαίνεται από 2 έως 80 μm .

Τα υγρά σωματίδια, που εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα σε μέγεθος μεγαλύτερο από 100 μm , έχουν ελάχιστο χρόνο αιώρησης και η ονομασία τους ταυτίζεται με τα ορατά φαινόμενα της βροχής (άνω των 500 μm) ή, για μικρότερο μέγεθος, της ψιχάλας (drizzle).



Εικόνα Γ.1

Τα σωματίδια του ατμοσφαιρικού αεροζόλ παρουσιάζουν ένα εύρος μεγεθών (από νανόμετρα μέχρι μικρόμετρα) και ένα εύρος σχημάτων. Επιπλέον, η χημική τους σύσταση συνήθως διαφέρει ακόμα και μεταξύ σωματιδίων που ανήκουν στο ίδιο εύρος μεγέθους. Πηγή: <http://capita.wustl.edu/aerosolintegration/specialTopics/Integration/Capter4Drafts/CHAPTER4000708.htm>

Γ.3 Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων

Με βάση την πηγή προέλευσής τους, τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το εάν η εκπομπή τους οφείλεται σε **φυσικές** δραστηριότητες ή σε **ανθρωπογενείς** δραστηριότητες.

Σημαντικότερες πηγές ατμοσφαιρικών αιωρημάτων	
Φυσικές	Ανθρωπογενείς
<ul style="list-style-type: none">- Σκόνη από πετρώματα, έδαφος- Ηφαιστειακή δραστηριότητα- Καύση βιομάζας	<ul style="list-style-type: none">- Καύσεις- Βιομηχανική δραστηριότητα- Μεταφορές- Κατασκευές- Αγροτική εκμετάλλευση της γης- Σωματίδια που περιέχουν άνθρακα (στοιχειώδη: προέρχονται από καύσεις και οργανικά: προέρχονται από πολύπλοκες χημικές διεργασίες)

Γ.4 Μηχανισμοί σχηματισμού των αιωρούμενων σωματιδίων

Μετά την εκπομπή ή τον σχηματισμό τους, τα αιωρήματα υπόκεινται σε ποικίλες διεργασίες (πυρήνωση, συσσώρευση, συμπύκνωση και συσσωμάτωση), οι οποίες τα οδηγούν σε αλλαγή του μεγέθους και του σχήματός τους (Εικόνα Γ.2).

- **Πυρήνωση (nucleation)**

Η πυρήνωση είναι η διεργασία κατά την οποία γίνεται μεταβολή από την αέρια στην υγρή φάση διά μέσου της δημιουργίας μικρών συσσωματώσεων μορίων σε μορφή πυρήνων.

- **Συσσώρευση (accumulation)**

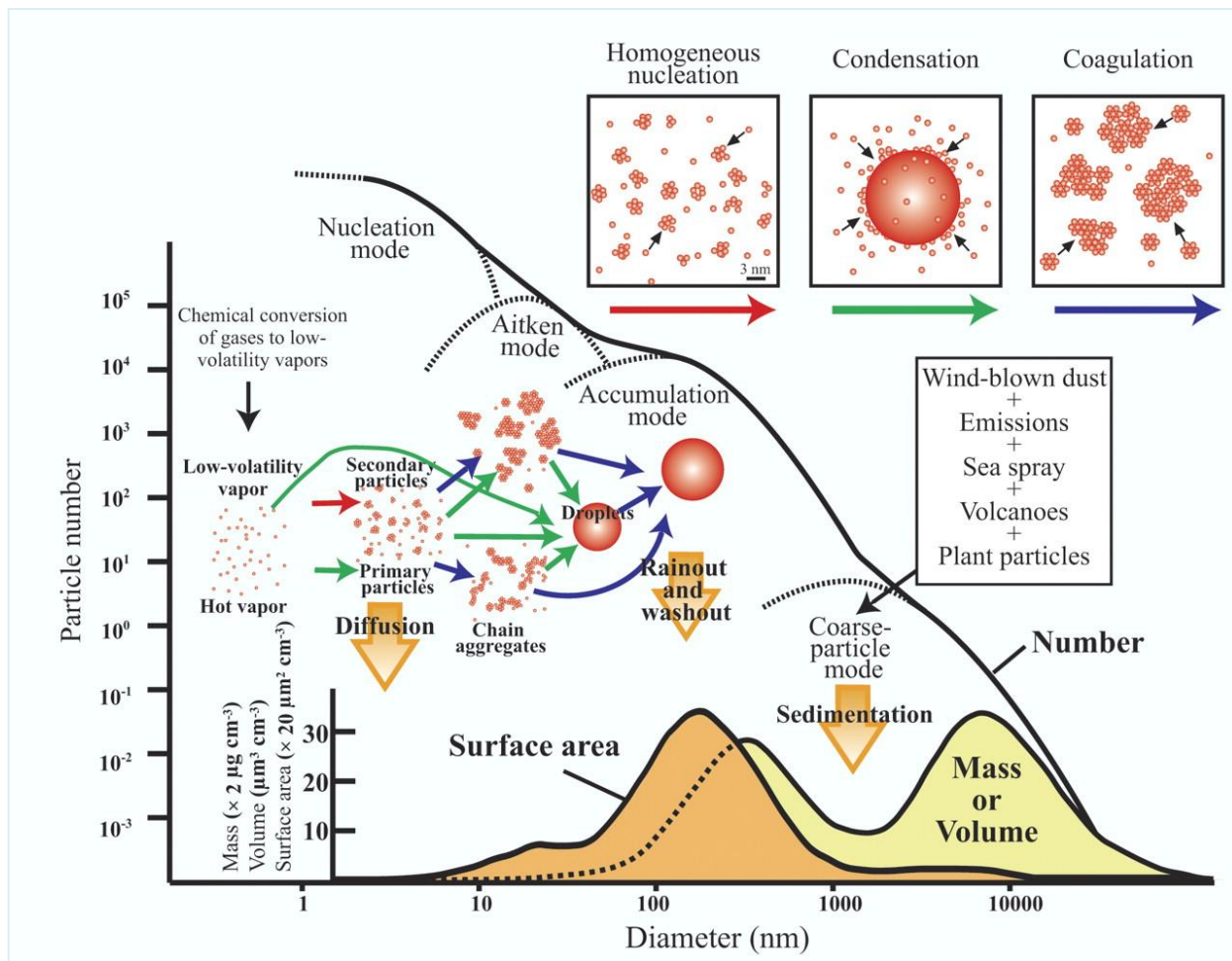
Πρόκειται για τη διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα για τα σωματίδια εκείνα που προέρχονται συνήθως από τα σωματίδια της περιοχής πυρήνωσης, και συμβάλλει στην αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων.

- **Συμπύκνωση (condensation)**

Κατά τη διαδικασία αυτή οι ενώσεις που βρίσκονται στην αέρια φάση είναι δυνατό να μεταβούν στην υγρή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι υδρατμοί, οι οποίοι με την συμπύκνωση μεταβάλλονται σε νερό ή παγοκρυστάλλους.

- **Συσσωμάτωση (coagulation)**

Είναι η διαδικασία, κατά την οποία αιωρούμενα σωματίδια συγκρούονται μεταξύ τους λόγω της σχετικής κίνησής τους, με αποτέλεσμα να σχηματίζουν σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου. Οι συγκρούσεις οδηγούν σε μείωση του αριθμού των σωματιδίων και σε αύξηση του μεγέθους τους.

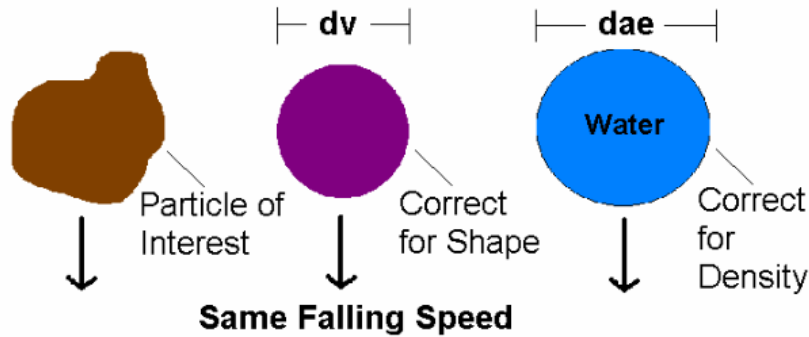


Εικόνα Γ.2

Σχηματική απεικόνιση των φυσικών διεργασιών που επηρεάζουν το μέγεθος των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αεροζόλ. Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο πλήθος σωματιδίων αποτελείται από μικρότερα σωματίδια. Πηγή: <http://elements.geoscienceworld.org/content/gselements/4/6/389/F3.large.jpg>

Γ.5 Μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων – Αεροδυναμική διάμετρος

Τα σωματίδια του ατμοσφαιρικού αεροζόλ παρουσιάζουν διάφορα μεγέθη και σχήματα, τα οποία μεταβάλλονται με τον τόπο και το χρόνο. Επειδή πολλές ιδιότητες των σωματιδίων αυτών εξαρτώνται από το μέγεθός τους (όγκο, μάζα, ταχύτητα εναπόθεσης), είναι αναγκαίος ο καθορισμός μιας κοινής παραμέτρου μεγέθους: της **Αεροδυναμικής Διαμέτρου (Aerodynamic Diameter)**. Η αεροδυναμική διάμετρος ορίζεται ως «η διάμετρος σφαίρας πυκνότητας μονάδας (1 g/cm^3), η οποία έχει την ίδια τελική ταχύτητα πτώσης στον αέρα με το υπό εξέταση σωματίδιο» (Εικόνα Γ.3). Η αεροδυναμική διάμετρος εξαρτάται από την πυκνότητα του σωματιδίου. Έτσι, σωματίδια με το ίδιο πρακτικό μέγεθος και σχήμα, αλλά με διαφορετικές πυκνότητες, θα έχουν διαφορετικές αεροδυναμικές διαμέτρους.



Εικόνα Γ.3

Σχηματική απεικόνιση της ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου (d_{ae}).

Πηγή: <http://ocw.jhsph.edu/courses/PrinciplesIndustrialHygiene/PDFs/Lecture4.pdf>

Γ.6 Κατανομή κατά το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων

Οι κατανομές αριθμού N , επιφάνειας S και όγκου V των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων έχει καθιερωθεί να παριστάνονται σε διαγράμματα με οριζόντιο άξονα την αεροδυναμική διάμετρο D_p των αερολυμάτων σε λογαριθμική κλίμακα και κατακόρυφο άξονα $\Delta N/\log D_p$, $\Delta S/\log D_p$ και $\Delta V/\log D_p$, αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο, η επιφάνεια κάτω από τις καμπύλες είναι ανάλογη με τον αριθμό, την επιφάνεια και τον όγκο, αντίστοιχα, σε δεδομένη περιοχή του μεγέθους των σωματιδίων.

Με βάση το μέγεθος της αεροδυναμικής τους διαμέτρου, τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα κατηγοριοποιούνται ως εξής (Εικόνα Γ.4):

❖ Ολικά αιωρούμενα σωματίδια (Total Suspended Particles, TSP)

Είναι ο όρος που δόθηκε στο σύνολο των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων και σταγονιδίων. Τα TSP ποικίλουν γενικά σε μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου από **0.01 μm έως ~30-50 μm** . Τα σωματίδια εκείνα με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου μεγαλύτερης από 50 μm έχουν την τάση να καθιζάνουν πολύ εύκολα.

❖ **PM_{2,5}** : αιωρούμενα σωματίδια των οποίων η αεροδυναμική διάμετρος είναι **μικρότερη από 2,5 μm** .

❖ **PM₁₀** : αιωρούμενα σωματίδια των οποίων η αεροδυναμική διάμετρος είναι **μικρότερη από 10 μm** .

❖ Περιοχή χονδρόκοκκων σωματιδίων (coarse mode)

Πρόκειται για σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου **μεγαλύτερης από 2.5 μm μέχρι τα 100 μm** . Συνήθως τα σωματίδια αυτά παράγονται με μηχανικούς τρόπους.

❖ **Περιοχή λεπτόκοκκων σωματιδίων (fine mode)**

Πρόκειται για σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου **μικρότερης από 2.5μm**. Συνήθως τα σωματίδια αυτά παράγονται δευτερογενώς από αέριες ενώσεις.

• **Περιοχή πυρήνωσης (nucleation mode)**

Πρόκειται για σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου **από 0.003 έως 0.05 μm**. Προέρχονται άμεσα από πηγές καύσης ή είναι συμπυκνώματα προϊόντων καύσης. Παρουσιάζουν μικρό χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα γιατί συσσωματώνονται μεταξύ τους ή με λίγο μεγαλύτερα σωματίδια, προς σχηματισμό σωματιδίων μεγαλύτερης διαμέτρου.

○ **Υπερλεπτόκοκκα σωματίδια της περιοχής πυρήνωση (ultrafine mode)**

Πρόκειται για τα υπόλοιπα σωματίδια της περιοχής πυρήνωσης. Τα σωματίδια αυτά παρουσιάζουν **τοπικό μέγιστο** στην κατανομή κατά πλήθος **κάτω από τα 0,015 μm**.

○ **Μεταβατικά σωματίδια της περιοχής πυρήνωσης (Aitken mode)**

Αντιπροσωπεύουν εκείνη την ομάδα των σωματιδίων της περιοχής πυρήνωσης που παρουσιάζει **τοπικό μέγιστο** στην κατανομή κατά πλήθος **πάνω από τα 0,015 μm**.

• **Περιοχή συσσώρευσης (accumulation mode)**

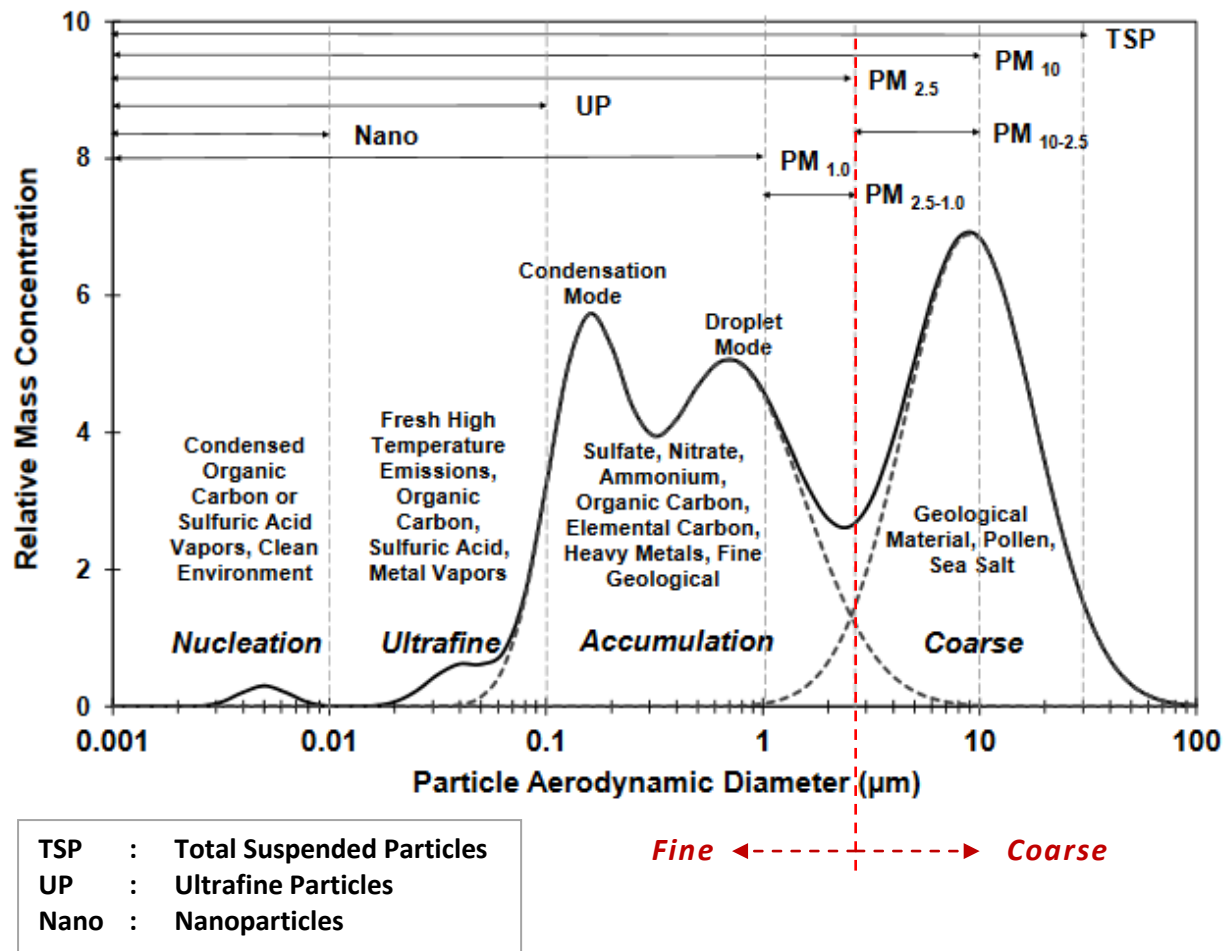
Πρόκειται για σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου **από 0.05 έως 2.5 μm**. Παράγονται από συσσωματώματα μικρότερων σωματιδίων (της περιοχής πυρήνωσης) και από συμπυκνώσεις επιπρόσθετου υλικού στα συσσωματώματα αυτά.

○ **Συμπυκνώματα (condensation mode)**

Πρόκειται για μικρότερα σωματίδια από τα σταγονίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου **~0,2μm**. Σχηματίζονται από τη συσσωμάτωση μη υγροσκοπικών σωματιδίων.

○ **Σταγονίδια (droplet mode)**

Είναι δυνατόν να λάβουν χώρα αντιδράσεις υγρής φάσης μεταξύ σταγονιδίων μέσα σε νέφη ή ομίχλη ή παρουσία πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας, επάνω στην επιφάνεια αιωρούμενων σωματιδίων. Το συσσωμάτωμα, που επέρχεται ως αποτέλεσμα, δημιουργεί την περιοχή των σταγονιδίων με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου **~ 0,7 μm**.



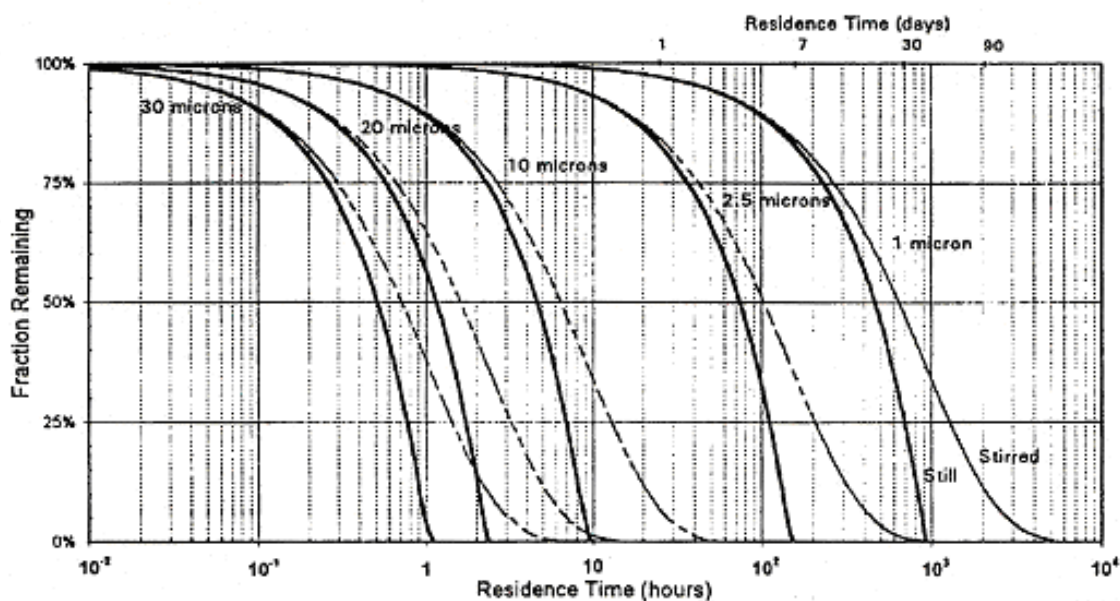
Εικόνα Γ.4

Εξειδικευμένο παράδειγμα κατανομής αιωρούμενων σωματιδίων κατά μάζα και κυριότερα συστατικά. Cao et al., 2013

Γ.7 Χρόνοι παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα

Ο χρόνος παραμονής εκφράζει το χρόνο κατά τον οποίο ένα συστατικό στην ατμόσφαιρα δύναται να αναμειχθεί ή να μεταφερθεί από διάφορες διεργασίες δυναμικές πριν απομακρυνθεί από αυτόν κυρίως λόγω εναπόθεσής του στο έδαφος. Ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων στην τροπόσφαιρα κυμαίνεται από λίγες ημέρες έως λίγες εβδομάδες. Όσο μεγαλώνει η διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να κατακρημνισθούν προς την επιφάνεια της γης. Αιωρούμενα σωματίδια με μικρό χρόνο παραμονής μπορεί να αναμειχθούν μόνο τοπικά, ενώ αντίθετα αιωρούμενα σωματίδια με μεγάλο χρόνο παραμονής μπορούν να μεταφερθούν και να αναμειχθούν έως και σε παγκόσμια κλίμακα.

Οι χρόνοι παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από την αεροδυναμική τους διάμετρο (διάγραμμα Εικόνας Γ.5), η οποία και καθορίζει τη συμπεριφορά των σωματιδίων στις διεργασίες που λαμβάνουν μέρος καθώς και την ταχύτητα πτώσης τους. Για αιωρούμενα σωματίδια, των οποίων η αεροδυναμική διάμετρος κυμαίνεται μεταξύ 0,01 και 1μm, ο χρόνος παραμονής τους στην ατμόσφαιρα κυμαίνεται από μερικές μέρες έως μερικές εβδομάδες. Επίσης, τα σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου από 0.05 έως 2.5 μm παρουσιάζουν χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα από 7 έως 30 ημέρες. Αντίθετα, ο χρόνος ζωής των αιωρούμενων σωματιδίων μεγαλύτερων αεροδυναμικών διαμέτρων κυμαίνεται από μερικές ώρες έως μερικές ημέρες.



Εικόνα Γ.5

Διάγραμμα του χρόνου αιώρησης σωματιδίων διαφόρων μεγεθών συναρτήσει της διαμέτρου τους. Τα στοιχεία αναφέρονται σε μέγιστο υψόμετρο 100 m για τις περιπτώσεις ακίνητου (Still) και αναταραγμένου (Stirred) αέρα. (Watson et al. 1997)

Ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους, κυρίως από τη συγκέντρωση των υδρατμών, αλλά και άλλων συστατικών του ατμοσφαιρικού αέρα, τα οποία είναι χημικά δραστικά και επηρεάζουν την εξέλιξη της σύστασης και του μεγέθους των ατμοσφαιρικών σωματιδίων.

Τέλος, άλλος ένας παράγοντας, που επηρεάζει το χρόνο παραμονής των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα, είναι ο τρόπος με τον οποίο απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα καθώς αυτό επιτυγχάνεται μέσω των μηχανισμών της ξηρής και της υγρής εναπόθεσης.

Γ.8 Ατμοσφαιρικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων

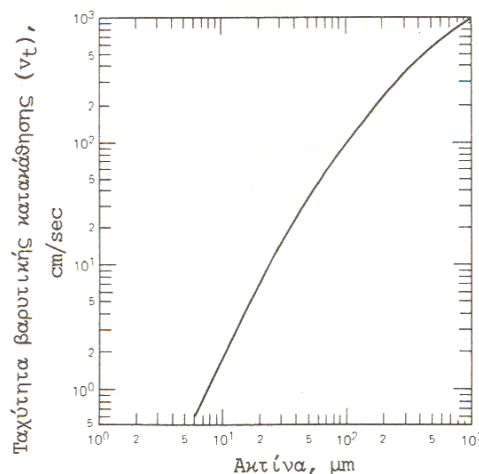
Η μεταφορά των αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης γίνεται με τους παρακάτω μηχανισμούς απομάκρυνσης:

- Βαρυτική καθίζηση.
- Ξηρή εναπόθεση.
- Υγρή εναπόθεση.

Οι παραπάνω μηχανισμοί ελαττώνουν σταδιακά την περιεχόμενη μάζα και επιταχύνουν τη μείωση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, η οποία διαφορετικά επιτυγχάνεται μόνο από την ατμοσφαιρική διάχυση και διασπορά.

• Βαρυτική καθίζηση (gravitational settling)

Η εναπόθεση στην επιφάνεια της γης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι αμελητέα για τα μικρότερα σωματίδια, οπότε λαμβάνεται υπόψη για τα σωματίδια μεγαλύτερων διαμέτρων, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της Εικόνας Γ.6.



Εικόνα Γ.6

Βαρυτική ταχύτητα καθίζησης συναρτήσει της ακτίνας για σωματίδια με πυκνότητα 5g/cm^3 κοντά στην επιφάνεια της γης. (Μελάς, 2012)

• Ξηρή εναπόθεση (dry deposition)

Η ξηρή εναπόθεση μπορεί να θεωρηθεί ότι συντελείται σε τρία βήματα:

- Αφορά στη μεταφορά του υλικού πολύ κοντά στο έδαφος με τη βοήθεια των τυρβωδών στροβίλων (αεροδυναμική συνιστώσα της μεταφοράς).
- Περιλαμβάνει τη διάχυση του υλικού μέσα στο ιξώδες υπόστρωμα (viscous sublayer), όπου η ροή είναι στρωτή (επιφανειακή συνιστώσα της μεταφοράς). Το πάχος αυτού του υποστρώματος είναι της τάξης των 10^{-1}cm , αλλά το συγκεκριμένο βήμα είναι κρίσιμο για τον συνολικό αριθμό απόθεσης.
- Τελικά, ένα μέρος του υλικού, που διαχέεται μέσα στο ιξώδες υπόστρωμα, κατακρατείται στο έδαφος μέσω απορρόφησης ή διάλυσης. Τα χημικά αδρανή στοιχεία δεν κατακρατούνται στο έδαφος.

Οι παράγοντες που επιδρούν στην ξηρή εναπόθεση είναι οι εξής:

Ατμοσφαιρικές μεταβλητές	Ιδιότητες υλικού που αποτίθεται		Ιδιότητες επιφάνειας
	Αέρια	Σωματίδια	
Ταχύτητα ανέμου στα 10m	Χημική αντιδραστικότητα	Διάμετρος	Αεροδυναμική τραχύτητα
Ταχύτητα τριβής	Διαλυτότητα	Σχήμα	Τοπογραφία
Ατμοσφαιρική ευστάθεια	Μοριακή διαχυτικότητα	Πυκνότητα	Υγρότητα
Τυρβώδεις στρόβιλοι	Μερική πίεση	Υδροσκοπικότητα	Ύψος φυλλώματος
Θερμοκρασία αέρα		Διαλυτότητα	Γεωμετρία και δομή φυλλώματος
Σχετική υγρασία		Ηλεκτροστατικές ιδιότητες	Απορροφητικότητα
			Πορώδης υφή
			Ηλεκτροστατικές ιδιότητες

Οι μεγαλύτερες ταχύτητες εναπόθεσης αναμένονται σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας πάνω από διαπνέουσα βλάστηση.

• Υγρή εναπόθεση (wet deposition)

Η υγρή εναπόθεση είναι η φυσική διεργασία με την οποία τα αιωρούμενα σωματίδια απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα από κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι, σταγονίδια νεφών και ομίχλης). Σε γενικές γραμμές, η υγρή εναπόθεση γίνεται σε τρία στάδια. Τα αιωρούμενα σωματίδια πρέπει: **(i)** να βρεθούν σε σημείο της ατμόσφαιρας όπου υπάρχουν υγροποιημένοι υδρατμοί, **(ii)** να απορροφηθούν από τα μετέωρα σταγονίδια και **(iii)** να πέσουν μαζί τους στο έδαφος.

Η ορολογία που χρησιμοποιείται για την υγρή εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων στη διεθνή βιβλιογραφία είναι ποικίλη: wet deposition, wet removal, precipitation scavenging, washout, rainout και snowout. Γενικά, ο όρος **washout** (απόπλυση) χρησιμοποιείται για να δηλώσει τη σάρωση των αιωρούμενων σωματιδίων κάτω από το σύννεφο από νετό που πέφτει, ενώ οι όροι **rainout** και **snowout** χρησιμοποιούνται για την αντίστοιχη διεργασία εντός των νεφών.

Οι δύο τύποι υγρής εναπόθεσης, κάτω από το σύννεφο (washout) και μέσα στο σύννεφο (rainout), έχουν διαφορετική βαρύτητα ανάλογα με τη χωρική κλίμακα της διασποράς. Σε μελέτες τοπικής κλίμακας, η σάρωση των σωματιδίων κάτω από το σύννεφο είναι αυτή που έχει τη μεγαλύτερη επίπτωση, ενώ σε μελέτες μεγάλης χωρικής κλίμακας κυριαρχεί η διεργασία εντός των νεφών. Επίσης, *σωματίδια με μεγάλους χρόνους παραμονής στην ατμόσφαιρα εισχωρούν στα σύννεφα και απομακρύνονται κυρίως με τον μηχανισμό της απόπλυσης εντός των νεφών (rainout) εμφανίζοντας τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις σε περιφερειακή κλίμακα*, ενώ άλλα σωματίδια απομακρύνονται κυρίως με τον μηχανισμό της απόπλυσης κάτω από τα σύννεφα (washout) και οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις εμφανίζονται σε τοπική κλίμακα.

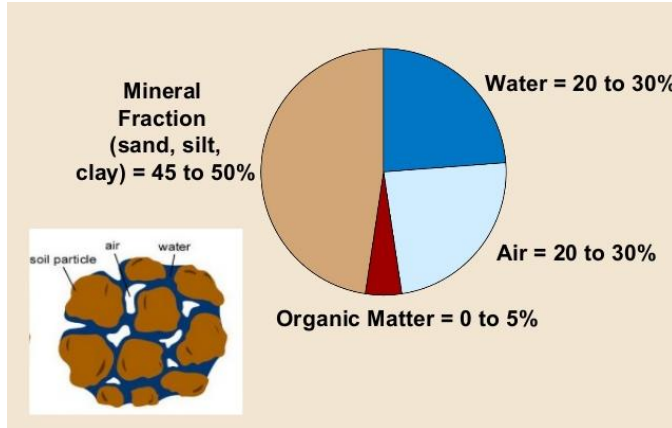
Γενικά, η υγρή απόθεση, και με τις δύο της μορφές, συμβάλλει σημαντικά στην απομάκρυνση των αερολυμάτων από την ατμόσφαιρα. Εκτιμάται ότι το 70-80% της μάζας των αερολυμάτων, που υπάρχει στο χώρο κάτω από ένα σύννεφο, απομακρύνεται με τη βροχή. Η σάρωση και υγρή απόθεση των σωματιδίων κάτω από το σύννεφο υπολογίζεται συνήθως λαμβάνοντας υπόψη την ένταση και τη διάρκεια του νετού καθώς και τον τύπο του.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Μερικά φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών

Δ.1 Ορισμός εδάφους

Έδαφος είναι το ανώτερο τμήμα του γήινου φλοιού το οποίο αποτελείται από στερεά συστατικά (ανόργανα και οργανικά), νερό και αέρα (Εικόνα Δ.1).



Εικόνα Δ.1

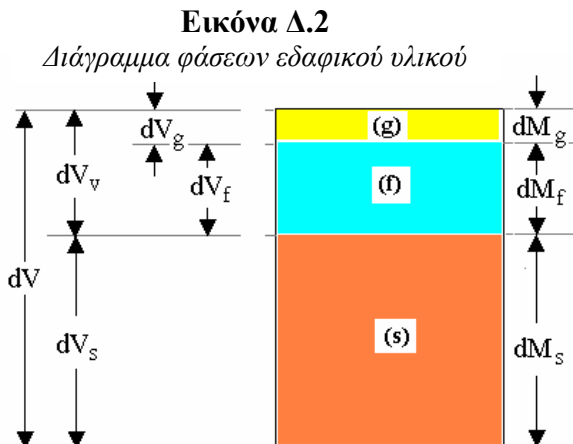
Σύσταση ενός τυπικού εδάφους

- Κενά πόρων (50%)
- Αέρας (20-30%)
 - Εδαφικό νερό (20-30%)
- Στερεά συστατικά (50%)
- Οργανικό υλικό (5%)
 - Ανόργανα συστατικά (45%)

Δ.2 Φαινόμενη πυκνότητα (Bulk Density)

Το έδαφος είναι ένα πορώδες μέσο (Εικόνα Δ.2). Ο χαρακτηριστικός στοιχειώδης όγκος ενός εδαφικού υλικού αποτελείται από ένα πληθυσμό από στερεούς κόκκους με κενά μεταξύ τους. Τα στερεά είναι μικροί κόκκοι διαφορετικής ορυκτολογικής προέλευσης. Η φάση των στερεών συμβολίζεται με τον δείκτη s (solids). Τα κενά συνθέτουν το πορώδες του υλικού και συμβολίζονται με τον δείκτη v (voids). Τα κενά μπορεί να περιέχουν είτε ένα ρευστό (f : fluid, π.χ. νερό, w : water) είτε ένα αέριο (g : gas, π.χ. ατμοσφαιρικό αέρα). Τις τρεις φάσεις, που συνθέτουν ένα χαρακτηριστικό εδαφικό δείγμα, μπορούμε σχηματικά να τις αναπαραστήσουμε στο λεγόμενο *διάγραμμα των φάσεων* του εδαφικού δείγματος (Εικόνα Δ.2). Ορίζουμε ως **φαινόμενη πυκνότητα ρ_b (bulk density)** του εδάφους το πηλίκο της μάζας της στερεάς (dM_s) και της αέριας (dM_g) φάσης προς τον ολικό όγκο του εδαφικού στοιχείου:

$$\rho_b = \frac{dM_s + dM_g}{dV} \quad (\Delta.1)$$



- dV : ολικός όγκος εδαφικού στοιχείου
- dV_v : όγκος κενών
- dV_s, dM_s : όγκος και μάζα στερεάς φάσεως
- dV_f, dM_f : όγκος και μάζα υγρής φάσεως
- dV_g, dM_g : όγκος και μάζα αέριας φάσεως

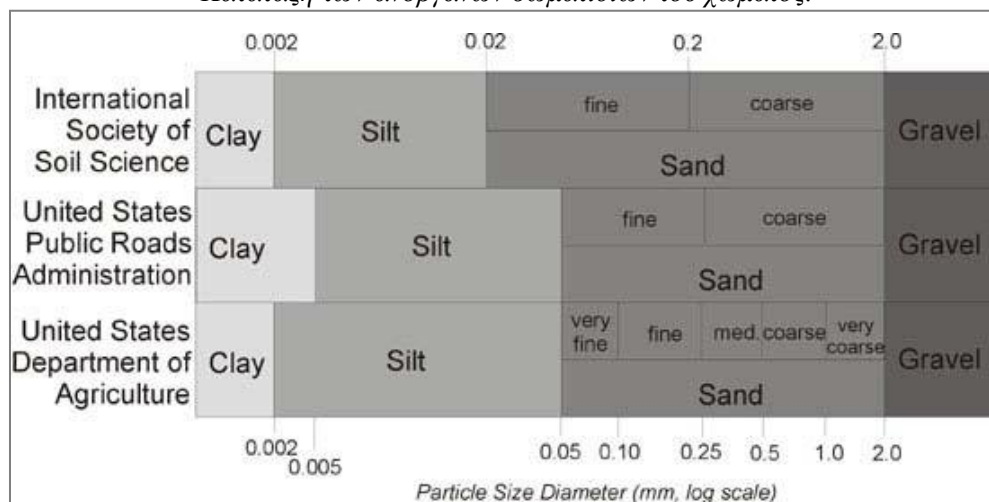
Δ.3 Ταξινόμηση των εδαφών με βάση την κοκκομετρική τους σύσταση

Σύμφωνα με το USDA (United States Department of Agriculture), τα ανόργανα σωματίδια (κόκκοι) του χώματος κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες (Εικόνες Δ.3 και Δ.4):

- άργιλος (clay): κόκκοι μεγέθους μικρότερου από 0.002 mm,
- ιλύς (silt): κόκκοι μεγέθους από 0.002 – 0.05 mm (2 - 50μm),
- άμμος (sand): κόκκοι μεγέθους από 0,05 – 2 mm (50μm - 2mm) και
- λίθοι (gravel): κόκκοι μεγέθους μεγαλύτερου από 2 mm.

Εικόνα Δ.3

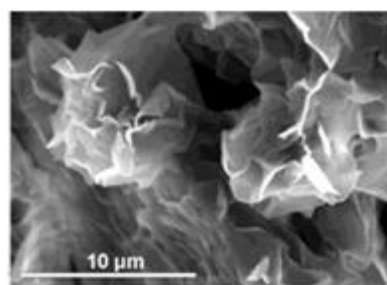
Κατάταξη των ανόργανων σωματιδίων του χώματος.



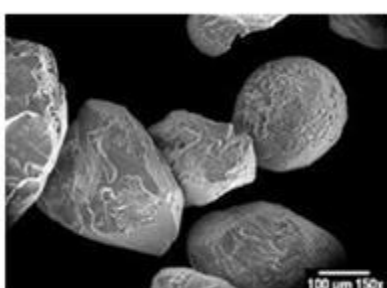
Εικόνα Δ.4

(α) Αργιλικό έδαφος και ηλεκτρονική μικρογραφία αργιλικού υλικού

(β) Αμμώδες έδαφος και μικροφωτογραφία κόκκων άμμου



(α)

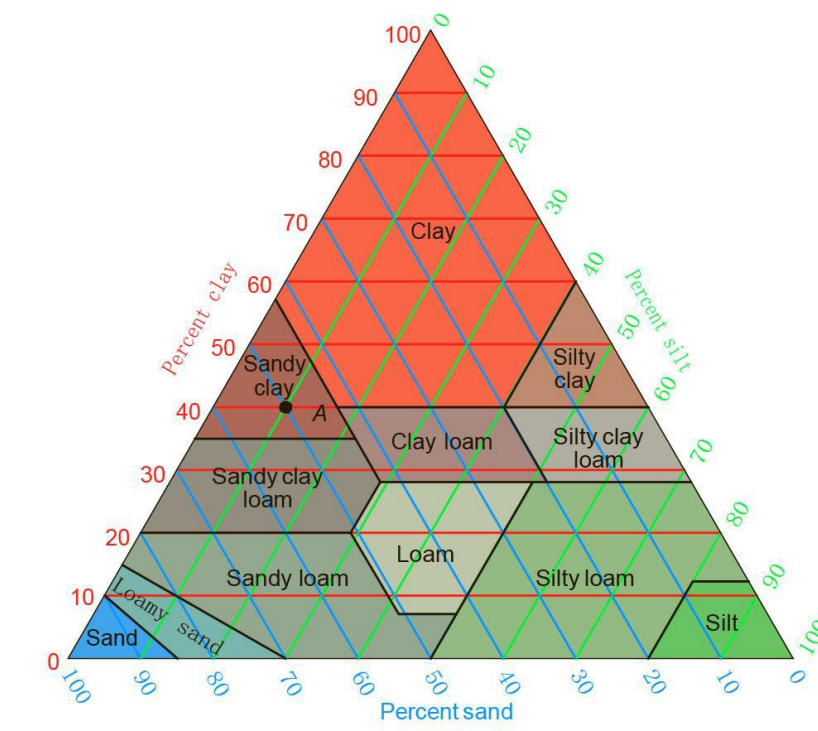


(β)

Ένα έδαφος σπανίως είναι αμιγώς αμμώδες ή αμιγώς αργιλικό. Συνήθως περιέχει ένα ευρύ φάσμα διαστάσεων κόκκων. Έτσι, τα έδαφη ταξινομούνται σε 12 κατηγορίες κοκκομετρικής σύστασης, ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής της άμμου, αργίλου και ιλύος. Οι 12 αυτές κλάσεις υφής των εδαφών καταλαμβάνουν ορισμένη θέση και χώρο σε ένα *τριγωνικό διάγραμμα μηχανικής σύστασης εδαφών* (Εικόνα Δ.5). Από το διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι ένα έδαφος που περιέχει πάνω από 50% αργιλικές διαστάσεις θα ταξινομηθεί ως άργιλος ενώ, άμμοι και ιλεις απαιτούν το 80% των κόκκων να είναι στην αντίστοιχη περιοχή. Επίσης, παρατηρούμε ότι κάθε έδαφος με περιεκτικότητα πάνω από 20% αργιλικών κόκκων θα έχει ιδιότητες αργίλου.

Εικόνα Δ.5

Τριγωνικό διάγραμμα μηχανικής σύστασης εδαφών



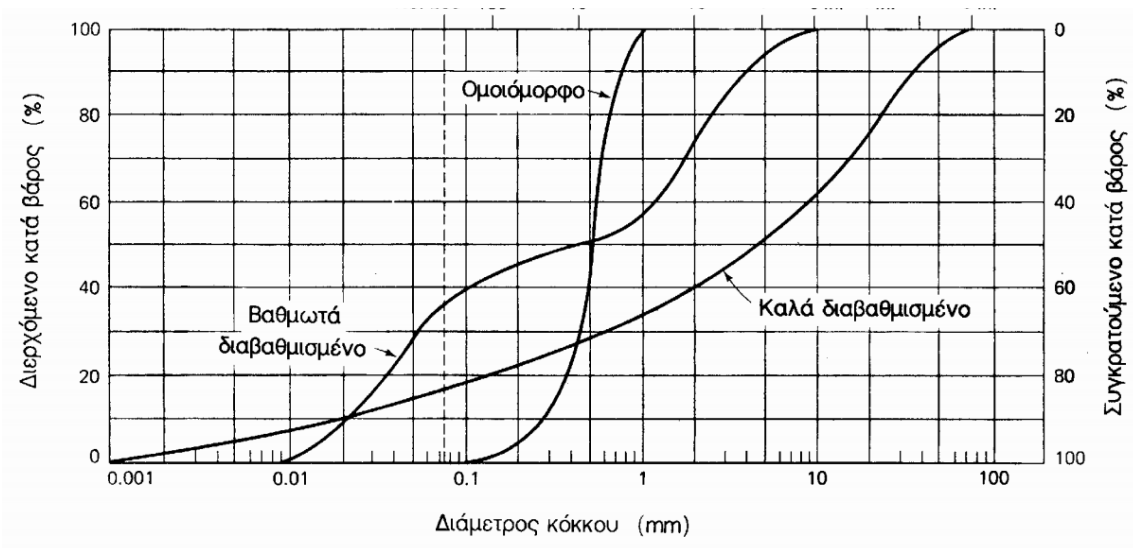
Οι 12 κλάσεις υφής των εδαφών

- Αμμώδη εδάφη (ελαφράς σύστασης):** Αμμώδες (**Sandy**), Πηλο-αμμώδες (Loamy sand), Αμμο-πηλώδες (Sandy loam).
- Πηλώδη εδάφη (μέσης σύστασης):** Αμμο-αργιλο-πηλώδες (Sandy clay loam), Πηλώδες (Loam), Ιλο-πηλώδες (Silty loam), Ιλο-αργιλο-πηλώδες (Silty clay loam), **Ιλώδες (Silt)**.
- Αργιλώδη εδάφη (βαριάς σύστασης):** Αργιλο-πηλώδες (Clay loam), Ιλο-αργιλώδες (Silty clay), Αμμο-αργιλώδες (Sandy clay), **Αργιλώδες (Clay)**.

Δ.4 Κοκκομετρικές καμπύλες

Η κοκκομετρική καμπύλη (ή καμπύλη κατανομής) είναι μια αθροιστική κατανομή της διαμέτρου των διαφόρων κόκκων που τη συνθέτουν. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η διάμετρος των κόκκων σε λογαριθμική κλίμακα ενώ, στον κάθετο άξονα το ποσοστό επί τοις εκατό κατά βάρος των διερχόμενων κόκκων. Έτσι, η κοκκομετρική καμπύλη δείχνει το ποσοστό των κόκκων που έχουν μέγεθος ίσο ή μικρότερο από την αντίστοιχη τιμή της τετημένης (διαμέτρου των κόκκων) και μπορεί να έχει μία από τις τρεις χαρακτηριστικές μορφές:

- Καμπύλη με ισχυρή κλίση: υποδηλώνει ομοιόμορφο έδαφος με κόκκους περίπου του ίδιου μεγέθους.
- Καμπύλη με ήπια κλίση: υποδηλώνει μεγάλο εύρος διακύμανσης του μεγέθους των κόκκων, δηλαδή ότι το έδαφος είναι καλά διαβαθμισμένο.
- Καμπύλη με τμήματα διαφορετικής καμπυλότητας: υποδηλώνει ότι το έδαφος αποτελεί μίγμα δύο ή περισσότερων ομοιόμορφων εδαφικών υλικών, δηλαδή ότι το έδαφος είναι βαθμωτά διαβαθμισμένο.



Εικόνα Δ.6

Τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες εδαφών

Δ.5 Κοκκομετρική σύσταση εδάφους και διαβρωσιμότητα

Η κοκκομετρική σύσταση ενός εδάφους καθορίζει πόσο νερό μπορεί να συγκρατήσει το έδαφος, το είδος των φυτών που μπορούν να αναπτυχθούν σε αυτό καθώς επίσης και πόσο «ευαίσθητο» είναι στη διάβρωση. Η διάβρωση αυξάνεται με την αύξηση της ιλύος και της λεπτής άμμου ενώ, μειώνεται με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άμμο, άργιλο και οργανική ουσία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Διεργασίες και είδη της διάβρωσης του εδάφους

Η διάβρωση (**erosion**) αποτελεί ένα σύνολο διεργασιών που περιλαμβάνουν τόσο την απόσπαση από το έδαφος χώματος και θραυσμάτων από πετρώματα, όσο και τη μεταφορά του υλικού αυτού και την απόθεσή του σε νέες θέσεις ως κλαστικό ίζημα (**sedimentation**).

Η *κανονική διάβρωση* (normal ή geological erosion) θα μπορούσε να θεωρηθεί επωφελής για τη δυναμική ανάπτυξη του εδάφους, αφού ο ρυθμός σχηματισμού του εδάφους υπερβαίνει το ρυθμό καταστροφής του. Όμως, η *επιταχυνόμενη διάβρωση* (accelerated erosion) μπορεί να προκαλέσει εμφανείς και μεγάλης έκτασης ζημιές που σχετίζονται με την υποβάθμιση του εδάφους, αφού, στην περίπτωση αυτή, η διάβρωση καταστρέφει ετησίως περισσότερο στρώμα εδάφους από αυτό που σχηματίζεται.

Οι ρυθμοί διάβρωσης επηρεάζονται από τρεις κατηγορίες παραγόντων:

(i) ενεργειακούς παράγοντες (energy factors), (ii) παράγοντες αντοχής (resistance factors) και (iii) παράγοντες προστασίας (protection factors).

(i) Οι *παράγοντες ενέργειας* σχετίζονται με τη βροχόπτωση, την απορροή υδάτων, τον άνεμο, τον πάγο, τη βαρύτητα, αλλά και τα μηχανικά εργαλεία. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν:

(i_a) η *υδατική διάβρωση*, η οποία αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αιτίες υποβάθμισης του εδάφους, σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων (π.χ. ένταση, διάρκεια, μέγεθος σταγόνων) και διακρίνεται στους εξής τύπους (Εικόνα Ε.1):

διάβρωση διασποράς (splash erosion),
φυλλοειδής διάβρωση (sheet erosion),
αυλακοειδής διάβρωση (rill erosion) και
χαραδρώδης διάβρωση (gully erosion).

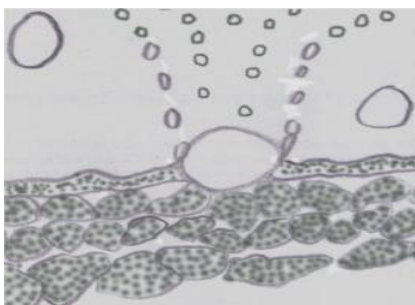
(i_b) η *αιολική διάβρωση*, η οποία προκαλείται από τη δράση του ανέμου που παρασύρει σωματίδια του εδάφους σε διάφορες αποστάσεις ανάλογα με την έντασή του και το μέγεθος των σωματιδίων και

(i_c) η *μηχανική διάβρωση*, η οποία είναι αποτέλεσμα της καλλιέργειας του εδάφους όταν τα γεωργικά μηχανήματα προκαλούν μετακίνηση χώματος. Στις αγροτικές περιοχές, η διάβρωση εξαιτίας της καλλιέργειας του εδάφους (tillage erosion) θεωρείται σημαντική αιτία υποβάθμισης του εδάφους γιατί καταστρέφει τη δομή του, υποβαθμίζει την ποιότητα των παραγόμενων αγροτικών προϊόντων και μειώνει σημαντικά τη γεωργική παραγωγή.

(ii) Οι *παράγοντες αντοχής* σχετίζονται με τη διαβρωσιμότητα του εδάφους και εξαρτώνται από τις φυσικο-μηχανικές ιδιότητες του εδάφους καθώς και από χημικούς, φυσικο-χημικούς και βιολογικούς παράγοντες.

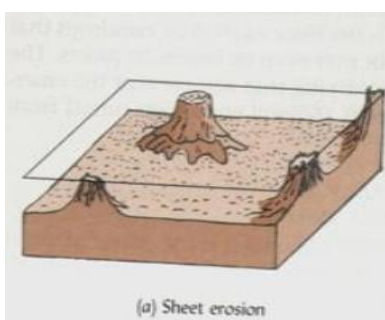
(iii) Οι *παράγοντες προστασίας* σχετίζονται με τις πρακτικές εκείνες που μπορούν να μειώσουν τη διάβρωση του εδάφους. Η εφαρμογή κατάλληλων αντιδιαβρωτικών μέτρων προσαρμοσμένων στις φυσικές καλλιεργητικές και κλιματολογικές συνθήκες

κάθε περιοχής (π.χ. η φυτοκάλυψη, κατασκευή αναβαθμίδων, κατάλληλες γεωργικές πρακτικές κ.ά.), μπορούν να συνεισφέρουν στην επίτευξη αειφόρας διαχείρισης του εδάφους.



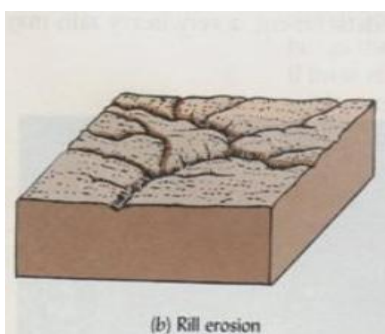
Διάβρωση διασποράς (splash erosion):

Αποκόλληση και απομάκρυνση με εκτόξευση μικρών εδαφικών τεμαχιδίων. Προκαλείται από την πτώση των σταγόνων της βροχής στο έδαφος.



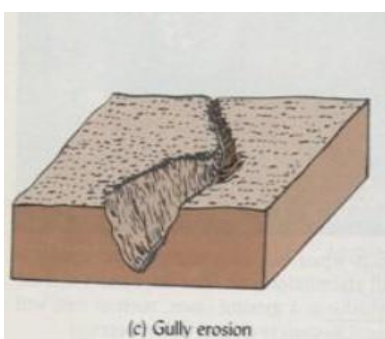
Φυλλοειδής διάβρωση (sheet erosion):

Απομάκρυνση χόματος ομοιόμορφα από την επιφάνεια του εδάφους.



Αυλακοειδής διάβρωση (rill erosion):

Σχηματισμός μικρών καναλιών διασκορπισμένων ανομοιόμορφα, κυρίως σε γυμνά, μη καλλιεργούμενα ή φρεσκοκαλλιεργημένα εδάφη.



Χαραδρώδης διάβρωση (gully erosion):

Σχηματισμός μεγάλων καναλιών ή χαραδρών σε θέσεις όπου συγκεντρώνεται το νερό.

Εικόνα Ε.1

Τύποι υδατικής διάβρωσης του εδάφους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

Μαθηματική περιγραφή των θεωρητικών μοντέλων μετατροπής

Μια περιγραφή των μοντέλων μετατροπής, σε θεωρητική βάση, επιχειρείται στο παράρτημα που ακολουθεί. Εφόσον τα μοντέλα μετατροπής, που αναπτύχθηκαν για τον $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ και το ^7Be , αποτελούν προσαρμογή εκείνων που χρησιμοποιήθηκαν για το ^{137}Cs , θα δοθεί η μαθηματική περιγραφή των τελευταίων.

**(i) Το αναλογικό μοντέλο (καλλιεργούμενα εδάφη)
(Proportional Model) για το ^{137}Cs**

Το αναλογικό μοντέλο αποτελεί το απλούστερο μοντέλο μετατροπής που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις του ^{137}Cs . Βασίζεται στην υπόθεση ότι οι εναποθέσεις ^{137}Cs στο έδαφος από την ατμόσφαιρα είναι πλήρως αναμεμιγμένες με μέσα στο στρώμα του οργώματος ή της καλλιέργειας και ότι η απώλεια/απόθεση χόματος λόγω διάβρωσης/απόθεσης είναι ανάλογη με το κλάσμα της μείωσης/αύξησης της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs που συνέβη από την έναρξη της εναπόθεσής του στο έδαφος ή την έναρξη της καλλιέργειας. Η υπόθεση αυτή, όμως, οδηγεί στην παραδοχή ότι η συγκέντρωση του ^{137}Cs στα διαβρωμένα χόματα και στα αποτιθέμενα ιζήματα παραμένει σταθερή με την πάροδο του χρόνου.

Εάν A είναι η μετρούμενη συνολική παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs στο σημείο δειγματοληψίας (Bq m^{-2}) και A_{ref} η τοπική παραμένουσα απόθεση αναφοράς του ^{137}Cs (Bq m^{-2}), το αναλογικό μοντέλο περιγράφεται μαθηματικά από τις παρακάτω εξισώσεις:

- Για τοποθεσίες διάβρωσης ($A < A_{\text{ref}}$):

$$Y = 10 \frac{B \cdot d \cdot X}{100 \cdot T \cdot P} \quad (\text{ΣΤ.1})$$

$$X = \frac{A_{\text{ref}} - A}{A_{\text{ref}}} 100 \% \quad (\text{ΣΤ.2})$$

- Y : ο μέσος ετήσιος ρυθμός απώλειας χόματος ($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$),
 X : η εκατοστιαία μείωση της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs ,
 P : ο συντελεστής διόρθωσης του μεγέθους κόκκων χόματος για τοποθεσίες διάβρωσης.

- Για τοποθεσίες απόθεσης ιζημάτων ($A > A_{\text{ref}}$):

$$Y' = 10 \frac{B \cdot d \cdot X'}{100 \cdot T \cdot P'} \quad (\text{ΣΤ.3})$$

$$X' = \frac{A - A_{\text{ref}}}{A_{\text{ref}}} 100 \% \quad (\text{ΣΤ.4})$$

- Y' : ο μέσος ετήσιος ρυθμός απόθεσης χόματος ($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$),
 X' : η εκατοστιαία αύξηση της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs ,
 P' : ο συντελεστής διόρθωσης του μεγέθους κόκκων χόματος για τοποθεσίες απόθεσης ιζημάτων.

Επίσης, d : το βάθος του στρώματος του οργώματος ή της καλλιέργειας (m),
 B : η φαινόμενη πυκνότητα (bulk density) του χόματος (kg m^{-3}),
 T : ο χρόνος που μεσολάβησε από την αρχική εναπόθεση του ^{137}Cs στο έδαφος ή την έναρξη οποιασδήποτε μεταγενέστερης καλλιέργειας (yr).

(ii) Το απλοποιημένο μοντέλο ισοζυγίου μάζας (καλλιεργούμενα εδάφη)
(Mass Balance Model 1) για το ^{137}Cs

Το απλοποιημένο μοντέλο ισοζυγίου μάζας περιλαμβάνει την παραδοχή ότι η συνολική εναπόθεση ^{137}Cs στο έδαφος από την ατμόσφαιρα συνέβη το 1963.

Εάν $A(t)$ είναι η μετρούμενη συνολική παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs στο σημείο δειγματοληψίας (Bq m^{-2}) κατά το έτος t και $A_{ref}(t)$ η τοπική παραμένουσα απόθεση αναφοράς του ^{137}Cs (Bq m^{-2}) κατά το έτος t , το απλοποιημένο μοντέλο ισοζυγίου μάζας περιγράφεται μαθηματικά από τις παρακάτω εξισώσεις:

- Για τοποθεσίες διάβρωσης [$A(t) < A_{ref}(t)$], ο μέσος ετήσιος ρυθμός απώλειας χόματος Y ($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) είναι:

$$Y = \frac{10 \cdot d \cdot B}{P} \left[1 - \left(1 - \frac{X}{100} \right)^{1/(t-1963)} \right] \quad (\text{ΣΤ.5})$$

όπου X είναι η εκατοστιαία μείωση της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs :

$$X = \frac{A_{ref}(t) - A(t)}{A_{ref}} 100 \% \quad (\text{ΣΤ.6})$$

$$A(t) = A_{ref}(t) \cdot \left(1 - P \frac{R}{d} \right)^{t-1963} \quad (\text{ΣΤ.7})$$

Επίσης:

- d : το βάθος του στρώματος του οργώματος ή της καλλιέργειας (m),
- B : η φαινόμενη πυκνότητα (bulk density) του χόματος (kg m^{-3}),
- P : ο συντελεστής διόρθωσης του μεγέθους κόκκων χόματος για τοποθεσίες διάβρωσης,
- R : ο σταθερός ρυθμός χαμηλώματος της επιφάνειας του εδάφους (m yr^{-1}).

- Για τοποθεσίες απόθεσης ιζημάτων [$A(t) > A_{ref}(t)$], ο ρυθμός απόθεσης ιζημάτων R' ($\text{kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$), ο οποίος θεωρείται σταθερός, είναι:

$$R' = \frac{A_{ex}(t)}{\int_{1963}^t C_d(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt'} = \frac{A(t) - A_{ref}(t)}{\int_{1963}^t C_d(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt'} \quad (\text{ΣΤ.8})$$

όπου:

$A_{ex}(t)$: η πλεονάζουσα παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs του σημείου δειγματοληψίας από την παραμένουσα απόθεση αναφοράς κατά το έτος t , δηλαδή:

$$A_{ex}(t) = A(t) - A_{ref}(t) \quad (\Sigma\text{T.9})$$

όπου:

λ : η σταθερά διάσπασης του ^{137}Cs (yr^{-1})
 $C_d(t')$: η ειδική ραδιενέργεια του ^{137}Cs του αποτιθέμενου ιζήματος (Bq kg^{-1}) κατά το έτος t' , η οποία θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το σταθμικό μέσο της ειδικής ραδιενέργειας του ^{137}Cs του χώματος που μετακινείται από το ανερχόμενο τμήμα της συνεισφέρουσας επιφάνειας, οπότε μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$C_d(t') = \frac{1}{\int_S R \cdot dS} \cdot \int_S P' \cdot C_e(t') \cdot R \cdot dS \quad (\Sigma\text{T.10})$$

όπου:

R : ο σταθερός ρυθμός χαμηλώματος της επιφάνειας του εδάφους (m yr^{-1}),
 P' : ο συντελεστής διόρθωσης του μεγέθους κόκκων χώματος για τοποθεσίες απόθεσης ιζημάτων,
 S : το εμβαδό του ανερχόμενου τμήματος της συνεισφέρουσας επιφάνειας (m^2),
 $C_e(t')$: η ειδική ραδιενέργεια του ^{137}Cs του μετακινούμενου χώματος από ένα σημείο διάβρωσης (Bq kg^{-1}), η οποία μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$C_e(t') = P \cdot \frac{A(t')}{d} = \frac{P}{d} \cdot A_{ref}(t') \cdot \left(1 - P \frac{R}{d}\right)^{t'-1963} = \frac{P}{d} \cdot A_{ref}(t) \cdot e^{\lambda(t-t')} \cdot \left(1 - P \frac{R}{d}\right)^{t'-1963}$$

όπου: (\Sigma\text{T.11})

d : το βάθος του στρώματος του οργώματος ή της καλλιέργειας (m).

**(iii) Το βελτιωμένο μοντέλο ισοζυγίου μάζας (καλλιεργούμενα εδάφη)
(Mass Balance Model 2) για το ^{137}Cs**

Το βελτιωμένο μοντέλο ισοζυγίου μάζας λαμβάνει υπόψη τη χρονικά εξαρτώμενη εναπόθεση του ^{137}Cs στο έδαφος από την ατμόσφαιρα καθώς και την πρόσφατη εναπόθεσή του πριν ενσωματωθεί στο στρώμα του οργώματος λόγω της καλλιέργειας.

Εάν $A(t)$ είναι η συνολική παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs στο σημείο δειγματοληψίας (Bq m^{-2}) κατά το έτος t και $A_{ref}(t)$ η τοπική παραμένουσα απόθεση αναφοράς του ^{137}Cs (Bq m^{-2}) κατά το έτος t , το βελτιωμένο μοντέλο ισοζυγίου μάζας περιγράφεται μαθηματικά από τις παρακάτω εξισώσεις:

- Για τοποθεσίες διάβρωσης [$A(t) < A_{ref}(t)$], η μεταβολή της συνολικής παραμένουσας απόθεσης $A(t)$ με το χρόνο δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dA(t)}{dt} = (1 - \Gamma) \cdot I(t) - \left(\lambda + P \frac{R}{d} \right) \cdot A(t) \quad (\text{ΣΤ.12})$$

όπου:

R : ο ρυθμός διάβρωσης ($\text{kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)

P : ο συντελεστής διόρθωσης του μεγέθους κόκκων χώματος για τοποθεσίες διάβρωσης,

d : η κατά βάθος συσσωρευτική μάζα που αντιπροσωπεύει το μέσο βάθος του οργώματος (kg m^{-2}),

λ : η σταθερά διάσπασης του ^{137}Cs (yr^{-1}),

$I(t)$: η ετήσια ροή εναπόθεσης του ^{137}Cs ($\text{Bq m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$),

Γ : το ποσοστό του νεο-αποτιθέμενου στο έδαφος ^{137}Cs που απομακρύνεται λόγω διάβρωσης πριν αναμιχθεί μέσα στο στρώμα του οργώματος.

Με την παραδοχή ότι η αρχική κατανομή του ^{137}Cs στο προφίλ του εδάφους είναι εκθετική, το Γ δίνεται από τη σχέση:

$$\Gamma = P \cdot \gamma \cdot \left(1 - e^{-R/H} \right) \quad (\text{ΣΤ.13})$$

όπου:

γ : ποσοστό της ετήσιας εναπόθεσης του ^{137}Cs που απομακρύνεται λόγω διάβρωσης, πριν ενσωματωθεί στο χώμα από τις εργασίες καλλιέργειας,

H : το κατά μάζα βάθος χαλάρωσης της κατανομής του νεο-αποτιθέμενου ^{137}Cs στο προφίλ του εδάφους (kg m^{-2}).

Εάν το t_0 (yr) αντιπροσωπεύει το έτος έναρξης της καλλιέργειας και $A(t_0)$ την παραμένουσα απόθεση (Bq m^{-2}) του ^{137}Cs κατά το έτος t_0 , τότε από τις δύο παραπάνω εξισώσεις (ΣΤ.12) και (ΣΤ.13) προκύπτει ότι η συνολική παραμένουσα απόθεση $A(t)$ του ^{137}Cs (Bq m^{-2}) κατά το έτος t μπορεί να εκφραστεί ως:

$$A(t) = A(t_0) \cdot e^{-(PR/d+\lambda)(t-t_0)} + \int_{t_0}^t \left(1 - P \cdot \gamma \cdot (1 - e^{-R/H})\right) \cdot I(t') \cdot e^{-(PR/d+\lambda)(t+t')} \cdot dt' \quad (\Sigma\text{T.14})$$

όπου:

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

Ο ρυθμός διάβρωσης R ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) μπορεί να εκτιμηθεί λύνοντας αριθμητικά την εξίσωση (ΣΤ.14), όταν οι τιμές της ροής εναπόθεσης του ^{137}Cs καθώς και οι σχετικές παράμετροι είναι γνωστές.

- Για τοποθεσίες απόθεσης ιζημάτων [$A(t) > A_{ref}(t)$], η πλεονάζουσα παραμένουσα απόθεση, που ορίζεται από τη σχέση (ΣΤ.9), μπορεί να εκφραστεί ως:

$$A_{ex} = \int_{t_0}^t R' \cdot C_d(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt' \quad (\Sigma\text{T.16})$$

όπου:

- R' : ο ρυθμός απόθεσης ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$),
 $C_d(t')$: η ειδική ραδιενέργεια του ^{137}Cs του αποτιθέμενου ιζήματος (Bq kg^{-1}) κατά το έτος t' . Περιλαμβάνει δύο συνιστώσες: η πρώτη σχετίζεται με την απομάκρυνση του νεο-αποτιθέμενου ^{137}Cs στο έδαφος και η δεύτερη με τη διάβρωση του συσσωρευμένου ^{137}Cs που είναι ήδη αποθηκευμένο στο χώμα. Πάλι, η $C_d(t')$ μπορεί να υπολογιστεί από τις συγκεντρώσεις του ^{137}Cs στο χώμα που μετακινείται από το ανερχόμενο τμήμα της συνεισφέρουσας επιφάνειας S (σχέση ΣΤ.10).

Ο μέσος ρυθμός απόθεσης R' ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$R' = \frac{A(t) - A_{ref}}{\int_{t_0}^t C_d(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt'} \quad (\Sigma\text{T.17})$$

(iv) Το μοντέλο ισοζυγίου μάζας που ενσωματώνει την επίδραση της καλλιέργειας στη μετακίνηση του χόματος (Mass Balance Model 3) για το ^{137}Cs

Η επίδραση της καλλιέργειας στην ανακατανομή του χόματος μπορεί να αντιπροσωπευτεί από την ροή της κατερχόμενης απόθεσης ιζημάτων F_Q ($\text{kg m}^{-1} \text{yr}^{-1}$):

$$F_Q = \phi \cdot \sin \beta \quad (\Sigma\text{T.18})$$

όπου:

β : η γωνία κλίσης ($^\circ$),

ϕ : μια ειδική σταθερά της τοποθεσίας: η σταθερά καλλιέργειας ($\text{kg m}^{-1} \text{yr}^{-1}$).

Εάν μια γραμμή της κατωφέρειας χωριστεί σε τμήματα και κάθε τμήμα προσεγγιστεί ως ευθεία γραμμή, τότε η καθαρή ανακατανομή χόματος εξαιτίας της καλλιέργειας R_t ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) για το i -στό τμήμα (από την κορυφή) είναι:

$$R_t = (F_{Q,out} - F_{Q,in}) / L_i = \phi \cdot (\sin \beta_i - \sin \beta_{i-1}) / L_i = R_{t,out} - R_{t,in} \quad (\Sigma\text{T.19})$$

όπου L_i είναι το μήκος του i -στού τμήματος (m).

Τα $R_{t,out}$ και $R_{t,in}$ ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) ορίζονται ως εξής:

$$R_{t,out} = \phi \cdot \sin \beta_i / L_i \quad (\Sigma\text{T.20})$$

$$R_{t,in} = \phi \cdot \sin \beta_{i-1} / L_i \quad (\Sigma\text{T.21})$$

- Για ένα σημείο, που υπόκειται σε υδατική διάβρωση, η μεταβολή της συνολικής παραμένουσας απόθεσης $A(t)$ (Bq m^{-2}) του ^{137}Cs με το χρόνο t , μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{dA(t)}{dt} = (1 - \Gamma) \cdot I(t) + R_{t,in} \cdot C_{t,in}(t) - R_{t,out} \cdot C_{t,out}(t) + R_w \cdot C_{w,out}(t) - \lambda \cdot A(t)$$

όπου: (ΣΤ.22)

$C_{t,in}$, $C_{t,out}$ και $C_{w,out}$: οι ειδικές ραδιενέργειες του ^{137}Cs (Bq kg^{-1}) στα ιζήματα, που σχετίζονται με την εισαγωγή τους εξαιτίας της καλλιέργειας, την εξαγωγή τους εξαιτίας της καλλιέργειας και την εξαγωγή τους εξαιτίας του νερού, αντίστοιχα.

Ο καθαρός ρυθμός διάβρωσης R ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) είναι:

$$\boxed{R = R_{t,out} - R_{t,in} + R_w} \quad (\Sigma\text{T.23})$$

όπου:

R_w : ο ρυθμός υδατικής διάβρωσης ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$).

- Για ένα σημείο, που υπόκειται σε υδατική απόθεση, η μεταβολή της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs $A(t)$ (Bq m^{-2}) με το χρόνο t , μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{dA(t)}{dt} = I(t) + R_{t,in} \cdot C_{t,in}(t) - R_{t,out} \cdot C_{t,out}(t) + R'_w \cdot C_{w,in}(t) - \lambda \cdot A(t) \quad (\text{ΣΤ.24})$$

όπου:

$C_{w,in}$: η ειδική ραδιενέργεια του ^{137}Cs (Bq kg^{-1}) στα ιζήματα, που σχετίζονται με την εισαγωγή τους εξαιτίας του νερού.

Ο καθαρός ρυθμός απόθεσης R' ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) είναι:

$$\boxed{R' = R_{t,out} - R_{t,in} + R'_w} \quad (\text{ΣΤ.25})$$

όπου:

R'_w : ο ρυθμός υδατικής απόθεσης ιζημάτων ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$).

Η ειδική ραδιενέργεια του ^{137}Cs στο χώμα μέσα στο στρώμα του οργώματος $C_s(t')$ (Bq kg^{-1}) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

- Για μια τοποθεσία καθαρής διάβρωσης:

$$C_s(t') = \frac{A(t')}{d} \quad (\text{ΣΤ.26})$$

- Για μια τοποθεσία καθαρής απόθεσης ιζημάτων:

$$C_s(t') = \frac{1}{d} \cdot \left[A(t') - \frac{|R|}{d} \cdot \int_{t_0}^{t'-1} A(t'') \cdot e^{-\lambda t''} \cdot dt'' \right] \quad (\text{ΣΤ.27})$$

όπου:

$|R|$ ($R < 0$): ο ρυθμός καθαρής απόθεσης ιζημάτων ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$).

Οι σχέσεις μεταξύ των C_s και $C_{t,in}$ και $C_{t,out}$ είναι οι ακόλουθες:

$$C_{t,in}(t') = C_{t,out}(t') = C_s(t') \quad (\text{ΣΤ.28})$$

$$C_{w,out}(t') = P \cdot C_s(t') + \frac{I(t')}{R_w} \cdot P \cdot \gamma \cdot (1 - e^{-R_w/H}) \quad (\text{ΣΤ.29})$$

ενώ, η ειδική ραδιενέργεια του ^{137}Cs , $C_{w,in}$ (Bq kg^{-1}), στα ιζήματα που σχετίζονται με την εισαγωγή τους εξαιτίας του νερού είναι:

$$C_{w,in}(t') = \frac{1}{\int_S R \cdot dS} \cdot \int_S P' \cdot C_{w,out}(t') \cdot R \cdot dS \quad (\text{ΣΤ.30})$$

Για ένα συγκεκριμένο σημείο, ο ρυθμός διάβρωσης ή απόθεσης εξαιτίας της καλλιέργειας ($R_{t,out} - R_{t,in}$) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (ΣΤ.19). Ο ρυθμός της καθαρής διάβρωσης ($R > 0$) ή της καθαρής απόθεσης ($R < 0$) μπορεί να εκτιμηθεί λύνοντας αριθμητικά τις εξισώσεις (ΣΤ.22), (ΣΤ.23), (ΣΤ.29) και (ΣΤ.30).

(v) **Το Μοντέλο Κατανομής-Προφίλ (μη καλλιεργούμενα εδάφη)**
(**Profile Distribution Model**) για το ^{137}Cs

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs σε αδιατάρακτα εδάφη παρουσιάζει μια καλά ορισμένη εκθετική μείωση με το βάθος, η οποία μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη συνάρτηση (Zhang et al., 1990, Walling and Quine, 1993):

$$A'(x) = A_{ref} \cdot \left(1 - e^{-x/h_0}\right) \quad (\text{ΣΤ.31})$$

όπου:

- $A'(x)$: η παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs πάνω από το βάθος x (Bq m^{-2}),
- A_{ref} : η παραμένουσα απόθεση αναφοράς του ^{137}Cs (Bq m^{-2}),
- x : το κατά μάζα βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (kg m^{-2}),
- h_0 : ο παράγοντας μορφής του προφίλ (kg m^{-2}).

Το Μοντέλο Κατανομής-Προφίλ για μη καλλιεργούμενα εδάφη περιλαμβάνει την παραδοχή ότι η συνολική εναπόθεση του ^{137}Cs στο έδαφος από την ατμόσφαιρα συνέβη το 1963 και ότι η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs στο προφίλ του εδάφους είναι χρονικά ανεξάρτητη.

Εάν A_u είναι η συνολική παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs στο σημείο δειγματοληψίας (Bq m^{-2}) και A_{ref} η τοπική παραμένουσα απόθεση αναφοράς του ^{137}Cs (Bq m^{-2}), τότε:

- Για τοποθεσίες διάβρωσης ($A_u < A_{ref}$), ο ετήσιος ρυθμός απώλειας χόματος Y ($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) είναι:

$$Y = \frac{10}{(t - 1963) \cdot P} \cdot \ln\left(1 - \frac{X}{100}\right) \cdot h_0 \quad (\text{ΣΤ.32})$$

όπου X είναι η εκατοστιαία μείωση της συνολικής παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs :

$$X = \frac{A_{ref} - A_u}{A_{ref}} 100 \% \quad (\Sigma\text{T.33})$$

t : το έτος της δειγματοληψίας (yr),

P : ο συντελεστής διόρθωσης του μεγέθους κόκκων χώματος, για τοποθεσίες διάβρωσης,

h_0 : ο παράγοντας μορφής του προφίλ (kg m^{-2}).

- Για τοποθεσίες απόθεσης ιζημάτων ($A_u < A_{ref}$), μια ενδεικτική εκτίμηση του **ρυθμού απόθεσης ιζημάτων** R' ($\text{kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) μπορεί να προκύψει από την πλεονάζουσα παραμένουσα απόθεση A_{ex} του ^{137}Cs και τη συγκέντρωσή του $C_d(t')$ (Bq kg^{-1}) στο αποτιθέμενο ίζημα κατά το έτος t' :

$$R' = \frac{A_{ex}}{\int_{t_0}^t C_d(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt'} = \frac{A_u - A_{ref}}{\int_S R \cdot dS \cdot \int_S A_{ref} \cdot \left(1 - e^{-R/h_0}\right) \cdot dS} \quad (\Sigma\text{T.34})$$

όπου η ειδική ραδιενέργεια $C_d(t')$ (Bq kg^{-1}) του ^{137}Cs στο αποτιθέμενο ίζημα κατά το έτος t' μπορεί να υπολογιστεί με την ίδια μέθοδο, που χρησιμοποιήθηκε στην εξίσωση (ΣΤ.10).

(vi) Το Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης (μη καλλιεργούμενα εδάφη) (Diffusion and Migration Model) για το ^{137}Cs

Το Μοντέλο Διάχυσης και Μετανάστευσης λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξάρτηση της εναπόθεσης του ^{137}Cs στο έδαφος από την ατμόσφαιρα καθώς επίσης και της προοδευτικής προς τα κάτω κίνησή του μέσα στο έδαφος. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, η ανακατανομή του ^{137}Cs σε μη καλλιεργούμενα εδάφη μπορεί να αντιπροσωπευθεί από ένα μονοδιάστατο μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης, που θα χαρακτηρίζεται από καλά προσδιορισμένες παραμέτρους (συντελεστή διάχυσης και ρυθμό μετανάστευσης). Για παράδειγμα, σε μερικές περιπτώσεις, η κατά βάθος κατανομή του ^{137}Cs σε μη καλλιεργούμενα εδάφη παρουσιάζει μια κορυφή που αντιστοιχεί σε μέγιστη συγκέντρωσή του και βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Σε αυτήν την περίπτωση, η μεταβολή της ειδικής ραδιενέργειας του ^{137}Cs $C_u(t)$ (Bq kg^{-1}) στο επιφανειακό χώμα με το χρόνο t (yr) μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$C_u(t) \approx \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} \cdot e^{-V^2(t-t')/(4D) - \lambda(t-t')} \cdot dt' \quad (\Sigma\text{T.35})$$

όπου:

D : ο συντελεστής διάχυσης ($\text{kg}^2 \text{m}^{-4} \text{yr}^{-1}$),

V : ο ρυθμός της προς τα κάτω μετανάστευσης του ^{137}Cs στο προφίλ του εδάφους ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$).

Εάν A_u είναι η συνολική παραμένουσα απόθεση του ^{137}Cs στο σημείο δειγματοληψίας (Bq m^{-2}) και A_{ref} η τοπική παραμένουσα απόθεση αναφοράς του ^{137}Cs (Bq m^{-2}), τότε:

- Για ένα σημείο που υφίσταται φυλλοειδή διάβρωση ($A_u(t) < A_{ref}$), ο **ρυθμός διάβρωσης** R μπορεί να υπολογιστεί από τη μείωση της παραμένουσας απόθεσης του ^{137}Cs $A_{ls}(t)$ (Bq m^{-2}) και τη συγκέντρωση του ^{137}Cs στην επιφάνεια του εδάφους $C_u(t')$, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\int_0^t P \cdot R \cdot C_u(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt' = A_{ls}(t) \quad (\Sigma\text{T.36})$$

όπου:

$$A_{ls} = A_{ref} - A_u(t) \quad (\Sigma\text{T.37})$$

- Για ένα σημείο απόθεσης ιζημάτων ($A_u(t) > A_{ref}$), ο **ρυθμός απόθεσης ιζημάτων** R' ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) μπορεί να υπολογιστεί από την πλεονάζουσα παραμένουσα απόθεση A_{ex} του ^{137}Cs και τη συγκέντρωσή του $C_d(t')$ (Bq kg^{-1}) στο αποτιθέμενο ίζημα κατά το έτος t' σύμφωνα με τη σχέση:

$$R' = \frac{A_{ex}}{\int_{t_0}^t C_d(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt'} = \frac{A_u - A_{ref}}{\int_{t_0}^t C_d(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt'} \quad (\Sigma\text{T.38})$$

όπου η συγκέντρωση $C_d(t')$ μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$C_d(t') = \frac{1}{\int_S R \cdot dS} \cdot \int_S P' \cdot P \cdot C_u(t') \cdot R \cdot dS \quad (\Sigma\text{T.39})$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Agrafiotis, K., Karfopoulos, K.L., Anagnostakis, M.J., 2011. Calibration of an in-situ BEGe detector using semi-empirical and Monte Carlo techniques. *Applied Radiation and Isotopes* 69, (8), 1151-1155.
- Al-Azmi, D., Sayed, A.M., Yatim, H.A., 2001. Variations in ^7Be concentrations in atmosphere of Kuwait during the period 1994 to 1998. *Applied Radiation and Isotopes* 55, 413-417.
- Aldahan, A., Possnert, G., Vintersved, I., 2001. Atmospheric interactions at northern high latitudes from weekly Be-isotopes in surface air. *Applied Radiation and Isotopes* 54, 345-353.
- Anagnostakis, M.J., 2015. Environmental Radioactivity Measurements and Applications – Difficulties, current status and future trends. *Radiation Physics and Chemistry* 116, 3-7.
- Anagnostakis, M.J. 3rd Hellenic Forum for Science, Technology and Innovation. NCSR “Demokritos”, July 3, 2015.
- 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.
- Arata, L., Meusburger, K., Frenkel, E., b, A’Campo-Neuen, A., Iurian, A.-R., Ketterer, M.E., Mabit, L., Alewell, C., 2016. Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides (MODERN) - Part 1: A new conversion model to derive soil redistribution rates from inventories of fallout radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity* 162-163, 45-55.
- Arata, L., Alewell, C., Frenkel, E., b, A’Campo-Neuen, A., Iurian, A.-R., Ketterer, M.E., Mabit, L., Meusburger, K., 2016. Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides (MODERN) - Part 2: A comparison of different models to convert $^{239+240}\text{Pu}$ inventories into soil redistribution rates at unploughed sites. *Journal of Environmental Radioactivity* 162-163, 97-106.
- Ayub, J.J., et al., 2009. Short-term seasonal variability in ^7Be wet deposition in a semiarid ecosystem of central Argentina. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 977–981.
- Azahra, M., Camacho-Garcia, M.A., Gonzalez-Gomez, C., Lopez-Penalver, J.J., El Bardouni, T., 2003. Seasonal ^7Be concentrations in near-surface air of Granada (Spain) in the period 1993-2001. *Applied Radiation and Isotopes* 59, 159-164.
- Azahra, M., Gonzalez-Gomez, C., Lopez-Penalver, J.J., El Bardouni, T., Camacho Garcia, A., Boukhal, H., El Moussaoui, F., Chakir, E., Erradi, L., Kamili, A., Sakaki, A., 2004a. The seasonal variation of ^7Be and ^{210}Pb concentrations in air. *Radiation Physics and Chemistry* 71, 789-790.
- Azahra, M., Lopez-Penalver, J.J., Camacho-Garcia, M.A., Gonzalez-Gomez, C., El Bardouni, T., Boukhal, H., 2004b. Atmospheric concentrations of ^7Be and ^{210}Pb in Granada, Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 261 (2), 401-405.
- Baskaran, M., 1995. A search for the seasonal variability on the depositional fluxes of ^7Be and ^{210}Pb . *Journal of Geophysical Research* 100, 2833-2840.

- Baskaran, M., 2011. Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210 fallout: a Review. *Journal of Environmental Radioactivity* 102, 500-513.
- Benke, R.R., Kearfott, K.J., 2001. An improved *in situ* method for determining depth distributions of gamma-ray emitting radionuclides, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sect. A* 463, 393–412.
- Benmansour, M, Mabit, L., Nouria, A., Moussadek, R., Bouksirate, H., Duchemin, M., Benkdad, A., 2013. Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. *Journal of Environmental Radioactivity* 115, 97-106.
- Benmansour, M., Mabit, L., Owens, P.N., Tarjan, S., Walling, D.E., 2014. The use of excess ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) as a soil and sediment tracer. IAEA-TECDOC-1741, pp. 79-104, IAEA, Vienna.
- Benmansour, M., Nouria, A., Mabit, L., Bouksirate, H., Moussadek, R., Mrabet, R., Duchemin, M., Zouagui, A., Iaaich, H., 2014. Combined use of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ to assess long term soil redistribution in a small agricultural field in Morocco. IAEA-TECDOC-1741, pp. 149-160, IAEA, Vienna.
- Beks, J.P., Eisma, D., van der Plicht, J., 1998. A record of atmospheric ^{210}Pb deposition in The Netherlands. *Science of the Total Environment* 222, 35-44.
- Blake, W.H., Walling, D.E., He, Q., 1999. Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations. *Applied Radiation and Isotopes* 51, 599–605.
- Błazej, S., Mietelski, J.W., 2014. Cosmogenic ^{22}Na , ^7Be and terrestrial ^{137}Cs , ^{40}K radionuclides in ground level air samples collected weekly in Krakow (Poland) over years 2003–2006. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 300, 747-756.
- Bourcier, L., Masson, O., Laj, P., Pichon, J.M., Paulat, P., Freney, E., Sellegri, K., 2011. Comparative trends and seasonal variation of ^7Be , ^{210}Pb and ^{137}Cs at two altitude sites in the central part of France. *Journal of Environmental Radioactivity* 102 (3), 294-301.
- Bourcier L., Masson O., Laj P., Paulat P., Pichon J.M., Chausse P., Gurriaran R. and Sellegri K., 2014. ^7Be , ^{210}Pb and ^{137}Cs concentrations in cloud water. *Journal of Environmental Radioactivity* 128, 15-19.
- Bourcier L., Sellegri K., Masson O., Zangrado R., Barbante C., Gambaro A., Pichon J-M., Boulon J., Laj P., 2010. Experimental evidence of biomass burning as a source of atmospheric ^{137}Cs , puy de Dome (1465 m asl), France. *Atmospheric Environment* 44, 2280-2286.
- Brost, R.A., Feichter, J., Heimann, M., 1991. Three-dimensional simulation of ^7Be in a global climate Model. *Journal of Geophysical Research* 96, D12, 423-445.
- Caillet, S., Arpagaus, P., Monna, F., Dominik, J., 2001. Factors controlling ^7Be and ^{210}Pb atmospheric deposition as revealed by sampling individual rain events in the region of Geneva, Switzerland. *Journal of Environmental Radioactivity* 53, 241–256.
- Cannizaro, F., Greco, G., Ranelli, M., Spitale, M.C., Tomarchio, E., 1999. Determination of ^{210}Pb concentration in the air ground-level by gamma spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes* 51, 239-245.

- Cannizzaro, F., Greco, G., Ranelli, M., Spitale, M.C., Tomarchio, E., 2004. Concentration measurements of ^7Be at ground level air at Palermo, Italy- comparison with solar activity over a period of 21 years. *Journal of Environmental Radioactivity* 72, 259-271.
- Carvalho, F.P., 1995. Origins and concentrations of ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Bi and ^{210}Po in the surface air at Lisbon, Portugal, at the Atlantic edge of the European continental landmass. *Atmospheric Environment* 29, 1809-1919.
- Ceaglio, E., Meusburger, K., Freppaz, M., Zanini, E., Alewell, C., 2012. Estimation of soil redistribution rates due to snow cover related processes in a mountainous area (Valle d'Aosta, NW Italy). *Hydrology and Earth System Science* 16 (2), 517-528.
- Chao J.H., Chiu Y.J., Lee H.P. and Lee M.C., 2013. Variation of atmospheric ^7Be in relation to PM concentrations. *Applied Radiation and Isotopes* 78, 82–87.
- Chao J.H., Liu C.C., Cho I.C. and Niu H., 2014. Monitoring of ^7Be in surface air of varying PM10 concentrations. *Applied Radiation and Isotopes* 89, 95–101.
- Cigna, A. A., Clemente, G. F. and Giorcelli, F. G., 1970. Cosmogenic and artificial Na-22 levels in rainwater. *Health Physics* 18, 379-382.
- Conaway C.H., Storlazzi C.D., Draut A.E., Swarzenski P.W., 2013. Short-term variability of ^7Be atmospheric deposition and watershed response in a Pacific coastal stream, Monterey Bay, California, USA. *Journal of Environmental Radioactivity* 120, 94-103.
- CRLFFSD, Central Radioanalytical Laboratory of Food and Feed Safety Directorate - Hungarian Agricultural Authority. Radioanalytical Monitoring Network of Ministry of Agriculture and Rural Development, Annual Report (2006).
- De Cort, M., Dubois, G., Fridman, S., Germenchuk, M., Izrael, Y., Janssens, A., Jones, A., Kelly, G., Kvasnikova, E., Matveenko, I., Nazarov, I., Pokumeiko, Y., Sitak, V., Stukin, E., Tabachny, L., Tsaturov, Y., Avdyushin, S., *"Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident"*, EC/CIS collaborative programme of research on the consequences of the Chernobyl NPP accident, 1998. Office for official publications of the European Communities.
- Dlugosz, M., Grabowski, P., Bem, H., 2010. ^{210}Pb and ^{210}Po radionuclides in the urban air of Lodz, Poland. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 283, 719-725.
- Doering, C., Akber, R., 2008. Beryllium-7 in near-surface air and deposition at Brisbane, Australia, *Journal of Environmental Radioactivity* 99, 461–467.
- Duenas, C., Fernandez, M.C., Canete, S., Perez, M., 2009. ^7Be and ^{210}Pb concentration ratio in ground level air in Malaga (36.7°N, 4.5 °W). *Atmospheric Research* 92, 49-57.
- Duenas, C., Fernandez, M.C., Carretero, J., Liger, E., Canete, S., 2003. ^7Be and ^{210}Pb concentrations in air in Malaga (Spain). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 257, 249-253.
- Duenas, C., Fernandez, M.C., Carretero, J., Liger, E., Canete, S., 2005. Deposition velocities and washout ratios on a coastal site (southeastern Spain) calculated from ^7Be and ^{210}Pb measurements. *Atmospheric Environment* 39, 6897-6908.
- Ebaid, Y.Y., Khater, A.E.M., 2006. Determination of ^{210}Pb in environmental samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 270 (3), 609-619.

- Elliott, G. L., Campbell, B. L., Loughran, R. J., 1990. Correlation of erosion measurements and soil caesium-137 content. *International Journal of Radiation and Applied Instrumentation (A) Applied Radiation and Isotopes* 41, 713–717.
- Feely, H. W., Larsen, R. J., Sanderson, C. G., 1989. Factors That Cause Seasonal Variations in Beryllium-7 Concentrations in Surface Air. *Journal of Environmental Radioactivity* 9, 223-249.
- Fogh, C.L., Roed, J., Andersson, K., 1999. Radionuclide re-suspension and mixed deposition at different heights. *Journal of Environmental Radioactivity* 46, 67-75.
- Garcia-Orellana, J., Sanchez-Cabeza, J.A., Masque, P., Avila, A., Costa, E., Loye-Pilot, M.D., Bruach-Menchén, J.M., 2006. Atmospheric fluxes of ^{210}Pb to the western Mediterranean Sea and the Saharan dust influence. *Journal of Geophysical Research* 111, D15305, doi:10.1029/2005JD006660.
- Garland, J.A., Pomeroy, I.R., 1994. Re-suspension of fall-out material following the Chernobyl accident. *Journal of Aerosols Science* 25, 793-806.
- Gerasopoulos, E., Zerefos, C.S., Papastefanou, C., Zanis, P., O'Brien, K., 2003. Low frequency variability of beryllium-7 surface concentrations over the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment* 37, 1745-1756.
- Gerasopoulos, E., Zanis, P., Stohl, A., Zerefos, C.S., Papastefanou, C., Ringerd, W., Toblere, L., Hubener, S., Gaggeler, H.W., Kanterg, H.J., Tositti, L., Sandrini, S., 2001. A climatology of ^7Be at four high-altitude stations at the Alps and the Northern Apennines. *Atmospheric Environment* 35, 6347-6360.
- Golosov, V.N., 2002. Special considerations for areas affected by Chernobyl fallout. In: Zapata (ed), pp.165-183.
- Gourdin, E., Evrard, O., Huon, S., Reyss, J.-L., O. Ribolzi, Bariac, T., Sengtaheuanghong, O., S. Ayrault, S., 2014. Spatial and temporal variability of ^7Be and ^{210}Pb wet deposition during four successive monsoon storms in a catchment of northern Laos. *Journal of Environmental Radioactivity* 136, 195-205.
- Grundel, M., Porstendorfer, J., 2004. Difference between the activity size distributions of the different natural radionuclide aerosols in outdoor air. *Atmospheric Environment* 38, 3723-3728.
- Hasebe, N., Doke, T., Kikuchi, J. and Takeuchi, Y., 1981. Observation of fallout rates of atmospheric ^7Be and ^{22}Na produced by cosmic rays--concerning estimation of the fallout rate of atmospheric ^{26}Al . *Journal of Geophysical Research* 86, 520-524.
- He, Q., Walling, D.E., 1996. Interpreting particle size effects in the adsorption of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb by mineral soils and sediments. *Journal of Environmental Radioactivity* 30 (2), 117-137
- He, Q., Walling, D.E., 1997. The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils. *Applied Radiation Isotopes* 48, 677–690.
- He, Q., Walling, D.E., 2000. Calibration of a field-portable gamma detector to obtain in situ measurements of the ^{137}Cs inventories of cultivated soils and floodplain sediments. *Applied Radiation Isotopes* 52, 865–872.

- He, Q., Walling, D.E. and Wallbrink, P.J., 2002. Alternative methods and radionuclides for use in soil-erosion and sedimentation investigations. In: Zapata (ed), pp. 185-215.
- Heikkila, U., Beer, J., Alfimov, V., 2008. Beryllium-10 and beryllium-7 in precipitation in Dubendorf (440 m) and at Jungfrauoch (3580 m), Switzerland (1998–2005). *Journal of Geophysical Research* 113, D11104, doi:10.1029/2007JD009160.
- Hernandez-Ceballos, M.A., Brattich, E., Cinelli, G., Ajtic, J., Djurdjevic, V., 2016. Seasonality of ^7Be concentrations in Europe and influence of tropopause height. *Tellus B*, 68, 29534, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v68.29534>
- Hernandez-Ceballos, M.A., Cinelli, G., Marín Ferrer, M., Tollefsen, T., De Felice, L., Nweke, E., Tognoli, P.V., Vanzo, S., De Cort, M., 2015. A climatology of ^7Be in surface air in European Union. *Journal of Environmental Radioactivity* 141, 62-70.
- Higgitt, D.L., 1995. The development and application of Caesium-137 measurements in erosion investigations. *Sediment and Water Quality in River Catchments* (FOSTER, I., GURNELL, A., WEBB, B., Eds). John Wiley & Sons, Chichester, 287-305.
- Hoffman, I., 2016. Creation of a ^{22}Na and ^7Be Global Data Set for Use as an Atmospheric Tracer and Radiochronometer. A Thesis Submitted to the Division of Graduate Studies of the Royal Military College of Canada in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- Hotzl, H., and Winkler, R., 1987. Activity Concentrations of ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{40}K and ^7Be and their Temporal Variations in Surface Air. *Journal of Environmental Radioactivity* 5, 445-458.
- Hou, X., Roos, P., 2008. Critical comparison of radiometric and mass spectrometric methods for the determination of radionuclides in environmental, biological and nuclear waste samples (Review article). *Analytica Chimica Acta* 608, 105-139.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2014. Guidelines for using fallout radionuclides to assess erosion and effectiveness of soil conservation strategies. IAEA-TECDOC-1741, IAEA, Vienna.
- Ioannidou, A., 2011. Activity size distribution of ^7Be in association with trace metals in the urban area of the city of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment* 45 (6), 1286-1290.
- Ioannidou A., 2012. ^7Be aerosols and their deposition on the sea: a possible method to estimate trace metals deposition on the sea. *Journal of Environmental Radioactivity* 108, 29-32.
- Ioannidou, A., Manolopoulou, M., Papastefanou, C., 2005. Temporal changes of ^7Be and ^{210}Pb concentration in surface air at temperate latitudes (40°N). *Applied Radiation and Isotopes* 63, 277-284.
- Ioannidou, A., Papastefanou, C., 2006. Precipitation scavenging of ^7Be and ^{137}Cs radionuclides in air. *Journal of Environmental Radioactivity* 85, 121–136.
- Ioannidou, A., Vasileiadis, A., Melas, D., 2014. Time lag between the tropopause height and ^7Be activity concentrations on surface air. *Journal of Environmental Radioactivity* 129, 80-85.

- Ishikawa, Y., Murakami, H., Sekine, T., Yoshihara, K., 1995. Precipitation scavenging studies of radionuclides in air using cosmogenic ^7Be . *Journal of Environmental Radioactivity* 26, 19-36.
- Iurian, A.R., Mabit, L., Begy, R., Cosma, C., 2013. Comparative assessment of erosion and deposition rates on cultivated land in the Transylvanian plain of Romania using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. *Journal of Environmental Radioactivity* 125, 40-49.
- Iurian, A., Mabit, L., Cosma, C., 2014. Uncertainty related to input parameters of ^{137}Cs soil redistribution model for undisturbed fields. *Journal of Environmental Radioactivity* 136, 112–120.
- Jasiulionis, R., Wershofen, H., 2005. A study of the vertical diffusion of the cosmogenic radionuclides, ^7Be and ^{22}Na in the atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity* 79, 157–169.
- Jia, G., Jia, J., 2012. Determination of radium isotopes in environmental samples by gamma spectrometry, liquid scintillation counting and alpha spectrometry: a review of analytical methodology. *Journal of Environmental Radioactivity* 106, 98-119.
- Jordan, C.E., Dibb, J.E., Finkel, R.C., 2003. $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ tracer of atmospheric transport and stratosphere-troposphere exchange. *Journal of Geophysical Research* 108 (D8), 4234, doi:10.1029/2002JD002395.
- Jungck, M.H.A., Andrey, J.-L., Froidevaux, P., 2009. Determination of radionuclide levels in rainwater using ion exchange resin and γ -spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 361–365
- Koch, D.M., Jacob, D.J., Graustein, W.C., 1996. Vertical transport of tropospheric aerosols as indicated by ^7Be and ^{210}Pb in a chemical tracer model. *Journal of Geophysical Research* 101 (D13), 18651-18666.
- Koch, D., and Rind, D., 1998. Beryllium 10 / beryllium 7 as a tracer of stratospheric transport. *Journal of Geophysical Research* 103 (D4), 3907-3917.
- Komura, K., Kuwahara, Y., Abe, T., Tanaka, K., Murata, Y., Inoue, M., 2007. Measurements of short-lived cosmic-ray-produced radionuclides in rainwater. *Journal of Environmental Radioactivity* 96, 103-109.
- Kulan, A., 2006. Seasonal ^7Be and ^{137}Cs Activities in Surface Air before and after the Chernobyl Event. *Journal of Environmental Radioactivity* 90 (2), 140-150.
- Lal, D., Malhotra, P. K., Peters, B., 1958. On the Production of Radioisotopes in the Atmosphere by Cosmic Radiation and Their Application to Meteorology. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 12, 306-328
- Lal, D., Peters, B., 1967. Cosmic ray produced radioactivity on the Earth. In: *Handbuch der Physik B XLVI*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, pp. 551–612.
- Lariviere, D., Taylor, V.F., Evans, R.D., Cornett, R.J., 2006. Radionuclide determination in environmental samples by inductively coupled plasma mass spectrometry (Review). *Spectrochimica Acta Part B* 61, 877-904

- Leppanen, A.-P., Usoskin, I.G., Kovaltsov, G.A., Paatero, J., 2012. Cosmogenic ^7Be and ^{22}Na in Finland: Production, observed periodicities and the connection to climatic phenomena. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 74, 164–180.
- Li, J., Li, Y., Wang, Y., Wu, J., 2010. Applicability of using in-situ gamma-ray spectrometry technique for ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ inventories measurement in grassland environments. *Applied Radiation and Isotopes* 68,1143–1149.
- Likuku, A.S., 2006. Factors influencing ambient concentrations of ^{210}Pb and ^7Be over the city of Edinburgh (55.9 N, 03.2 W). *Journal of Environmental Radioactivity* 87, 289-304.
- Lohaiza, F., Velasco, H., Ayub, J., Rizzotto, M., Di Gregorio, D.E., Huck, H., Valladares D.L., 2014. Annual variation of ^7Be soil inventory in a semiarid region of central Argentina. *Journal of Environmental Radioactivity* 130, 72-77.
- Loughran, R.J., Balog, R.M., 2006. Re-sampling for soil-caesium-137 to assess soil losses after a 19-year interval in a Hunter Valley vineyard, New South Wales, Australia. *Geographical Research* 44 (1), 77-86.
- Loughran, R. J., Campbell, B. L., 1995. The identification of catchment sediment sources. In I. D. L. Foster, A. M. Gurnell and B.W. Webb (Eds.), *Sediment and water quality in river catchments* (pp. 189–205). Chichester: Wiley.
- Loughran, R.J., Wallbrink, P.J., Walling, D.E., Appleby, P.G., 2002. Sampling Methods. In: Zapata (ed), pp. 41-57.
- Mabit, L., Benmansour, M., Blake, W.H., Taylor, A., Tarján, S., Toloza, A., Walling, D.E., 2014. The use of ^7Be as a short term soil redistribution tracer. IAEA-TECDOC-1741, pp. 105-124, IAEA, Vienna.
- Mabit, L., Benmansour, M., Dercon, G., Walling, D.E., 2014. Use of ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^7Be for documenting soil redistribution: The future. IAEA-TECDOC-1741, pp. 203-208, IAEA, Vienna.
- Mabit, L., Benmansour, M., Walling, D.E., 2008. Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^7Be for assessing soil erosion and sedimentation. *Journal of Environmental Radioactivity* 99, 1799–1807.
- Mabit, L., Bernard, C., Laverdiere, M.R., 2002. Quantification of soil redistribution and sediment budget in a Canadian watershed from fallout caesium-137 (^{137}Cs) data. *Canadian Journal of Soil Science* 82, 423-431.
- Mabit, L., Bernard, C., Laverdiere, M.R., 2007. Assessment of erosion in the Boyer River watershed (Canada) using a GIS oriented sampling strategy and ^{137}Cs measurements. *Catena* 71 (2), 242-249.
- Mabit, L., Bernard, C., Makhlof, M., Laverdiere, M.R., 2008b. Spatial variability of erosion and soil organic matter content estimated from ^{137}Cs measurements and geostatistics. *Geoderma* 145 (3-4), 245-251.
- Mabit, L., Chhem-Kieth, S., Dornhofer, P., Toloza, A., Benmansour, M., Bernard, C., Fulajtar, E., Walling, D.E., 2014. ^{137}Cs : A widely used and validated medium term soil tracer. IAEA-TECDOC-1741, pp. 27-77, IAEA, Vienna.

- Mabit, L., Toloza, A., Nirschl, A., 2008a. Development of a Fine Soil Increment Collector (FSIC) to solve the main limitation of the use of ^7Be as soil tracer. IAEA Soils Newsletter. 30 (2), 21–22.
- Mabit, L., Zapata, F., Dercon, G., Benmansour, M., Bernard, C., Walling, D.E., 2014. Assessment of soil erosion and sedimentation: The role of fallout radionuclides. IAEA-TECDOC-1741, pp. 3-26, IAEA, Vienna.
- Matisoff, G., 2014. ^{210}Pb as a tracer of soil erosion, sediment source area identification and particle transport in the terrestrial environment. Journal of Environmental Radioactivity 138, 343–354.
- Matisoff, G., Ketterer, M.E., Rosén, K., Mietelski, J.W., Vitko, L.F., Persson, H., Lokas, E., 2011. Downward migration of Chernobyl-derived radionuclides in soils in Poland and Sweden. Applied Geochemistry 26, 105-115.
- McHargue, L.R., and Damon, P.E., 1991. The Global Beryllium 10 Cycle. Reviews of Geophysics 29 (2), 141-158.
- McNeary, D., Baskaran, M., 2003. Depositional characteristics of ^7Be and ^{210}Pb in southeastern Michigan. Journal of Geophysical Research 108 (D7), 4210, doi:10.1029/2002JD003021.
- Monaghan, M.C., 1989. Lead-210 in surface and soils from California: implications for the behaviour of trace constituents in the planetary boundary layer. Journal of Geophysical Research 94 (D5), 6449-6456.
- Murat Sac, M., Ichedef, M., 2015. Application of ^{137}Cs technique for evaluation of erosion and deposition rates within cultivated fields of Salihli region, Western Turkey. Journal of Radiation Research and Applied Sciences 8, 477-482.
- Navas, A., Walling, D.E., Gaspar, L., Machin, J., 2008. Use of Beryllium-7 to assess soil redistribution by erosion in two contrasting Mediterranean environments. Sediment Dynamics in Changing Environments (Proceedings of a symposium held in Christchurch, New Zealand, December 2008). IAHS Publ. 325.
- Paatero, J., Hatakka, J., Mattsson, R., Viisanen, Y., 1998. Analysis of daily ^{210}Pb air concentrations in Finland, 1967-1996. Radiation Protection Dosimetry 77 (3), 191-198.
- Paatero, J., Hatakka, J., Holmen, K., Eneroth, K., Viisanen, Y., 2003. Lead-210 concentration in the air at Mt. Zeppelin, Ny-Alesund, Svalbard. Physics and Chemistry of the Earth 28, 1175-1180.
- Papandreou S., Savva M.S., Karfopoulos K.L., Karangelos D.J., Anagnostakis M.J., Simopoulos S.E., 2011. Monitoring of ^7Be atmospheric activity concentration using short term measurements. Nuclear Technology & Radiation Protection 26(2), 101-109.
- Papastefanou, C., 2006a. Residence time of tropospheric aerosols in association with radioactive nuclides. Applied Radiation and Isotopes 64, 93-100.
- Papastefanou, C., 2006b. Radioactive nuclides as tracers of environmental processes. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 267 (2), 315-320.

- Papastefanou, C., Ioannidou, A., 1995. Aerodynamic size association of ^7Be in ambient aerosols. *Journal of Environmental Radioactivity* 26, 273-282.
- Papastefanou, C., Ioannidou, A., 2004. Beryllium-7 and solar activity. *Applied Radiation and Isotopes* 61, 1493-1495.
- Papastefanou, C., Manolopoulou, M., Stoulos, S., Ioannidou, A., 1995. Atmospheric deposition of cosmogenic ^7Be and ^{137}Cs from fallout of the Chernobyl accident. *The Science of the Total Environment* 170, 151-156.
- Pennock, D.J., Appleby P.G., 2002. Site selection and sampling design. In: Zapata (ed), pp. 15-40.
- Pennock, D.J., Appleby P.G., 2002. Sample Processing. In: Zapata (ed), pp.59-65.
- Petropoulos, N., Anagnostakis, M., Hinis, E., Simopoulos, S., 2001. Geographical mapping and associated fractal analysis of the long-lived Chernobyl fallout radionuclides in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity* 53, 59-66.
- Petropoulos, N.P., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E., 1996. ^{137}Cs Chernobyl fallout in Greece and its associated radiological impact. *Environment International*, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S369-S373.
- Pham, M.K., Betti, M., Nies, H., Povinec, P.P., 2011. Temporal changes of ^7Be , ^{137}Cs , and ^{210}Pb activity concentrations in surface air at Monaco and their correlation with meteorological parameters. *Journal of Environmental Radioactivity* 102 (11), 1045-1054.
- Pham, M.K., Chamizo, E., Mas Balbuena, J.L., Miquel, J.C., Martin, J., Osvath I., Povinec, P.P., 2017. Impact of Saharan dust events on radionuclide levels in Monaco air and in the water column of the northwest Mediterranean Sea. *Journal of Environmental Radioactivity* 166, 2-9.
- Pham, M.K., La Rosa, J.J., Lee, S.-H., Oregioni, B., Povinec, P.P., 2005. Deposition of Saharan dust in Monaco rain 2001-2002: radionuclides and elementary composition. *Physica Scripta* T118, 14-17.
- Pham, Z.H., Nguyen, T.B., Truong, Y., Vuong, T.B., Nguyen, T.N., 1994. Variations of caesium isotope concentrations in air and fallout at Dalat, South Vietnam, 1986-91. *Journal of Environmental Radioactivity* 22, 55.
- Pham, M.K., Povinec, P.P., Nies, H., Betti, M., 2013. Dry and wet deposition of ^7Be , ^{210}Pb and ^{137}Cs in Monaco air during 1998-2010: Seasonal variations of depositional fluxes. *Journal of Environmental Radioactivity* 120, 45-47.
- Porto, P., Walling, D. E., 2012. Validating the use of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements to estimate rates of soil loss from cultivated land in southern Italy. *Journal of Environmental Radioactivity* 106, 47-57.
- Porto, P., Walling, D. E., Alewell, C., Callegari, G., Mabit, L., Mallimo, N., Meusburger, K., Zehringer, M., 2014. Use of a ^{137}Cs re-sampling technique to investigate temporal changes in soil erosion and sediment mobilisation for a small forested catchment in southern Italy. *Journal of Environmental Radioactivity* 138, 137-148.

- Porto, P., Walling, D. E., Callegari, G., 2004. Validating the use of caesium-137 measurements to estimate erosion rates in three small catchments in southern Italy. In V. Golosov, V. Belyaev, & D. E. Walling (Eds.), *Sediment Transfer through the Fluvial System* (Proceedings of a symposium held in Moscow, August 2004) International Association of Hydrological Sciences Publication 288 (pp. 75–83). Wallingford, UK: IAHS.
- Porto, P., Walling, D. E., Callegari, G., Catona, F., 2006. Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion in three small catchments in Southern Italy. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 6, 657-667.
- Porto, P., Walling, D. E., Ferro, V., 2001. Validating the use of caesium-137 measurements to estimate soil erosion rates in a small drainage basin in Calabria, Southern Italy. *Journal of Hydrology* 248, 93-108.
- Porto, P., Walling, D. E., Ferro, V., Di Stefano, C., 2003. Validating erosion rate estimates provided by caesium-137 measurements for two small forested catchments in Calabria, Southern Italy. *Land Degradation and Development* 14, 389–408.
- Quine, T.A., Walling, D.E., 1991. Rates of soil erosion on arable fields in Britain: quantitative data from caesium-137 measurements. *Soil Use Management* 7, 169-176.
- Rastogi, N., Sarin, M.M., 2008. Atmospheric Pb-210 and Be-7 in ambient aerosols over low- and high-altitude sites in semiarid region: Temporal variability and transport processes. *Journal of Geophysical Research* 113 (D11), D11103.
- Rehfeld, S., and Heimann, M., 1995. Three dimensional atmospheric transport simulation of the radioactive tracers ^{210}Pb , ^7Be , ^{10}Be , and ^{90}Sr . *Journal of Geophysical Research* 100 (D12), 141-161.
- Ritchie, J.C., McHenry, J.R., 1973. Determination of fallout Cs-137 and natural gamma-ray emitting radionuclides in sediments. *Applied Radiation and Isotopes* 24, 575–578.
- Ritchie, J.C., McHenry, J.R., 1975. Fallout Cs-137: a tool in conservation research. *Journal of Soil and Water Conservation* 30, 283-286.
- Robbins, R.A., 1978. Geochemical and geophysical application of radioactive lead. In: Nriagu, J.O. (Ed.). *The Biogeochemistry of Lead in the Environment*. Elsevier, Amsterdam, pp. 286-383.
- Rodel, W., 1965. Cosmic-ray-produced and artificial sodium-22 in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research* 70, 4447-4452.
- Rosner, G., Hötzl, H., Winkler, R., 1996. Continuous wet-only and dry-only deposition measurements of ^{137}Cs and ^7Be : an indicator of their origin. *Applied Radiation and Isotopes* 47, 1135-1139.
- Schuler, C., Wieland, E., Santschi, P.H., Sturm, M., Lueck, A., Bollhalder, S., Beer, J., Bonani, G., Hofmann, H.J., Suter, M., Wolfli, A., 1991. A multi-tracer study of radionuclides in Lake Zurich, Switzerland, I, Comparison of atmospheric and sedimentary fluxes of ^7Be , ^{10}Be , ^{210}Pb , ^{210}Po , and ^{137}Cs . *Journal of Geophysical Research* 96, 17051-17065.

- Schuller, P., Iroume, A., Walling, D.E., Mancilla, B., Castillo, A., Trumper, R.E., 2006. Use of beryllium-7 to document soil redistribution following forest harvest operations. *Journal of Environmental Quality* 35, 1756-1763.
- Schuller, P., Walling, D.E., Sepulveda, A., Castillo, A., Pino I., 2007. Changes in soil erosion associated with the shift from conventional tillage to a no-tillage system, documented using ^{137}Cs measurements. *Soil and Tillage Research* 94 (1), 183-192.
- Sepulveda, A., Schuller, P., Walling, D.E., Castillo, A., 2008. Use of ^7Be to document soil erosion associated with a short period of extreme rainfall. *Journal of Environmental Radioactivity* 99, 35-49.
- Short, D.B., Appleby, P.G., Hilton, J., 2007. Measurement of atmospheric fluxes of radionuclides at a UK site using both direct (rain) and indirect (soils) methods. *International Journal of Environment and Pollution*. Vol. x, No. x, pp.xxx-xxx.
DOI: 10.1504/IJEP.2007.014226
- Simon, J., Meresova, J., Sykora, I., Jeskovsky, M., Holy, K., 2009. Modelling of temporal variations of vertical concentration profile of ^7Be in the atmosphere. *Atmospheric Environment* 43, 2000-2004.
- Simopoulos, S., 1989. Soil sampling and ^{137}Cs Analysis of the Chernobyl Fallout in Greece. *Applied Radiation and Isotopes* 40 (7), 607-613.
- Steinmann, P., Zeller, M., Beuret, p., Ferreri, g., Estier, S., 2013. Cosmogenic ^7Be and ^{22}Na in ground level air in Switzerland (1994-2011). *Journal of Environmental Radioactivity* 124, 68-73.
- Sutherland, R. A., 1994. Spatial variability of and the influence of Cs sampling on estimates of sediment redistribution. *Catena* 21, 57-71.
- Taylor, A., Keith-Roach, M.J., Iurian, A.R., Mabit, L., Blake, W.H., 2016. Temporal variability of beryllium-7 fallout in southwest UK, *Journal of Environmental Radioactivity* 160, 80-86.
- Theocharopoulos, S. P., Florou, H., Kritidis, P., Belis, D., Tsouloucha, F., Christou, M., Kouloumbis, P., Nikolaou, T., 2000. Use of ^{137}Cs isotope technique in soil erosion studies in central Greece. *Acta Geologica Hispanica* 35, 301-310.
- Theocharopoulos, S.P., Florou, E., Walling, D.E., Kalantzakos, H., Christou, M., Tountas, P., Nikolaou, T., 2003. Soil erosion and deposition rates in a cultivated catchment area in central Greece, estimated using the ^{137}Cs technique. *Soil and Tillage Research* 69, 153-162.
- Todd, J.F., Wong, G.T.F., Olsen, C.R., Larsen, I.L., 1989. Atmospheric depositional characteristics of Beryllium-7 and Lead-210 along the south-eastern Virginia coast. *Journal of Geophysical Research* 94, 11106-11116.
- Todorovic, D., Popovic, D., Djuric, G., 1999. Concentration measurements of ^7Be and ^{137}Cs in ground level air in Belgrade area. *Environment International* 25, 59-66.
- Todorovic, D., Popovic, D., Djuric, G., Radenkovic, M., 2000. ^{210}Pb in ground-air in Belgrade city area. *Atmospheric Environment* 34, 3245-3248.

- Todorovic, D., Popovic, D., Djuric, G., Radenkovic, M., 2005. ^7Be to ^{210}Pb concentration ratio in ground level air in Belgrade area. *Journal of Environmental Radioactivity* 79, 297-307.
- Tokuyama, H., and Igarashi, S., 1998. Seasonal Variation in the Environmental Background Level of Cosmic-Ray-Produced ^{22}Na at Fukui City, Japan. *Journal of Environmental Radioactivity* 38 (2), 147-161.
- Turekian, K.Y., Nozaki, Y., Benninger, L.K., 1977. Geochemistry of atmospheric radon and radon products. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 5, 227-255.
- Valles, I., Camacho, A., Ortega, X., Serrano, I., Blázquez, S., Pérez, S., 2009. Natural and anthropogenic radionuclides in airborne particulate samples collected in Barcelona (Spain). *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 102-107.
- Vecchi, R., Marcazzan, Valli, G., 2005. Seasonal variation of ^{210}Pb activity concentration in outdoor air of Milan (Italy). *Journal of Environmental Radioactivity* 82, 251-266.
- Villa, M., Hutardo, S., Manjon, G., Garcia-Tenorio, R., 2007. Calibration and measurements of ^{210}Pb using two independent techniques. *Radiation Measurements*. 42, 1552–1560.
- Wallbrink, P.J., Murray, A.S., 1994. Fallout of ^7Be in South Eastern Australia. *Journal of Environmental Radioactivity* 25, 213–228.
- Walling, D.E., 2003. Using environmental radionuclides as tracers in sediment budget investigations, *Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances (Proceedings of the Oslo Workshop, June 2002)*. IAHS Publ. 283.
- Walling, D.E., Collins, A.L., Jones, P.A., Leeks, G.J.L., Old, G., 2006. Establishing finegrained sediment budgets for the Pang and Lambourn LOCAR catchments, UK. *Journal of Hydrology* 330 (1-2), 126–141.
- Walling, D.E., Collins, A.L., 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.
- Walling, D.E., He, Q., 1992. Interpretation of caesium-137 profiles in lacustrine and other sediments: the role of catchment-derived inputs. *Hydrobiologia* 235/236, 219-230.
- Walling, D.E., He, Q., 1993. Towards improved interpretation of caesium-137 profile in lake sediments. In J. McManus and R. Duck (Eds.). *Geomorphology and sedimentology of lakes and reservoirs*, pp. 31–53. Chichester: Wiley.
- Walling, D.E., He, Q., 1999a. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality* 28, 611–622.
- Walling, D.E., He, Q., 1999b. Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land. *Soil Science Society of America Journal* 63, 1404-1412.
- Walling, D.E., He, Q., 2000. The global distribution of bomb-derived ^{137}Cs reference inventories. Final Report IAEA Technical Contract 10361/RO-R1.
- Walling, D.E., He, Q., Appleby, P.G., 2002. Conversion models for use in soil-erosion, soil-redistribution and sedimentation investigations. In: Zapata (ed), pp.111-162.

- Walling, D. E., He, Q., Blake, W., 1999. Use of ^{137}Cs and ^7Be measurements to document short- and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land. *Water Resources Research* 35, 3865–3874.
- Walling, D.E., He, Q., Zhang, Y., 2014. Conversion models and related software. IAEA-TECDOC-1741, pp. 125-148, IAEA, Vienna.
- Walling, D. E., Quine, T. A., 1990. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degradation and Rehabilitation* 2, 161–175.
- 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. UK Overseas Development Administration Research Scheme R4579, 208p.
- Wilson, C.G., Matisoff, G., Whiting P.J., 2003. Short-term erosion rates from a ^7Be inventory balance. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 967-977.
- Winkler, R., Rosner, G., 2000. Seasonal and long-term variation of ^{210}Pb concentration in air, atmospheric deposition rate and total deposition velocity in south Germany. *The Science of the Total Environment* 263, 57-68.
- Yamamoto, M., Sakaguchi, A., Sasaki, K., Hirose, K., Igarashi, Y., 2006. Seasonal and spatial variation of atmospheric ^{210}Pb and ^7Be deposition: features of the Japan Sea side of Japan. *Journal of Environmental Radioactivity* 86 (1), 110-131.
- Yin, C., Ji, H., 2015. A ^{137}Cs erosion model with moving boundary. *Journal of Environmental Radioactivity* 150, 152-158.
- Yoshimori, M., 2005. Cosmogenic ^7Be Radionuclide Produced in Upper Atmosphere by Galactic Cosmic Rays and Solar Energetic Particles. 29th International Cosmic Ray Conference. Pune, India, 00, 101-104.
- Yoshimori, M., 2005a. Beryllium 7 radionuclide as a tracer of vertical air mass transport in the troposphere. *Advances in Space Research* 36, 828-832.
- Yoshimori, M., 2005b. Production and behavior of beryllium 7 radionuclide in the upper atmosphere. *Advances in Space Research* 36, 922-926.
- Young, J. A., Tanner, T. M., Thomas, C. W., Wogman, N. A., Petersen, M. R., 1975. Concentrations and Rates of Removal of Contaminants from the Atmosphere in and Downwind of St Louis. Pacific Northwest Laboratory Annual Report for 1974 to the USAEC Division of Biomedical and Environmental Research, Part 3, Atmospheric Sciences, pp. 70-76.
- Yu, K. N., Lee, L.Y.L., 2002. Measurements of atmospheric ^7Be properties using high-efficiency gamma spectroscopy. *Applied Radiation and Isotopes* 57, 941-946.
- Zanis, P., Gerasopoulos, E., Priller, A., C. Schnabel, C., A. Stohl, A., Zerefos, C., H.W. Gaggeler, H.W., L. Tobler, L., Kubik, P.W., Kanter, H.J., Scheel, H.E., Luterbacher, J., Berger, M., 2003. An estimate of the impact of stratosphere-to-troposphere transport (STT) on the lower free tropospheric ozone over the Alps using ^{10}Be and ^7Be measurements. *Journal of Geophysical Research* 108, D12, 8520, doi:10.1029/2002JD002604.

- Zapata, F. (Ed.), 2002. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation using Environmental Radionuclides. Kluwer Ac. Publ., Dordrecht. The Netherlands, 219 p.
- 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.
- Zhang, Y., Long, Y., An J., Yu, X., Wang X., 2014. Spatial patterns of ^{137}Cs inventories and soil erosion from earthbanked terraces in the Yimeng Mountains, China. Journal of Environmental Radioactivity 136, 1-9.
- Zhang, X.B., Walling, D.E., He, Q., 1999. Simplified mass balance models for assessing soil erosion rates on cultivated land using caesium-137 measurements. Hydrological Science Journal 44, 33-45.
- Zhang, W., Yi, J., Mekarski, P., Hoffman, I., Ungar, K., Leppanen, A.-P., 2011. A system for low-level the cosmogenic ^{22}Na radionuclide measurement by gamma-gamma coincidence method using BGO detectors. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 287, 551-555.
- Zhang, W., Ungar, K., Stukel, M., Mekarski, P., 2014. A gamma-gamma coincidence / anticoincidence spectrometer for low-level cosmogenic $^{22}\text{Na}/^7\text{Be}$ activity ratio measurement. Journal of Environmental Radioactivity 130, 1-6.
- Zhu, J., Olsen, C.R., 2009. Beryllium-7 atmospheric deposition and sediment inventories in the Neponset River estuary, Massachusetts, USA. Journal of Environmental Radioactivity 100, 192-197.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αγραφιώτης, Κ., 2009. Βαθμονόμηση απόδοσης φορητού ανιχνευτή (in-situ) BEGe στην ενεργειακή περιοχή 59-1596keV για γεωμετρία επιφανειακής πηγής ραδιενέργειας, με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte-Carlo. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Αναγνωστάκης, Μ.Ι. Διαφάνειες του μαθήματος «Ραδιοπεριβαλλοντική Ανάλυση και Προστασία». Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Ζαχιώτης, Α., 2013. Μετρήσεις ραδιενεργού ατμοσφαιρικού αεροζόλ με χρήση αδρανειακών συλλεκτών. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Ιωαννίδου, Α.Α., 1995. Βηρύλλιο-7: Ένα κοσμογενετικό ραδιονουκλίδιο στην χαμηλή ατμόσφαιρα. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής.
- Καράγγελος, Δ.Ι., 2008. Ραδιοπεριβαλλοντική και συνακόλουθες εφαρμογές. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Καρφόπουλος, Κ.Λ., 2012. Ανάπτυξη και εφαρμογή μετρητικών τεχνικών για την ανάλυση της φυσικής και τεχνολογικά επαγόμενης ραδιενέργειας σε οικοσυστήματα. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.

- Μπασιάς, Κ.Ε, 2013. Μετρήσεις της συγκέντρωσης του ισοτόπου κοσμικής προέλευσης ^7Be στο αεροζόλ της ατμόσφαιρας και στο νερό της βροχής. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Παλαμάρα, Ε., 2010. Διερεύνηση της επίδρασης της μεθοδολογίας προετοιμασίας δειγμάτων χώματος στον προσδιορισμό της φυσικής και τεχνητής τους ραδιενέργειας. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Παπαδάκος, Γ.Ν., 2012. Στοχαστικές διαδικασίες και συνακόλουθες ποσοτικές και ποιοτικές εκτιμήσεις ραδιοπεριβαλλοντικών επιπτώσεων σε πληθυσμιακές ομάδες στον ελληνικό χώρο. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Παπαδάκος, Γ.Ν., Καράγγελος, Δ.Ι., Πετρόπουλος, Ν.Π., Χίνης, Ε.Π., Αναγνωστάκης, Μ.Ι., Σιμόπουλος, Σ.Ε., ΕΜΠ. Αβεβαιότητα στην εκτίμηση της παραμένουσας ραδιενέργειας ^{137}Cs στο έδαφος μετά από απόθεση λόγω πυρηνικού ατυχήματος. 5^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014.
- Παπαστεφάνου, Κ.Φ., 2010. Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, ISBN978-960-456-198-8.
- Πέππας, Θ. 2008. Εγκατάσταση και παραμετρική μελέτη διάταξης ανάλυσης κοκκομετρίας - εφαρμογή στην κοκκομετρική ανάλυση και τον προσδιορισμό των ραδιολογικών χαρακτηριστικών των διαφόρων κλασμάτων ιταμένης τέφρας. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Πετροβίτσος, Ε., 2011. Εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης επιφανειακών εδαφών με χρήση φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Ρούνη, Π.Κ., 2008. Ανίχνευση ιχνοστοιχείων σε δείγματα περιβαλλοντικής σημασίας με χρήση μεθόδων πυρηνικής τεχνολογίας. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Σάββα, Μ.Ι., 2009. Βαθμονόμηση ανιχνευτικής διάταξης γερμανίου για τον προσδιορισμό του ισοτόπου ^7Be στα ατμοσφαιρικά αερολύματα με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Χαβιάρας, Δ., 2015. Παραμετρική μελέτη της Γεωμετρίας δείγματος για την ανίχνευση ^{210}Pb σε δείγματα χώματος μικρού όγκου. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.

Πρόσθετη βιβλιογραφία

- Βαρδουλάκης, Ι., 2004. Τα Φυσικά Χαρακτηριστικά των Εδαφών. Σημειώσεις Εδαφομηχανικής. Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών ΕΜΠ, Τομέας Μηχανικής.

- Κελεπερτζής, Ε. Διεργασίες στην κρίσιμη ζώνη – Γεωχημεία εδαφών. Σχολή Θετικών Επιστημών ΕΚΠΑ, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Οικονομικής Γεωλογίας και Γεωχημείας.
- Μελάς, Δ., 2012. Σημειώσεις για το μάθημα: Ατμοσφαιρική Διάχυση και Διασπορά. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας.
- Μετεωρολογική Υπηρεσία, 2011. Στοιχεία Μετεωρολογίας.
- Μπάης, Α., Μπαλής, Δ., Τουρπάλη, Κ., 2011. Σημειώσεις για το μάθημα: Φυσική της Ατμόσφαιρας. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας.
- Πνευματικός, Ι., 2003. Διαφάνειες για το μάθημα: Μετεωρολογία. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Μετεωρολογίας.
- Πρέκα - Παπαδήμα Π., Δανέζης, Μ., Θεοδοσίου, Σ., Καργιολάκη, Δ., 2009. Στα μονοπάτια του ήλιου – Εισαγωγή στην ηλιακή φυσική. Εκδόσεις Δίαυλος, 330 σελ.
- Στάθης, Δ., 2015. Μαθήματα Δασικής Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.
- Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός «Δήμητρα». «Αειφόρες στρατηγικές για τη βελτίωση σοβαρά υποβαθμισμένων περιοχών».
- Φυτιάνος, Κ., Σαμαρά-Κωνσταντίνου Κ., 2009. Χημεία περιβάλλοντος. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Cao, J., Chow, J. C., Lee, F. S. C., Watson, G., 2013. Evolution of PM_{2.5} Measurements and Standards in the U.S. and Future Perspectives for China. *Aerosol and Air Quality Research*, 13: 1197–1211, 2013
- Engel, A, Bonisch, H., 2011. TACTS/SALSA: A HALO mission to study the seasonality in the UT/LS (TACTS: Transport and Composition in the UT/LMS, SALSA: Seasonality of Air mass transport and origin in the Lowermost Stratosphere using the HALO Aircraft). Institut fur Atmosphere und Umwelt. Goethe Universitat Frankfurt. pp. 17.
- Hathaway, D. H., 2010. The Solar Activity. *Living Review in Solar Physics*. 7, 1. Online Article: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-1>
- Holton, J.R., Haynes, P.H., McIntyre, M.E., Douglass, A.R., Rood, R.B., Pfister, L., 1995. Stratosphere-Troposphere Exchange. *Reviews of Geophysics*. 33, 403-439.
- Lutgens, F.K., Tarbuck, E.J., 2000. *The Atmosphere* (8th edition). Prentice Hall.
- Watson J.G., Chow J.C., Dubois D., Green M., Frank N., Pitchford M., 1997. “Guidance for Network Design and Optimum Site Exposure for PM_{2.5} and PM₁₀”. Office of Air Quality Planning and Standards - U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC27711).

Πηγές Διαδικτύου

- ✚ SIDC – Solar Influences Data Analysis Center: <http://www.sidc.be>
- ✚ Radioactivity Environmental Monitoring (REM) Web Site:
<https://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/>
- ✚ Laboratoire Glaciologie et Geophysique Environnement:
http://www-lgge.obs.ujf-grenoble.fr/axes/radioactivite/Pb210_database/
- ✚ NASA: <https://www.nasa.gov/>
NASA, Marshall Space Flight Center, Solar Physics:
<http://solarscience.msfc.nasa.gov/>
<http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>
- ✚ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): <http://www.noaa.gov/>
National Weather Service:
<http://www.srh.noaa.gov/>
<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/atmos/layers.html>
<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/global/jet.htm>
- ✚ National Snow & Ice Center:
<https://nsidc.org/>
https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/factors_affecting_climate_weather.html
- ✚ PhysicalGeography.net:
<http://www.physicalgeography.net/>
<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7o.html>
- ✚ The COMET Program and National Center for Atmospheric Research:
http://www.goes-r.gov/users/comet/tropical/textbook_2nd_edition/index.htm
http://www.goes-r.gov/users/comet/tropical/textbook_2nd_edition/navmenu.php_tab_4_page_2.3.0.htm
- ✚ HyperPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/semcn.html>
- ✚ GeoScienceWorld:
<http://elements.geoscienceworld.org/>
<http://elements.geoscienceworld.org/content/gselements/4/6/389/F3.large.jpg>
- ✚ Tropospheric Aerosols:
<http://capita.wustl.edu/aerosolintegration/specialTopics/Integration/Capter4Drafts/CHAPTER4000708.htm>
- ✚ Particulate Matter, Breyse, P.N., & Lees, P.S., Johns Hopkins University:
<http://ocw.jhsph.edu/courses/PrinciplesIndustrialHygiene/PDFs/Lecture4.pdf>

- ✚ Purdue University (West Lafayette, Indiana, USA): <https://www.physics.purdue.edu/>
Purdue Rare Isotope Measurement Laboratory: <https://www.physics.purdue.edu/ams/>
Accelerator Mass Spectrometry:
<https://www.physics.purdue.edu/ams/introduction/ams.html#tandem>
- ✚ U.S. Geological Survey: <https://www.usgs.gov/>
Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP, MS):
<http://crustal.usgs.gov/laboratories/icpms/intro.html>
- ✚ University of Basel, Environmental Sciences: <https://umweltgeo.unibas.ch/en/home/>
Research, Soil erosion assessment with Radionuclides:
<https://umweltgeo.unibas.ch/en/research/current-projects/soil-erosion-assessment-in-alpine-grasslands/>
MODERN (Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides):
<https://umweltgeo.unibas.ch/en/research/current-projects/soil-erosion-assessment-in-alpine-grasslands/modern/>
- ✚ NSDA (United States Department of Agriculture):
<http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/worldsoils/>
http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/worldsoils/?cid=nrcs142p2_054006
http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/worldsoils/?cid=nrcs142p2_054007
- ✚ Nuclear Technology Services, Inc.: <http://www.ntsincorg.com>
Marinelli Beakers: http://www.ntsincorg.com/m_beakers_dimensions.htm
- ✚ GEOTRACES: <http://www.geotraces.org/>