



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**«ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΩΝ
ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΕΪΔΙΩΝ ΣΕ ΕΔΑΦΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ.»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΡΖΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Καθηγήτρια Τζωράκη Ουρανία

Χανιά, Σεπτέμβριος, 2020

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλεϊδίων σε εδάφη της Ελλάδας. Σκοπός της εργασίας είναι να πραγματοποιηθεί η χωρική κατανομή των ραδιονουκλεϊδίων στις υπό μελέτη περιοχές και ταυτόχρονα να γίνει η εκτίμηση του περιβαλλοντικού κινδύνου που προκύπτει από τα συγκεκριμένα ραδιονουκλεΐδια υπολογίζοντας τους απαραίτητους περιβαλλοντικούς δείκτες.

Οι περιοχές μελέτης για τις οποίες είχαμε εδαφικά δείγματα είναι η Λέσβος, η Χίος και η Θεσσαλία. Πιο συγκεκριμένα, για την Λέσβο είχαμε εδαφικά δείγματα σε 18 περιοχές, για την Χίο σε 8 περιοχές ενώ στην Θεσσαλία είχαμε μετρήσεις για 19 περιοχές.

Τα ραδιονουκλεΐδια τα οποία μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το Ράδιο (^{226}Ra , ^{228}Ra), το Ουράνιο (^{238}U), το Θόριο (^{228}Th , ^{232}Th), το Κάλιο (^{40}K) και το Καΐσιο (^{137}Cs). Από τα προαναφερθέντα ραδιονουκλεΐδια, το Ράδιο, το Ουράνιο, το Θόριο και το Κάλιο ανήκουν στα φυσικά ραδιονουκλεΐδια, ενώ το Καΐσιο στα τεχνητά. Στην συγκεκριμένη εργασία, μελετάται ακόμη η συσχέτιση μεταξύ των υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδίων εφαρμόζοντας Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA) και υπολογίζοντας τους Pearson's correlation coefficients.

Για να πραγματοποιηθεί η χωρική κατανομή των ραδιονουκλεϊδίων στις περιοχές μελέτης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων (IDW). Πιο συγκεκριμένα, οι χάρτες χωρικής κατανομής που προέκυψαν, βασίστηκαν στην παραδοχή πως τα χαρακτηριστικά των σημείων του δείγματος τα οποία βρίσκόντουσαν πιο κοντά το ένα με το άλλο είναι περισσότερο όμοια από ότι τα χαρακτηριστικά εκείνων των σημείων του δείγματος που απέχουν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους.

Όσον αφορά στην εκτίμηση του περιβαλλοντικού κινδύνου που προκύπτει από τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια έγινε χρήση των απαραίτητων περιβαλλοντικών δεικτών. Αναλυτικότερα, υπολογίστηκαν ο Geo-accumulation Index (I_{Geo}), ο Enrichment Factor (EF) και ο Pollution Index για τον προσδιορισμό της ρύπανσης των εδαφών από το κάθε ραδιονουκλεΐδιο ξεχωριστά. Στην Λέσβο παρατηρήθηκαν αυξημένες τιμές του Enrichment Factor και του Pollution Index ενώ για την Χίο και την Θεσσαλία οι προαναφερθέντες δείκτες παρουσίασαν μικρές τιμές. Γενικά, παρατηρείται μικρή ρύπανση από τα ραδιονουκλεΐδια στις εξεταζόμενες περιοχές, με μεσαία ρύπανση στη Λέσβο λόγω της επίδρασης των ειδικών τοπικών γεωλογικών συνθηκών.

Επιπρόσθετα, υπολογίστηκαν κάποιοι παράμετροι ασφαλείας ραδιενέργειας με σκοπό την εκτίμηση του κινδύνου για την ανθρώπινη υγεία από την ύπαρξη των ραδιονουκλεϊδίων. Πιο συγκεκριμένα, οι δείκτες που υπολογίστηκαν είναι ο External Hazard Index (H_{ex}), ο Radium equivalent activity (Ra_{eq}), η δόση (D) και η δραστική δόση (D_E). Η Λέσβος παρουσίασε μεγαλύτερες τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους συγκριτικά με την Χίο και την Θεσσαλία. Μάλιστα, στην Άργεννο και στην Αρίσβη οι τιμές του H_{ex} και του Ra_{eq} υπολογίστηκαν μεγαλύτερες από τα βιβλιογραφικά αποδεκτά όρια. Τέλος, έγινε ξεχωριστός υπολογισμός της δόσης Καισίου (D_{Cs}) και της δραστικής δόσης Καισίου ($D_{E(\text{Cs})}$), διότι το Καΐσιο ανήκει στα τεχνητά ραδιονουκλεΐδια, και η εκτίμηση του κινδύνου από αυτό παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Η Λέσβος και η Θεσσαλία παρουσίασαν παρόμοιες τιμές για τις παραμέτρους που αφορούν το Καΐσιο, ενώ στην Χίο οι τιμές αυτές ήταν μικρότερες.

Συμπερασματικά, ο κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία στις εξεταζόμενες περιοχές, τόσο από τα φυσικά ραδιονουκλείδια όσο και από το Καίσιο είναι πολύ μικρός.

Abstract

In the present thesis the behavior of natural and artificial radionuclides in Greek soils is examined. The aim of the thesis is to accomplish the spatial distribution of the radionuclides in the examined areas and simultaneously evaluate the environmental danger which occurs from these radionuclides, by calculating the appropriate environmental indices.

The areas from which we had soil samples are Lesvos, Chios and Thessaly. More precisely, we had 18 soil samples from Lesvos, 8 soil samples from Chios and 19 soil samples from Thessaly.

The radionuclides examined for this thesis are Radium (^{226}Ra , ^{228}Ra), Uranium (^{238}U), Thorium (^{228}Th , ^{232}Th), Potassium (^{40}K) and Caesium (^{137}Cs). From the aforementioned radionuclides Radium, Uranium, Thorium and Potassium belong to natural radionuclides, whereas Caesium belongs to artificial. Furthermore, the correlation between these radionuclides is studied by applying PCA and calculating the Pearson's correlation coefficients.

In order to carry out the spatial distribution of the radionuclides in the studied areas, the method of Inverse Distance Weighting (IDW) was used. Namely, the resulting spatial distribution maps were based on the assumption that the characteristics of the samples closer to each other are more similar than the characteristics of those further apart.

Regarding the assessment of the environmental danger resulting from the examined radionuclides, the necessary environmental indices were used. In more detail, the Geo-accumulation Index (I_{GEO}), the Enrichment Factor (EF) and the Pollution Index (PI) were calculated for the determination of the pollution of the soils from each radionuclide separately. In Lesvos, increased Enrichment Factor and Pollution Index values were observed whereas in Chios and Thessaly these indices presented small values. Generally, little pollution is found by radionuclides in the examined areas, with medium pollution levels in Lesvos due to the effect of specific local geological circumstances.

Moreover, several safety radiation parameters were found in order to assess the danger on human health by the radionuclides. Specifically, these parameters are the External Hazard Index (H_{ex}), the Radium equivalent activity (R_{eq}), the dose (D) and the effective dose (D_{E}). Lesvos, presented higher values for the above parameters compared to Chios and Thessaly. It is important to highlight that in Argennos and in Arisvi H_{ex} and R_{eq} values were found to be higher than the acceptable limits. Finally, there was a separate calculation of the Caesium dose (D_{Cs}) and the effective dose of Caesium ($D_{\text{E(Cs)}}$) because Caesium belongs to the artificial radionuclides and its danger assessment is of big interest. Lesvos and Thessaly, presented similar values when it comes to Caesium parameters, whilst in Chios those values were smaller. In conclusion, the danger for human health in the examined areas both from natural radionuclides and Caesium is minor.

Ευχαριστίες

Έπειτα από 5 έτη και την επιτυχή ολοκλήρωση της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με βοήθησαν και με στήριξαν για να αποκτήσω το δίπλωμα του Μηχανικού Περιβάλλοντος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Γεώργιο Καρατζά για την καθοδήγηση και την βοήθεια του σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Ιδιαίτερως θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Ουρανία Τζωράκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση της σε σχέση με την διπλωματική εργασία καθώς και για την συνεχή στήριξη της στις αποφάσεις μου στον ακαδημαϊκό τομέα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μιχάλη Λασηθιωτάκη για την βοήθεια του και τις μετρήσεις που μου παρείχε για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ιωάννη Τριχάκη και Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την καθοδήγηση τους και τα βοηθητικά τους σχόλια.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Χρήστο Γκούμα για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του όσον αφορά στην διπλωματική μου εργασία αλλά και την συνεχή στήριξη του σε όλους τους τομείς.

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Περίληψη | 1 |
| Abstract..... | 3 |
| Κατάλογος πινάκων | 7 |
| Κατάλογος εικόνων | 9 |
| 1. Εισαγωγή | 11 |
| 1.1 Περιοχές μελέτης..... | 11 |
| 1.2 Ραδιενέργεια..... | 17 |
| 1.2.1 Ραδιενεργός Διάσπαση | 17 |
| 1.2.2 Πηγές ραδιενέργειας | 21 |
| 1.2.2.1 Φυσικές πηγές ραδιενέργειας..... | 22 |
| 1.2.2.2 Ανθρωπογενείς πηγές ραδιενέργειας | 22 |
| 1.2.3 Φυσικά ραδιονουκλείδια | 23 |
| 1.2.4 Τεχνητά ραδιονουκλείδια | 26 |
| 1.2.4.1 Εκπομπές ^{137}Cs από ατυχήματα | 26 |
| 1.2.5 Ραδιονουκλείδια στα οικοδομικά υλικά..... | 28 |
| 2. Θεωρητικό υπόβαθρο | 30 |
| 2.1 Δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν | 30 |
| 2.2 Στατιστική Ανάλυση | 34 |
| 2.2.1 Πολυμεταβλητή ανάλυση | 34 |
| 2.2.1.1 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών..... | 34 |
| 2.2.2 Pearson's correlation coefficient | 35 |
| 2.3 Ανάλυση Χωρικών Δεδομένων | 36 |
| 2.3.1 Χωρική Παρεμβολή | 36 |
| 2.3.1.1 Μέθοδος Σταθμισμένων Αντιστρόφων Αποστάσεων (Inverse Irregular Weighted-IDW)..... | 37 |
| 3. Μεθοδολογία | 39 |
| 3.1 Δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν | 39 |
| 3.1.1 Μέθοδος απομακρυσμένου σημείου | 40 |
| 3.2 Χάρτες Κατανομής με μέθοδο IDW με την χρήση GIS | 41 |
| 3.3 Principal Component Analysis με την χρήση MATLAB | 42 |
| 4. Αποτελέσματα..... | 44 |
| 4.1 Geo-accumulation Index (I_{GEO}) | 48 |
| 4.2 Enrichment Factor (EF) | 52 |

| | |
|--|------------|
| 4.3 Δείκτες με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου..... | 55 |
| 4.3.1 Geo-accumulation Index (I_{GEO}) | 55 |
| 4.3.2 Enrichment Factor (EF) | 57 |
| 4.4 Pollution Index..... | 59 |
| 4.5 External Hazard Index (H_{EX})..... | 63 |
| 4.6 Radium equivalent activity (Ra_{eq}) | 63 |
| 4.7 Dose (D)..... | 64 |
| 4.8 Effective Dose (D_E) | 65 |
| 4.9 Dose Cs (D_{Cs}) | 65 |
| 4.10 Effective Dose Cs ($D_{E(Cs)}$) | 66 |
| 4.11 Principal Component Analysis | 68 |
| 4.12 Pearson's correlation coefficient | 71 |
| 4.13 Χάρτες Κατανομής | 74 |
| 5. Συζήτηση | 95 |
| 6. Συμπεράσματα..... | 100 |
| 7. Βιβλιογραφία..... | 101 |
| 8. Παράρτημα..... | 105 |

Κατάλογος πινάκων

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 1: Μέσες παγκόσμιες ενεργότητες φυσικών ραδιονουκλεϊδίων σε εδάφη και οικοδομικά υλικά | 29 |
| Πίνακας 2: Τιμές των Hex, Raeq, D, De, D(cs), De(cs) από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία σε διάφορες περιοχές..... | 67 |
| Πίνακας 3: Τιμές των Pearson's correlation coefficients για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία στην Λέσβο..... | 71 |
| Πίνακας 4: Τιμές των Pearson's correlation coefficients για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία στην Χίο | 72 |
| Πίνακας 5: Τιμές των Pearson's correlation coefficients για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία στην Θεσσαλία | 73 |
| Πίνακας 6: Μετρήσεις ενεργοτήτων των υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδίων για την Λέσβο | 105 |
| Πίνακας 7: Μετρήσεις των ενεργοτήτων των υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδίων για την Χίο | 106 |
| Πίνακας 8: Μετρήσεις των ενεργοτήτων των υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδίων για την Θεσσαλία..... | 107 |
| Πίνακας 9: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Λέσβο | 108 |
| Πίνακας 10: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Λέσβο..... | 109 |
| Πίνακας 11: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Λέσβο με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου | 110 |
| Πίνακας 12: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Λέσβο με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου | 111 |
| Πίνακας 13: Τιμές των Hex, Raeq, D, De, D(cs), De(cs) για την Λέσβο | 112 |
| Πίνακας 14: Τιμές του PI για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Λέσβο | 113 |
| Πίνακας 15: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Χίο..... | 114 |
| Πίνακας 16: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Χίο..... | 114 |
| Πίνακας 17: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Χίο με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου | 115 |
| Πίνακας 18: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Χίο με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου | 115 |
| Πίνακας 19: Τιμές των Hex, Raeq, D, De, D(cs), De(cs) για την Χίο..... | 116 |
| Πίνακας 20: Τιμές του PI για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Χίο..... | 116 |
| Πίνακας 21: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Θεσσαλία .. | 117 |
| Πίνακας 22: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Θεσσαλία..... | 118 |
| Πίνακας 23: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Θεσσαλία με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου..... | 119 |
| Πίνακας 24: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Θεσσαλία με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου | 120 |
| Πίνακας 25: Τιμές των Hex, Raeq, D, De, D(cs), De(cs) για την Θεσσαλία | 121 |
| Πίνακας 26: Τιμές του PI για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδία για την Θεσσαλία | 122 |
| Πίνακας 27: Χαρακτηρισμός του είδους των εδαφικών δειγμάτων στην Λέσβο και οι αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές των ραδιονουκλεϊδίων και του σιδήρου σύμφωνα με τον Turekian (1961)..... | 123 |

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 28: Χαρακτηρισμός του είδους των εδαφικών δειγμάτων στην Χίο και οι αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές των ραδιονουκλεϊδίων και του σιδήρου σύμφωνα με τον Turekian (1961)..... | 123 |
| Πίνακας 29: Χαρακτηρισμός του είδους των εδαφικών δειγμάτων στην Χίο και οι αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές των ραδιονουκλεϊδίων και του σιδήρου σύμφωνα με τον Turekian (1961)..... | 124 |
| Πίνακας 30: Χαρακτηρισμός εδαφών σύμφωνα με την τιμή του Igeo | 125 |
| Πίνακας 31: Χαρακτηρισμός εδαφών σύμφωνα με την τιμή του EF | 125 |
| Πίνακας 32: Χαρακτηρισμός εδαφών σύμφωνα με την τιμή του PI | 125 |
| Πίνακας 33: Χαρακτηρισμός εδαφών της Λέσβου, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo.. | 126 |
| Πίνακας 34: Χαρακτηρισμός εδαφών της Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo | 127 |
| Πίνακας 35: Χαρακτηρισμός εδαφών της Θεσσαλίας, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo | 128 |
| Πίνακας 36: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Λέσβου, σύμφωνα με τον δείκτη EF | 129 |
| Πίνακας 37: Χαρακτηρισμός εδαφών Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του EF..... | 130 |
| Πίνακας 38: Χαρακτηρισμός εδαφών Θεσσαλίας, σύμφωνα με τις τιμές του EF | 131 |
| Πίνακας 39: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Λέσβου, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου | 132 |
| Πίνακας 40: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου..... | 133 |
| Πίνακας 41: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Θεσσαλίας, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου | 134 |
| Πίνακας 42: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Λέσβου, σύμφωνα με τις τιμές του EF με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου | 135 |
| Πίνακας 43: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του EF με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου..... | 136 |
| Πίνακας 44: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του EF με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου..... | 137 |
| Πίνακας 45: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Λέσβου, σύμφωνα με τις τιμές του PI | 138 |
| Πίνακας 46: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του PI ... | 139 |
| Πίνακας 47: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Θεσσαλίας, σύμφωνα με τις τιμές του PI | 140 |
| Πίνακας 48: Μέσες τιμές του δείκτη Igeo της παρούσας εργασίας και άλλων παγκόσμιων ερευνών..... | 141 |
| Πίνακας 49: Μέσες τιμές του δείκτη EF της παρούσας εργασίας και άλλων παγκόσμιων ερευνών..... | 142 |
| Πίνακας 50: Μέσες τιμές του δείκτη PI της παρούσας εργασίας και άλλων παγκόσμιων ερευνών..... | 143 |

Κατάλογος εικόνων

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Χάρτης Λέσβου με τα σημεία δειγματοληψίας..... | 12 |
| Εικόνα 2: Χάρτης Χίου με τα σημεία δειγματοληψίας..... | 14 |
| Εικόνα 3: Χάρτης Θεσσαλίας με τα σημεία δειγματοληψίας | 16 |
| Εικόνα 4: Διεσδυτική ικανότητα ραδιενεργού ακτινοβολίας (WNA)..... | 18 |
| Εικόνα 5: Κατανομή των προϊόντων της αυθόρμητης σχάσεως μερικών βαρέων πυρήνων | 21 |
| Εικόνα 6: Σειρά ραδιενεργούς διάσπασης στο πιο κοντινό ισότοπο του Ουρανίου ... | 24 |
| Εικόνα 7: Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό της Matlab για να προκύψουν οι απαραίτητοι πίνακες για την Principal Component Analysis | 42 |
| Εικόνα 8: Πίνακας με τις τιμές coefficient στο λογισμικό της Matlab | 42 |
| Εικόνα 9: Πίνακας με τις τιμές score στο λογισμικό της Matlab..... | 43 |
| Εικόνα 10: Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό της Matlab για να προκύψουν οι γραφικές παραστάσεις για την PCA..... | 43 |
| Εικόνα 11: Διάγραμμα των ενεργοτήτων των ραδιονουκλιδίων στην Λέσβο..... | 44 |
| Εικόνα 12: Διάγραμμα των ενεργοτήτων του Καλίου στην Λέσβο | 44 |
| Εικόνα 13: Διάγραμμα των ενεργοτήτων των ραδιονουκλιδίων στην Χίο | 45 |
| Εικόνα 14: Διάγραμμα των ενεργοτήτων του Καλίου στην Χίο..... | 45 |
| Εικόνα 15: Διάγραμμα των ενεργοτήτων των ραδιονουκλιδίων στην Θεσσαλία..... | 46 |
| Εικόνα 16: Διάγραμμα των ενεργοτήτων του Καλίου στην Θεσσαλία | 46 |
| Εικόνα 17: Γραφική απεικόνιση της PCA για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια στην Λέσβο..... | 68 |
| Εικόνα 18: Γραφική απεικόνιση της PCA για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια στην Χίο | 69 |
| Εικόνα 19: Γραφική απεικόνιση της PCA για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια στην Θεσσαλία..... | 70 |
| Εικόνα 20: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (Ra226) στην Λέσβο..... | 74 |
| Εικόνα 21: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ουράνιο (U238) στην Λέσβο | 75 |
| Εικόνα 22: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (Ra228) στην Λέσβο..... | 76 |
| Εικόνα 23: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th228) στην Λέσβο..... | 77 |
| Εικόνα 24: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th232) στην Λέσβο..... | 78 |
| Εικόνα 25: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Κάλιο (K40) στην Λέσβο..... | 79 |
| Εικόνα 26: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Καίσιο (Cs137) στην Λέσβο..... | 80 |
| Εικόνα 27: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (226) στην Χίο | 81 |
| Εικόνα 28: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ουράνιο (U238) στην Χίο..... | 82 |
| Εικόνα 29: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (Ra228) στην Χίο | 83 |
| Εικόνα 30: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th228) στην Χίο | 84 |
| Εικόνα 31: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th232) στην Χίο | 85 |
| Εικόνα 32: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Κάλιο (K40) στην Χίο | 86 |
| Εικόνα 33: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Καίσιο (Cs137) στην Χίο | 87 |
| Εικόνα 34: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (Ra226) στην Θεσσαλία..... | 88 |
| Εικόνα 35: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ουράνιο (U238) στην Θεσσαλία | 89 |
| Εικόνα 36: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (Ra228) στην Θεσσαλία..... | 90 |
| Εικόνα 37: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th228) στην Θεσσαλία..... | 91 |
| Εικόνα 38: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th232) στην Θεσσαλία..... | 92 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 39: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Κάλιο (K^{40}) στην Θεσσαλία..... | 93 |
| Εικόνα 40: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Καίσιο (Cs^{137}) στην Θεσσαλία..... | 94 |

1. Εισαγωγή

1.1 Περιοχές μελέτης

Λέσβος

Η Λέσβος βρίσκεται στο Βορειοανατολικό τμήμα του Αιγαίου, πολύ κοντά στις Μικρασιατικές ακτές και αποτελεί το τρίτο μεγαλύτερο νησί της Ελλάδας με έκταση 1,630km². Επιπλέον, η Λέσβος έχει ακτογραμμή 459km και ο πληθυσμός της σύμφωνα με την απογραφή του 2011 είναι 85,330 κάτοικοι. Στη γεωμορφολογία της Λέσβου ξεχωρίζουν ο κόλπος της Καλλονής και ο κόλπος της Γέρας. Μεταξύ των δύο αυτών κόλπων υπάρχουν δύο μεγάλοι ορεινοί όγκοι, το όρος Λεπέτυμνος (969m) στο βόρειο τμήμα του νησιού και το όρος Όλυμπος (967m) στο νότιο τμήμα του νησιού. Γενικά, το ανάγλυφο της Λέσβου ποικίλει καθώς αποτελείται από αρκετά όρη και παρουσιάζει απότομες αλλαγές από περιοχή σε περιοχή.

Η Λέσβος αποτελείται από μία ενότητα προαλπικών και αλπικών πετρωμάτων, η οποία καταλαμβάνει ολόκληρο το Νοτιοανατολικό τμήμα του Νησιού, δηλαδή την περιοχή της Μυτιλήνης και της χερσονήσου της Αμαλής, την περιοχή γύρω από τον κόλπο της Γέρας, το συνολικό ορεινό όγκο του Ολύμπου και των γύρω υψωμάτων μέχρι το Πλωμάρι και όλη τη νότια παραλία της Λέσβου. Στην υπόλοιπη Λέσβο βρίσκονται μικρές μόνο εμφανίσεις των προαλπικών και αλπικών πετρωμάτων στο Βορειοδυτικό άκρο του νησιού και οι οποίες στο μεγαλύτερο τμήμα τους καλύπτονται από μεταλπικούς σχηματισμούς με κυριότερους τα ηφαιστειακά πετρώματα Νεογενούς ηλικίας. Όλη η υπόλοιπη Λέσβος, δηλαδή το Βόρειο, το Δυτικό και το κεντρικό τμήμα της νήσου γύρω από τον κόλπο της Καλλονής, καταλαμβάνονται από τους νεογενείς ηφαιστειακούς σχηματισμούς και άλλα μεταλπικά ιζήματα που καλύπτουν τα προαλπικά και αλπικά πετρώματα καθολικά. Εξαίρεση αποτελούν οι μικρές εμφανίσεις αλπικών και προαλπικών πετρωμάτων στο Βορειοδυτικό άκρο της Λέσβου στις περιοχές Σιγρίου και Γαβαθά καθώς και ορισμένες απομονωμένες μικροεμφανίσεις των ίδιων πετρωμάτων στην περιοχή της Ερεσσού (Θωμαΐδου, 2009).



Εικόνα 1: Χάρτης Λέσβου με τα σημεία δειγματοληψίας

Χίος

Η Χίος βρίσκεται στο Βόρειο Αιγαίο και είναι το πέμπτο σε μέγεθος νησί της Ελλάδας κατά σειρά μετά την Κρήτη, την Εύβοια, τη Λέσβο και τη Ρόδο. Έχει μέγιστο μήκος 52km, μέγιστο πλάτος 29km και επιφάνεια 842km². Επιπλέον, ο πληθυσμός της είναι 51,320 κάτοικοι σύμφωνα με την απογραφή που πραγματοποιήθηκε το 2011.

Η γεωλογική και η τεκτονική δομή της Χίου παρουσιάζουν μια ιδιαίτερη πολυπλοκότητα. Κλαστικά και ανθρακικά ιζήματα του Παλαιοζωικού, του Μεσοζωικού και του Νεογενούς ποικίλης λιθοδομικής συστάσεως είναι τα πετρώματα που αποτελούν την Χίο κατά κύριο λόγο. Τα προαλπικά πτυχωμένα ιζήματα διακρίνονται σε μια αυτόχθονη σειρά που είναι και η επικρατέστερη και σε μια αλλόχθονη που είναι επωθημένη πάνω στην αυτόχθονη. Η τελευταία παρατηρείται στο Βορειοανατολικό και Νότιο τμήμα του νησιού. Μετά την αλπική πτύχωση στο Νοτιοανατολικό τμήμα αποτέθηκαν λιμναία ιζήματα (Νεογενές) που αποτελούν μια ανεξάρτητη ενότητα. Στο Βορειοδυτικό κομμάτι της Χίου, δεσπόζει μια μεσοζωική πλατφόρμα υποκείμενη ενός ολιθοστρώματος που αποτελείται από συμπλέγματα ανθρακικών και ηφαιστειακών πετρωμάτων σε φαμμιτική μήτρα.

Από μορφολογική άποψη, το μεγαλύτερο μέρος του νησιού είναι ορεινό και τραχύ με μέσο υψόμετρο τα 400m, ενώ οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις της Χίου φτάνουν σε ποσοστό της τάξης του 18% της συνολικής επιφάνειας του νησιού. Το τοπογραφικό ανάγλυφο είναι έντονο στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της Χίου, ενώ στο νοτιότερο τμήμα, το οποίο αποτελείται κατά κύριο λόγο από νεογενή ιζήματα, το ανάγλυφο είναι ηπιότερο και το υψόμετρο των παρατηρούμενων οροσειρών μειώνεται. Το πλέον σημαντικό όρος είναι το Πελινναίο (1297m) με σχετικά απότομες πλαγιές και χαράδρες στο κέντρο του βόρειου τμήματος της Χίου. Στο δυτικό μέρος του νησιού, εκτείνεται η οροσειρά της Αμανής (809m) που καλύπτει όλο το βορειοδυτικό τμήμα του νησιού, ενώ νοτιότερα ξεχωρίζει το Όρος (1186m) και ο Κοχλίας (926m). Στο νοτιοανατολικό παράκτιο τμήμα του νησιού βρίσκονται μικρές κοιλάδες και επί των ορεινών περιοχών μικρά οροπέδια. Επιπρόσθετα, πυκνό υδρογραφικό δίκτυο δενδριτικής μορφής αναπτύσσεται στο βορειοδυτικό τμήμα του νησιού όπου επικρατούν αδιαπέρατα πετρώματα. Στο υπόλοιπο τμήμα της Χίου, το υδρογραφικό δίκτυο είναι αραιότερο και αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων σε υδροπερατά πετρώματα (Τσούτσια, 2012).



Εικόνα 2: Χάρτης Χίου με τα σημεία δειγματοληψίας

Θεσσαλία

Η Θεσσαλία είναι ένα γεωγραφικό διαμέρισμα που αποτελείται από τους νομούς της Λαρίσης, της Μαγνησίας, των Τρικάλων, της Καρδίτσας και των Σποράδων. Η συνολική της έκταση είναι 14,036km² και ο πληθυσμός της είναι 732,762 κάτοικοι σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Επίσης, το διαμέρισμα της Θεσσαλίας παρουσιάζει απλή γεωμορφολογική εικόνα με τα ορεινά τμήματά του να βρίσκονται περιμετρικά και τα πεδινά τμήματα να βρίσκονται στις κεντρικές περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν πέντε ορεινοί όγκοι, μεταξύ των οποίων ο Όλυμπος με υψόμετρο 2,917m που αποτελεί το υψηλότερο όρος της Ελλάδας. Το πεδινό τμήμα της Θεσσαλίας χωρίζεται σε ανατολική και δυτική περιοχή από τα χαμηλά Χαλκηδόνια Όρη.

Στο διαμέρισμα της Θεσσαλίας αναπτύσσονται, με βορειοδυτική-νοτιοανατολική κατεύθυνση, τρεις γεωτεκτονικές ζώνες: η Πελαγονική, η Υποπελαγονική και η ζώνη Ολωνού-Πίνδου. Διακρίνονται μεταξύ τους με βάση το παλαιοπεριβάλλον απόθεσης που αντιπροσωπεύουν και τη γεωτεκτονική ιστορία τους. Τα πετρώματα των ζωνών αυτών αποτελούν το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής (Αναγνωστοπούλου, 2013). Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά χαρακτηριστικά των προαναφερθέντων ζωνών περιγράφονται παρακάτω:

→Πελαγονική ζώνη: Αποτελείτε από παλαιά μεταμορφωμένα σχιστογενευσιακά και ανθρακικά πετρώματα.

→Υποπελαγονική ζώνη: Κύριο γνώρισμα της είναι οι μεγάλες οφιολιθικές μάζες και η σχιστοκερατολιθική διάπλαση που παρουσιάζει.

→Ζώνη Ολωνού-Πίνδου: Αποτελείτε από μεσοζωικούς ασβεστολιθικούς ορίζοντες και πυριτόλιθους.



Εικόνα 3: Χάρτης Θεσσαλίας με τα σημεία δειγματοληψίας

1.2 Ραδιενέργεια

Ραδιενέργεια ονομάζεται το φαινόμενο της αυθόρμητης εκπομπής σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από κάποια χημικά στοιχεία και είναι αποτέλεσμα της διάσπασης ασταθών (πατρικών) πυρήνων όπου μέσω αυτής μετατρέπονται σε άλλους, πιο σταθερούς (θυγατρικοί). Κατά τη διάσπαση τους οι πυρήνες απελευθερώνουν πυρηνική ακτινοβολία. Η ιονίζουσα αυτή ακτινοβολία συνίσταται σε σωματίδια άλφα (δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, ακτίνες “α”), σωματίδια βήτα (ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, ακτίνες “β”) και ακτινοβολία γάμμα (αφόρτιστα ενεργητικά φωτόνια, ακτίνες “γ”). Η ακτινοβολία γάμμα φέρει συνήθως την περισσότερη ενέργεια από τα προϊόντα των ραδιενεργών διασπάσεων. Γενικά, όλα τα προϊόντα της διάσπασης μπορεί να αποδειχτούν επικίνδυνα για την ισορροπία της λειτουργίας του ανθρώπινου οργανισμού (Αντωνόπουλος-Ντόμης, 2004).

1.2.1 Ραδιενεργός Διάσπαση

Ραδιενεργός διάσπαση ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ένα ασταθές ατομικό είδος (νουκλίδιο) μεταπίπτει σε ένα σταθερότερο ή σταθερό με εκπομπή σωματιδιακής (ακτινοβολία “α” ή “β”) ή και ηλεκτρομαγνητικής (ακτίνες “γ”) ακτινοβολίας. Τόσο η σωματιδιακή όσο και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλληλοεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια της ύλης προκαλώντας φαινόμενα διεγέρσεως και ιονισμού. Σε αυτό το γεγονός οφείλεται και η επικινδυνότητα της ακτινοβολίας κατά την αλληλεπίδρασή της με βιολογικούς ιστούς (Αντωνόπουλος-Ντόμης, 2004).

Η ραδιενεργός διάσπαση είναι φαινόμενο στατιστικό, δηλαδή οι πυρήνες διασπώνται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο και η πιθανότητα διασπάσεως εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες και τη δομή τους. Για μεγάλο αριθμό ατόμων ενός ασταθούς νουκλιδίου, ο αριθμός των πυρήνων που διασπάται στη μονάδα του χρόνου, είναι ανάλογος του συνολικού αριθμού τους και εκφράζεται με τη σχέση :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Ο παράγοντας λ ονομάζεται σταθερά διασπάσεως και μετριέται σε μονάδες χρόνου (s^{-1}) και είναι χαρακτηριστικός για κάθε ραδιενεργό νουκλίδιο. Η ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης δίνει την εκθετική σχέση της ραδιενεργού διασπάσεως:

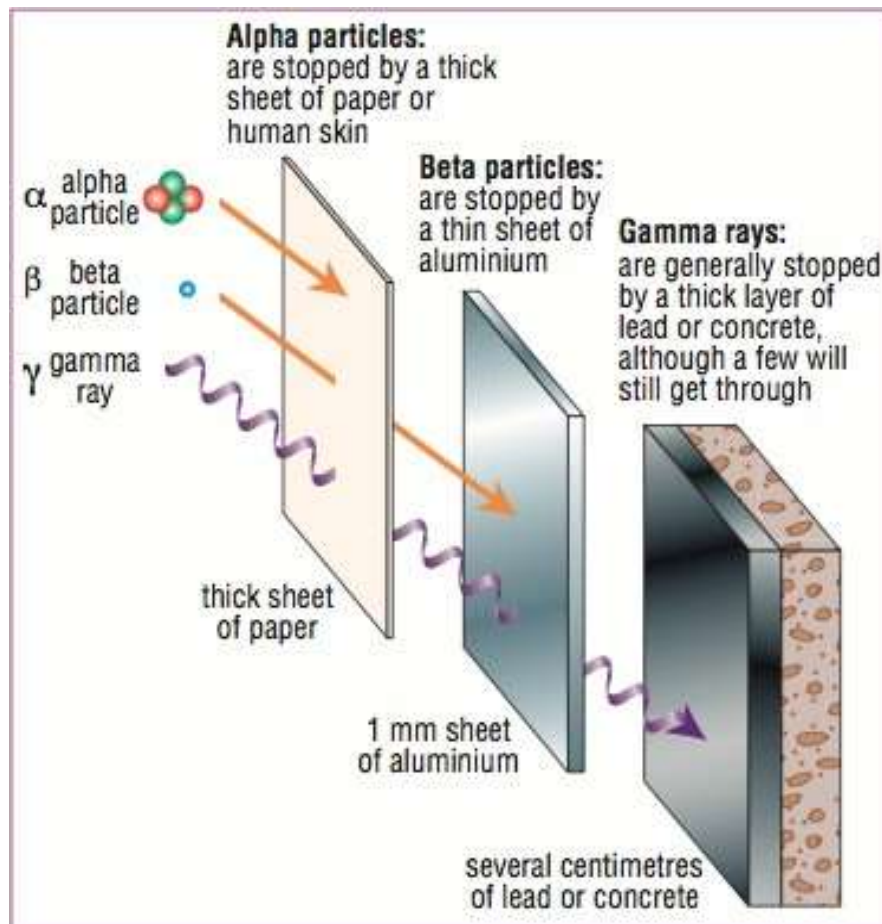
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Η σταθερά διάσπασης λ ισούται με το λόγο του λογαρίθμου του 2 δια του χρόνου υποδιπλασιασμού. Πιο συγκεκριμένα, χρόνος υποδιπλασιασμού ονομάζεται ο χρόνος που απαιτείται για τη διάσπαση του μισού αριθμού των διαθέσιμων πυρήνων ενός ασταθούς νουκλιδίου. Μετά το πέρας ενός χρόνου υποδιπλασιασμού υφίσταται μόνο ο μισός αριθμός, μετά από δύο το ένα τέταρτο κτλ.

Ο ρυθμός διασπάσεως ενός νουκλιδίου εκφράζεται σε διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο και στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) μετράτε σε Becquerel (Bq), που αντιστοιχεί σε μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο (s^{-1}). Η παλαιότερη μονάδα μέτρησης, το Curie (Ci), που αντιστοιχεί σε $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq, έχει καταργηθεί. Για το ρυθμό διασπάσεως ισχύει η αντίστοιχη εκθετική σχέση:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

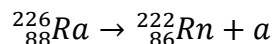
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα είδη ραδιενεργού διασπάσεως, τα οποία είναι η α-διάσπαση, η β-διάσπαση και η γ-διάσπαση.



Εικόνα 4: Διεσδυτική ικανότητα ραδιενεργού ακτινοβολίας (WNA)

Η α-διάσπαση

Στην α-διάσπαση ο πυρήνας εκπέμπει έναν πυρήνα 4He (σωματίδιο-α) και μεταπίπτει σε έναν πυρήνα με δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια λιγότερα σε σχέση με το αρχικό όπως φαίνεται και στην παρακάτω αντίδραση:

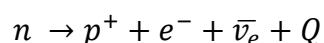


Η α-διάσπαση είναι ενεργειακά δυνατή κυρίως σε πυρήνες με μαζικό αριθμό $A > 140$. Επιπλέον, τα ενεργειακά φάσματα των σωματιδίων-α, που εκπέμπει μια πηγή, παρουσιάζουν χαρακτηριστικές κορυφές. Με αυτόν τον τρόπο, η ενέργεια των σωματιδίων-α μιας πηγής ακτινοβολίας, δίνει ποιοτικές και ποσοτικές για το ραδιονουκλίδιο προέλευσής της αλλά και για την πυρηνική δομή του (Δεδούσης et al., n.d.).

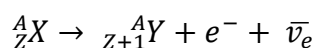
Η β-διάσπαση

Με τον όρο β-διάσπαση χαρακτηρίζονται συλλογικά τρία είδη διασπάσεων με κοινό χαρακτηριστικό τη μεταβολή του αριθμού των νετρονίων και των πρωτονίων του διασπαζόμενου πυρήνα κατά μία μονάδα αλλά και τη διατήρηση του μαζικού αριθμού του συστήματος. Δηλαδή στη β-διάσπαση προκύπτουν ισοβαρή προϊόντα διασπάσεων. Τα τρία επιμέρους είδη διασπάσεως είναι η β⁻-διάσπαση, η β⁺-διάσπαση και η σύλληψη ηλεκτρονίου.

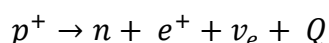
Το κοινό γνώρισμα των προαναφερθέντων διασπάσεων είναι η μεταβολή του αριθμού των νετρονίων και των πρωτονίων του διασπαζόμενου πυρήνα κατά μια μονάδα, καθώς όμως ο μαζικός αριθμός του συστήματος διατηρείται. Πιο συγκεκριμένα, το θυγατρικό νουκλίδιο έχει τον ίδιο μαζικό αριθμό με το μητρικό (ισοβαρές). Στη β-διάσπαση ένας πυρήνας πλούσιος σε νετρόνια, μετατρέπεται ένα από αυτά σε πρωτόνιο έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί περισσότερο.



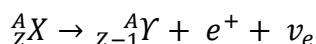
Οπότε τα θυγατρικά νουκλίδια που προκύπτουν έχουν ατομικό αριθμό κατά μία μονάδα μεγαλύτερο των μητρικών.



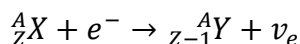
Για να λάβει χώρα η β⁻-διάσπαση πρέπει η μάζα του μητρικού νουκλιδίου να είναι μεγαλύτερη από τη μάζα του θυγατρικού νουκλιδίου. Όπως φαίνεται και από τη βασική εξίσωση της β⁻-διάσπασης, εκτός από το ηλεκτρόνιο (σωματίδιο-β), εκπέμπεται και ένα ακόμη σωματίδιο ηλεκτρικά ουδέτερο, το ηλεκτρονιακό αντνεutrino, που λαμβάνει ένα τμήμα της ενέργειας διασπάσεως ΔΕ. Η παρουσία των αντνεutrino εξηγεί τη μορφή των ενεργειακών φασμάτων των σωματιδίων -β, που δεν έχουν χαρακτηριστικές κορυφές αλλά παρουσιάζουν μια ενεργειακή κατανομή που φθάνει μέχρι μια χαρακτηριστική μέγιστη τιμή $(E_\beta)_{\max}$. Στην β⁺-διάσπαση ένα πρωτόνιο του πυρήνα μετατρέπεται σε νετρόνιο.



Κατά τη β^+ -διάσπαση προκύπτουν, όπως παρουσιάζεται και παρακάτω, ισοβαρή νουκλίδια με ατομικό αριθμό ελαττωμένο κατά μια μονάδα.



Για να ικανοποιείται σε αυτή την περίπτωση η αρχή διατήρησης του φορτίου απαιτείται η εκπομπή ενός ποζιτρονίου, δηλαδή ενός θετικά φορτισμένου ηλεκτρονίου, e^+ , που και αυτό συνοδεύεται από την εκπομπή ενός νετρίνο, ν_e . Τα ποζιτρόνια έχουν πολύ μικρή διάρκεια ζωής και αφού εκπεμφθούν, συνενώνονται με ένα ηλεκτρόνιο της ύλης, εκμηδενίζεται η μάζα τους και η αντίστοιχη ενέργεια εκπέμπεται με τη μορφή δύο φωτονίων ενέργειας 511 keV το καθένα (ακτινοβολία εκμηδενισμού). Για να πραγματοποιηθεί η β^+ -διάσπαση πρέπει η μάζα του μητρικού νουκλιδίου να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα της μάζας του θυγατρικού και δύο ηλεκτρονίων. Όταν αυτό δεν ισχύει, ο πυρήνας μπορεί να μειώσει το φορτίο του συλλαμβάνοντας ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο.



Η πιθανότητα διασπάσεως με σύλληψη ηλεκτρονίου αυξάνει με αύξηση του ατομικού αριθμού, εξαιτίας της ελάττωσης των ακτινών των εσωτερικών στοιβάδων ηλεκτρονίων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται σύλληψη ηλεκτρονίου και αποτελεί το τρίτο είδος της β -διασπάσεως (Δεδούσης et al., n.d.).

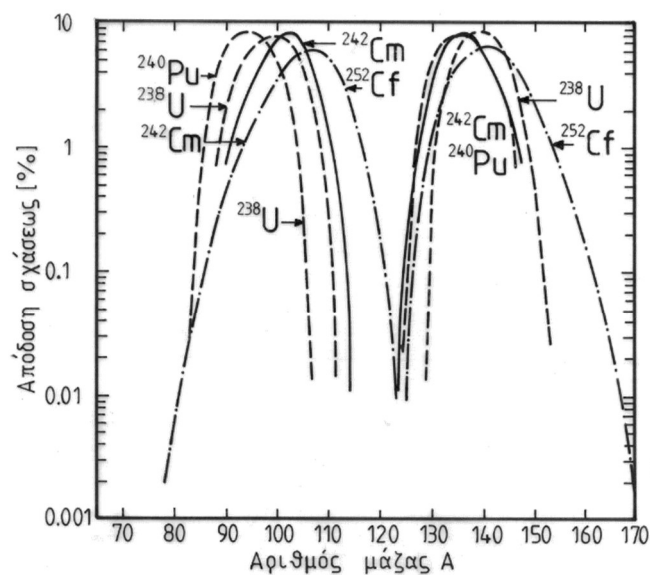
Η γ -διάσπαση

Η α - και β -διάσπαση αφήνει τις περισσότερες φορές το θυγατρικό πυρήνα σε διεγερμένη κατάσταση. Η αποδιέγερση σε όλες αυτές τις περιπτώσεις γίνεται με εκπομπή φωτονίων (ακτινοβολίας- γ). Κατά την εκπομπή αυτή δεν μεταβάλλεται ούτε η μάζα ούτε ο ατομικός αριθμός του πυρήνα.

Η αυθόρμητη σχάση

Σε βαρύς ατομικούς πυρήνες ($Z > 90$) η α -διάσπαση βρίσκεται σε ανταγωνισμό με ένα άλλο είδος διασπάσεως, την αυθόρμητη σχάση. Αναλυτικότερα, στην αυθόρμητη σχάση ο πυρήνας μπορεί, χωρίς να δοθεί ενέργεια εξωτερικά, να διασπαστεί σε δύο τμήματα του ίδιου (συμμετρική σχάση) ή διαφορετικού μεγέθους (ασύμμετρη σχάση).

Τα θραύσματα του πυρήνα, που δημιουργούνται κατά την αυθόρμητη σχάση, παρουσιάζουν μία κατανομή μάζας. Επίσης, τα προϊόντα της σχάσεως βρίσκονται σε διεγερμένη κατάσταση και αποδιεγείρονται με εκπομπή ακτινοβολίας-γ. Τα θραύσματα του πυρήνα με περίσσεια νετρονίων υφίστανται β-διάσπαση μέχρι να επιτευχθεί η σταθερότητα. Στο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της μάζας των προϊόντων της αυθόρμητης σχάσεως μερικών βαρέων πυρήνων (Αντωνόπουλος-Ντόμης, 2004).



Εικόνα 5: Κατανομή των προϊόντων της αυθόρμητης σχάσεως μερικών βαρέων πυρήνων

1.2.2 Πηγές ραδιενέργειας

Η ακτινοβολία είναι ένα συνεχές χαρακτηριστικό της ανθρώπινης ύπαρξης. Το φυσικό περιβάλλον είναι ραδιενεργό. Επιπλέον, οι πηγές ραδιενέργειας στο περιβάλλον είναι από την μια πλευρά φυσικές, και από την άλλη ανθρωπογενείς, ως προϊόντα της ανθρώπινης τεχνολογίας. Οι φυσικές πηγές ακτινοβολίας είναι οι πιο σημαντικές πηγές έκθεσης για τη πλειοψηφία των ατόμων στην Γη.

1.2.2.1 Φυσικές πηγές ραδιενέργειας

Μέσω των τροφικών αλυσίδων, τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία εισχωρούν στον οργανισμό, μεταβολίζονται, και ορισμένα από αυτά καθιλώνονται στους ιστούς του ανθρώπινου σώματος. Από τα στοιχεία αυτά, σημαντικό ρόλο στην εσωτερική ακτινοβολήση του σώματος παίζει το ραδιενεργό Κάλιο, στοιχείο που απαντάται συστηματικά ως συστατικό των πετρωμάτων του εδάφους. Στη φύση, το σταθερό κάλιο, βρίσκεται σε ισορροπία με το φυσικό ραδιενεργό του ισότοπο το ^{40}K που βρίσκεται στο σταθερό κάλιο σε ποσοστό 0,0118 %. Στο σώμα ενός φυσιολογικού άνδρα διασπώνται περίπου 4,433 πυρήνες ^{40}K κάθε δευτερόλεπτο (Sapirio, 2002). Επιπλέον, τα φυτά αντλούν το απαραίτητο για αυτά Κάλιο από το έδαφος, τα ζώα από τα φυτά μέσω της τροφής και ο άνθρωπος από τη διατροφή. Το ^{40}K επομένως, υπάρχει σε όλες σχεδόν τις τροφές και τα άτομά του εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της τροφικής αλυσίδας.

Το ίδιο συμβαίνει και με όλα τα στοιχεία των ραδιενεργών οικογενειών που είναι φυσικά συστατικά του εδάφους, όπως το Ουράνιο (^{238}U), το Θόριο (^{232}Th) και το Ράδιο (^{226}Ra). Πιο συγκεκριμένα, το ^{238}U και προϊόντα της αλυσίδας διάσπασής του, καθώς και προϊόντα της αλυσίδας διάσπασης του ^{232}Th αποτελούν σημαντική εσωτερική πηγή ραδιενέργειας. Το φυσικής προέλευσης Ουράνιο συναντάται στο μεταλλικό νερό, στο κρασί, στον καφέ και στο κρέας. Παράλληλα, πλούσια σε Ουράνιο είναι τα οστρακοειδή θαλασσινά, ιδιαίτερα τα στρείδια και οι αχιβάδες λόγω των τροφών που καταναλώνουν. Στη σειρά διάσπασης του ^{238}U βρίσκεται το ραδιενεργό ισότοπο ^{226}Ra το οποίο εισέρχεται στο σώμα του ανθρώπου και των ζώων μέσω της τροφικής αλυσίδας. Επιπλέον, το ^{226}Ra είναι χημικά παρόμοιο με το ασβέστιο, με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται στα οστά (Ανεσιάδου, 2014).

1.2.2.2 Ανθρωπογενείς πηγές ραδιενέργειας

Μια σειρά από ανθρώπινες δραστηριότητες συμβάλλουν στα επίπεδα συγκέντρωσης ραδιονουκλεϊδίων στο περιβάλλον. Οι ανθρωπογενείς πηγές ραδιενέργειας συνίσταται από δραστηριότητες που έχουν ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση φυσικών ραδιονουκλεϊδίων στο περιβάλλον, αλλά και δραστηριότητες που παράγουν νέα τεχνητά ραδιονουκλεΐδια όπως το Καίσιο (^{137}Cs). Οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές ραδιενέργειας είναι τα δομικά υλικά, οι πυρηνικές δοκιμές (ατομικές βόμβες), η πυρηνική βιομηχανία, τα συμβατικά καύσιμα, οι βιομηχανικές εφαρμογές, οι ιατρικές εφαρμογές αλλά και η γεωργία (χρήση λιπασμάτων) (Ανεσιάδου, 2014).

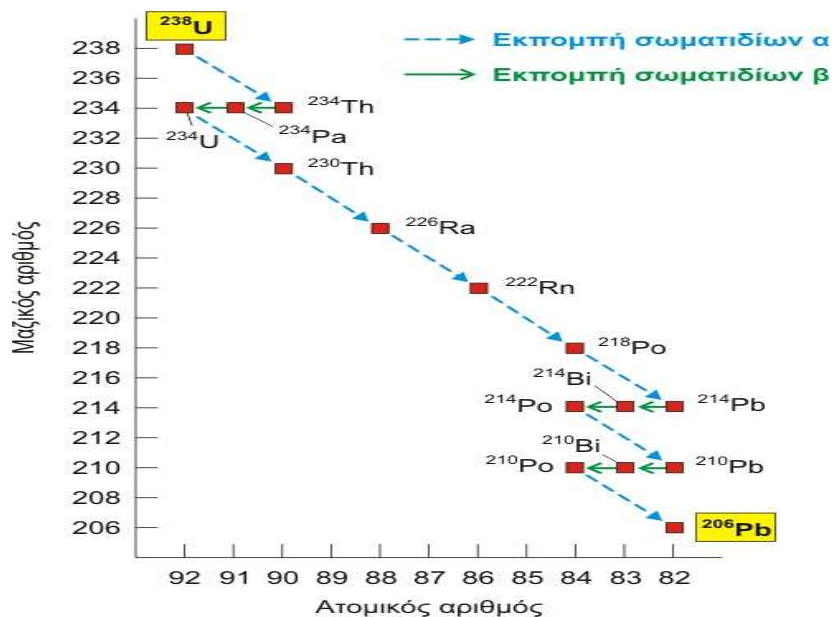
1.2.3 Φυσικά ραδιονουκλεΐδια

Ουράνιο (U)

Το Ουράνιο έχει ατομική μάζα 238,029g/mol και είναι μείγμα τριών ραδιενεργών ισοτόπων. Αυτά είναι το ^{234}U ($T_{1/2}$: 245,500 χρόνια), το ^{235}U ($T_{1/2}$: 703.8 εκατομμύρια χρόνια) και το ^{238}U ($T_{1/2}$: 4.468 δισεκατομμύρια χρόνια) με φυσική αφθονία 0.0055%, 0.72% και 99.28% αντίστοιχα. Επίσης το ^{235}U αποτελεί το κύριο σχάσιμο υλικό σε πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος και σε οπλικά συστήματα. Στη φύση το Ουράνιο απαντάται σε πέντε οξειδωτικές βαθμίδες : +2, +3, +4, +5, και +6 με τις πιο σταθερές οξειδωτικές του βαθμίδες σε +4 και +6 οι οποίες έχουν και την μεγαλύτερη σημασία.

Η παρουσία του Ουρανίου στο περιβάλλον δεν οφείλεται μόνο σε φυσικές πηγές όπως είναι η διάβρωση ουρανιούχων ορυκτών και πετρωμάτων και η ηφαιστειακή δραστηριότητα αλλά και σε ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι ανθρώπινες αυτές δραστηριότητες σχετίζονται κυρίως με την καύση του άνθρακα σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με την παραγωγή και χρήση φωσφορικών λιπασμάτων, καθώς ο φώσφορος εξάγεται από φωσφορικά πετρώματα τα οποία περιέχουν και σημαντικές συγκεντρώσεις Ουρανίου. Επιπλέον, το Ουράνιο έχει μεγάλη εφαρμογή στην πυρηνική τεχνολογία. Το ^{238}U δεν θεωρείται σχάσιμο υλικό, απορροφά όμως νετρόνια και μετατρέπεται σε σχάσιμο ^{239}Pu . Επιπρόσθετα, το απεμπλουτισμένο Ουράνιο (Ουράνιο με μικρότερη περιεκτικότητα σε ^{235}U από τη φυσική) με χαρακτηριστικά όπως η υψηλή πυκνότητα και το υψηλό σημείο τήξης έχει πολλές εφαρμογές σε πεδία όπως η ιατρική, η αεροναυπηγική, η ναυπηγική και η χημεία.

Οι ενώσεις του Ουρανίου δεν αναγνωρίζονται ως καρκινογόνες από το National Toxicology Program (NTP), αλλά εξαιτίας της α-ακτινοβολίας που εκπέμπει το Ουράνιο θεωρείται ότι παρουσιάζουν μεγάλη τοξικότητα. Ωστόσο η τοξικότητα του Ουρανίου είναι μικρότερη από τοξικά μέταλλα όπως είναι ο Μόλυβδος, το Αρσενικό και ο Υδράργυρος (Τσάμος, 2015).



Εικόνα 6: Σειρά ραδιενεργούς διάσπασης στο πιο κοινό ισότοπο του Ουρανίου

Θόριο (Th)

Το Θόριο είναι ένα φυσικό ραδιενεργό μέταλλο με ατομικό αριθμό (Z) ίσο με 90 και σχετική ατομική μάζα (Ar) 232.0381 g/mol. Στη φύση το πιο σταθερό ισότοπο Θορίου που συναντάται είναι το ^{232}Th , που διασπάται με εκπομπή σωματίου α και έχει ημιζωή 14.05 δισεκατομμύρια χρόνια. Εκτιμάται ότι είναι τρεις φορές πιο άφθονο από το Ουράνιο στο φλοιό της Γης και είναι παραπροϊόν της εξόρυξης σπάνιων γαιών από μοναζίτη. Επιπλέον, μπορεί να αντικαταστήσει το Ουράνιο στους πυρηνικούς αντιδραστήρες για παραγωγή νετρονίων που συντηρούν την αλυσωτή αντίδραση. Συγκριτικά με το Ουράνιο είναι δυσδιάλυτο στοιχείο και για αυτό τον λόγο εμφανίζεται σε αφθονία στο χώμα, αλλά όχι στο θαλασσινό νερό, και υπάρχει σε μεγαλύτερες ποσότητες στο φλοιό της Γης.

Η παρουσία του Θορίου είναι αποτέλεσμα και ανθρώπινων δραστηριοτήτων όπως η πυρηνική βιομηχανία, η καύση λιγνίτη, η επεξεργασία μεταλλευμάτων, η αεροναυπηγική βιομηχανία και η χρήση λιπασμάτων. Το Θόριο εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό από τον αέρα, την τροφή, το νερό και το χώμα, ενώ μια μικρή ποσότητά του καταλήγει στο αίμα (Τσάμος, 2015).

Ράδιο (Ra)

Το ράδιο έχει ατομικό αριθμό (Z) ίσο με 88, ατομικό βάρος (Ar) 226.0254u και είναι ένα από τα σπανιότερα χημικά στοιχεία στον φλοιό της Γης. Επίσης, είναι αργυρόλευκο μέταλλο των αλκαλικών γαιών, που οξειδώνεται γρήγορα όταν εκτίθεται στον ατμοσφαιρικό αέρα και γίνεται μαύρο.

Όλα τα ισότοπα του Ραδίου είναι πολύ ραδιενεργά και το πιο σταθερό από αυτά, το ^{226}Ra έχει ημιζωή 1.601 έτη και διασπάται σχηματίζοντας Ραδόνιο. Εξαιτίας της αστάθειας του, το Ράδιο είναι φθορίζον και εκπέμπει μια απαλή γαλάζια λάμψη. Στη φύση το Ράδιο βρίσκεται σε ορυκτά Ουρανίου σε ίχνη της τάξης του 1/7 γραμμαρίου ανά τόνο του ορυκτού. Επιπλέον, δεν αποτελεί απαραίτητο ιχνοστοιχείο για ζωντανούς οργανισμούς ενώ ταυτόχρονα αποτελεί κίνδυνο για την υγεία των οργανισμών εξαιτίας της υψηλής του ραδιενέργειας και της τοξικής χημικής του δραστηριότητας (Galanda et al., 2009).

Κάλιο (K)

Το Κάλιο είναι μέταλλο με ατομικό αριθμό (Z) ίσο με 19 και ατομικό βάρος (Ar) 39.09u. Το πιο γνωστό ισότοπο του Καλίου είναι το ^{40}K (η φυσική παρουσία του στην φύση είναι 0.0117%) το οποίο, με πρόσληψη ηλεκτρονίου ή εκπομπή ποζιτρονίου διασπάται στο σταθερό ^{40}Ar και με εκπομπή ηλεκτρονίου μετατρέπεται στο επίσης σταθερό ^{40}Ca (Galanda et al., 2009). Από τη στιγμή που αστριούχα ορυκτά θα απελευθερωθούν λόγω διεργασιών αποσάθρωσης, το K λόγω της μεγάλης διαλυτότητάς του εμφανίζεται σαν απλό κατιόν K^+ σε όλη την έκταση ευστάθειας των φυσικών υδάτων. Το Κάλιο είναι το όγδοο σε αφθονία στοιχείο του γήινου φλοιού με εκτιμώμενη συγκέντρωση 1.84%. Επιπλέον, είναι ένα λιθόφιλο και βιόφιλο μεταλλικό στοιχείο και αποτελεί κύριο συστατικό πολλών πετρογενετικών ορυκτών (Fyfe et al., 1999).

Η ραδιενεργή διάσπαση του Καλίου χρησιμοποιείται στη ραδιοχρονολόγηση πετρωμάτων. Τα ορυκτά που είναι τα περισσότερο κατάλληλα για να ραδιοχρονολογηθούν με τη μέθοδο αυτή περιλαμβάνουν το βιοτίτη, το μοσχοβίτη, τα πυριγενή πετρώματα, τα πυριτικά ορυκτά και τα αστροειδή. Επιπλέον, το ^{40}K αποτελεί για το ανθρώπινο σώμα τη μεγαλύτερη φυσική πηγή ραδιενέργειας, μεγαλύτερη και από αυτή του επίσης ραδιενεργού ^{14}C .

1.2.4 Τεχνητά ραδιονουκλεΐδια

Καίσιο (Cs)

Το Καίσιο-137 (^{137}Cs) είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο του Καισίου. Είναι ένα από τα συνηθέστερα προϊόντα σχάσιμων ισοτόπων σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και πυρηνικά όπλα. Εξαιτίας της μεγάλης διαλυτότητας των αλάτων του Καισίου στο νερό, τα οποία αποτελούν και την συνηθέστερη χημική ένωση του Καισίου, μεταφέρεται εύκολα στην φύση και για αυτό είναι ένα από τα προβληματικότερα προϊόντα σχάσης. Ο χρόνος ημιζωής του Καισίου είναι περίπου 30.17 χρόνια και διασπάται με β-διάσπαση στο μετασταθές Βάριο (^{137}Ba). Πιο συγκεκριμένα περίπου το 95% της διάσπασης του ^{137}Cs οδηγεί σε αυτό το ισομερές (Τσάμος, 2015).

Το Καίσιο στο περιβάλλον είναι ανθρωπογενές και συγκαταλέγεται στην κατηγορία των τεχνητών ραδιονουκλεϊδίων. Σε αντίθεση με τα περισσότερα ραδιοϊσότοπα, το ^{137}Cs είναι υποπροϊόν της σχάσης βαρύτερων χημικών στοιχείων και δεν παράγεται από το ίδιο μη ραδιενεργό ισότοπο του στοιχείου. Αυτό σημαίνει, πως μέχρι την κατασκευή του πρώτου πυρηνικού αντιδραστήρα, τον Chicago Pile-1 στα τέλη του 1942, δεν υπήρχε στην Γη για δισεκατομμύρια χρόνια. Το ^{137}Cs απελευθερώνεται στο περιβάλλον κατά την διάρκεια σχεδόν όλων των πυρηνικών δοκιμών και ατυχημάτων όπως έγινε και στο πυρηνικό ατύχημα του Τσέρνομπιλ το 1986 (Kritidis & Florou, 1995).

Επιπλέον, το Καίσιο αντιδρά με το νερό παράγοντας υδροξείδιο του Καισίου που αποτελεί μια υδατοδιαλυτή ένωση. Τέλος, το Καίσιο εάν εισέλθει στο ανθρώπινο σώμα κατανέμεται σχετικά ομοιόμορφα με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στους μυϊκούς ιστούς και χαμηλότερη στα οστά.

1.2.4.1 Εκπομπές ^{137}Cs από ατυχήματα

Οι εκπομπές ^{137}Cs από ατυχήματα σε πυρηνικές μονάδες αποτελούν τις πιο πρόσφατες ανησυχίες για διαφυγή ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Το παγκόσμιο ενδιαφέρον εστιάζεται στη μεγάλη κλίμακα απελευθέρωση ραδιενέργειας, που ακολούθησε την έκρηξη στον πυρηνικό αντιδραστήρα του Chernobyl της Ουκρανίας το 1986 (Kritidis & Florou, 1995).

Από την έκρηξη απελευθερώθηκαν περίπου 85 ± 26 PBq (petabecquerel, 10^{15}Bq) ^{137}Cs , κυρίως με τη μορφή μικρών σωματιδίων, τα οποία αποτέλεσαν τη ραδιενεργό επίπτωση (fallout). Η έκρηξη στο Chernobyl εκτόξευσε ραδιενεργά συστατικά στην ατμόσφαιρα σε ύψη πάνω από 1,000 μέτρα (Sloof & Wolterbeek, 1992). Το σχήμα και η σύνθεση των συστατικών, που εκλύθηκαν, συνιστούσαν θερμοκρασίες πάνω από 2,500 °C. Η ραδιενεργός επίπτωση (fallout) από το ατύχημα του Chernobyl εμφανίστηκε στις περισσότερες περιοχές, εξαιτίας των βροχοπτώσεων κατά την πρώτη εβδομάδα μετά την πρώτη έκρηξη. Μεταγενέστερες έρευνες έδειξαν ότι η ένταση των βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια της επίπτωσης μπορεί να έχει αξιοσημείωτο ρόλο και στο βάθος διασποράς του ^{137}Cs στο έδαφος. Επιπλέον, οι τοπικοί άνεμοι και βροχοπτώσεις, που επικρατούσαν στην περιοχή, είχαν σαν

αποτέλεσμα μεγάλες διαφορές στα προβλεπόμενα επίπεδα περιβαλλοντικής ραδιενέργειας από την ραδιενεργό επίπτωση (fallout) (Sloof & Wolterbeek, 1992).

Ένα εξίσου σημαντικό πυρηνικό ατύχημα ήταν αυτό που έλαβε χώρα στην Fukushima στις 11 Μαρτίου το 2011, το οποίο προκλήθηκε από το τσουνάμι, το οποίο ακολούθησε τον σεισμό που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή. Κατά την διάρκεια του ατυχήματος απελευθερώθηκαν μεγάλες ποσότητες ραδιονουκλιδίων στην ατμόσφαιρα και την παράκτια ζώνη (Γιαννάκου, n.d.). Πιο συγκεκριμένα, από την έκρηξη απελευθερώθηκαν 15-20(PBq) Καισίου (^{137}Cs) και η συγκέντρωση του ^{137}Cs στα θαλασσινά νερά αυξήθηκε σε 68(KBq/L), οχτώ τάξεις μεγέθους πάνω από τις παγκόσμιες καταγραφές (Tsumune et al., 2013). Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, το ραδιοκίσιο που προέρχεται από το πυρηνικό σταθμό της Φουκοσίμα μετρήθηκε σε δείγματα θαλάσσιου ύδατος από τον Βόρειο Ειρηνικό Ωκεανό και η συνολική δραστηριότητα εκτιμάται ότι κυμαίνεται στα 15-20(PBq). Αναλυτικότερα, 3-6(PBq) απελευθερώθηκαν απευθείας από το σταθμό λόγω διαρροών μολυσμένου νερού και 10-15(PBq) απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα και κατακάθισαν σε μια ευρεία περιοχή του Βορειοδυτικού Ειρηνικού Ωκεανού (Kumamoto et al., 2019). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η συσσωρευμένη ατμοσφαιρική εναπόθεση του ^{137}Cs είναι της τάξης των 50-200 (kBq/m²) (Tsumune et al., 2013).

Άλλα σοβαρά ατυχήματα συνέβησαν στο Windscale του Ηνωμένου Βασιλείου το 1957 και στο Three Mile Island των ΗΠΑ το 1979. Στα συγκεκριμένα ατυχήματα ελευθερώθηκαν ποσά ραδιενέργειας της τάξεως των TBq. Λιγότερο σοβαρά ατυχήματα συνέβησαν στο Saint Laurent της Γαλλίας το 1980, στο Vandelllos της Ισπανίας το 1989 και στο Sosnowy Bor της Ρωσίας το 1992, όπου το ισοδύναμο δόσης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εκτιμήθηκε στην τάξη των mSv. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η πτώση του δορυφόρου SNAP 9A στον Ινδικό ωκεανό το 1964, κατά την οποία εκλύθηκαν 16,000 Ci (Curie) ^{238}Pu .

1.2.5 Ραδιονουκλεΐδια στα οικοδομικά υλικά

Τα φυσικά ραδιονουκλεΐδια όπως το Κάλιο (^{40}K), το Ράδιο (^{226}Ra) και το Θόριο (^{232}Th) καθώς και τα προϊόντα της ραδιενεργούς διάσπασης του Ραδίου και του Θορίου βρίσκονται παντού στο περιβάλλον και συνεπώς όλα τα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται περιέχουν τα παραπάνω ραδιονουκλεΐδια (Kovler et al., 2002). Τα οικοδομικά υλικά γενικά αποτελούνται από φυσικές πηγές όπως είναι οι πέτρες και τα εδάφη, και μερικά είναι κατασκευασμένα από βιομηχανικά παραπροϊόντα όπως είναι το φωσφορικό οξύ και η ιπτάμενη τέφρα. Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα σωματιδιακό παραπροϊόν της καύσης άνθρακα και τελευταία χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει την άμμο και το σιμέντο για την δημιουργία του σκυροδέματος. Επιπλέον, στην Ελλάδα, η ιπτάμενη τέφρα που παράγεται από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν με λιγνίτη χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή σιμέντου αντικαθιστώντας το σιμέντο κλίνκερ (Papaefthymiou & Gouseti, 2008). Η ιπτάμενη τέφρα στην Ελλάδα προέρχεται κυρίως από την μονάδα ηλεκτροπαραγωγής στην Πτολεμαΐδα (Βόρεια Ελλάδα) και από την μονάδα ηλεκτροπαραγωγής στην Μεγαλούπολη (Νότια Ελλάδα) η οποία μάλιστα χαρακτηρίζεται από μεγάλη ενεργότητα του Ραδίου (^{226}Ra) (Papaefthymiou & Gouseti, 2008). Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως, η παρουσία των φυσικών ραδιονουκλεϊδίων στα οικοδομικά υλικά εξαρτάται από την γεωλογική τους προέλευση και από της γεωχημικές ιδιότητές τους.

Η παρουσία των προαναφερθέντων ραδιονουκλεϊδίων στα οικοδομικά υλικά είναι υπεύθυνη για την εξωτερική και εσωτερική έκθεση που λαμβάνεται από τους ανθρώπους. Η εξωτερική έκθεση προκύπτει από την απευθείας έκθεση στην ακτινοβολία-γ, ενώ η εσωτερική έκθεση προκύπτει ως αποτέλεσμα του ^{226}Ra και ^{232}Th και των προϊόντων της ραδιενεργούς διάσπασης τους (Abdullahi et al., 2019). Οι υψηλές ενεργότητες των ραδιονουκλεϊδίων στα οικοδομικά υλικά είναι υπεύθυνες για την δόση ραδιενέργειας που λαμβάνεται από τους ανθρώπους. Η γνώση των ενεργοτήτων των ραδιονουκλεϊδίων στα οικοδομικά υλικά είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της έκθεσης των ανθρώπων στην ραδιενέργεια καθώς οι περισσότεροι άνθρωποι περνούν περίπου το 80% της ζωής τους σε κλειστούς χώρους. Επιπλέον, η χρόνια έκθεση των ανθρώπων σε μικρές δόσεις ιονίζουσας ραδιενέργειας μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας τα οποία μπορεί να κάνουν την εμφάνιση τους 5 έως 30 χρόνια μετά την έκθεση (Kovler et al., 2002). Το πιο σημαντικό πρόβλημα υγείας που μπορεί να προκληθεί από την έκθεση σε ραδιενέργεια είναι η εμφάνιση κακοηθών νοσημάτων όπως είναι ο καρκίνος. Ο κίνδυνος αυξάνεται όσο μεγαλώνει η δόση που λαμβάνει ο ανθρώπινος οργανισμός, και το ενδεχόμενο εμφάνισης σημαντικής ζημιάς είναι μεγαλύτερο όταν η έκθεση σε ραδιενέργεια ξεκινάει από μικρή ηλικία. Συνεπώς, γίνεται σαφές, πως η ευρεία χρήση παραπροϊόντων, με αυξημένα επίπεδα ραδιενέργειας, ως πρώτες ύλες για τα οικοδομικά υλικά μπορεί να αυξήσει την έκθεση των ανθρώπων σε ραδιενέργεια και επομένως συνιστά ένα πραγματικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία.

Στον παρακάτω πίνακα 1, παρουσιάζονται οι παγκόσμιες μέσες ενεργότητες για φυσικά ραδιονουκλεΐδια στα εδάφη και σε οικοδομικά υλικά (Todorović & Janković, 2011). Ταυτόχρονα, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των ενεργοτήτων των αντίστοιχων ραδιονουκλεϊδίων στα εδαφικά δείγματα των περιοχών μελέτης της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 1: Μέσες παγκόσμιες ενεργότητες φυσικών ραδιονουκλεϊδίων σε εδάφη και οικοδομικά υλικά

| | ²²⁶ Ra (Bq/kg) | ²³² Th (Bq/kg) | ⁴⁰ K (Bq/kg) |
|--|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Παγκόσμιες μέσες τιμές σε εδάφη | 32 | 45 | 420 |
| Παγκόσμιες μέσες τιμές σε οικοδομικά υλικά | 50 | 50 | 500 |
| Λέσβος | 71 | 56 | 493 |
| Χίος | 61 | 32 | 571 |
| Θεσσαλία | 35 | 21 | 402 |

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν

Ο προσδιορισμός των δεικτών Geo-accumulation Index, Enrichment Factor, Pollution Index, External Hazard Index, Radium Equivalent Activity, Dose και Effective Dose, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, έχει σαν σκοπό την πολύπλευρη εκτίμηση του περιβαλλοντικού κινδύνου και της ρύπανσης του περιβάλλοντος που προέρχεται από τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεκριμένοι δείκτες παρέχουν σημαντικές πληροφορίες τόσο για την περιβαλλοντική επιβάρυνση και ρύπανση από τα ραδιονουκλεΐδια που βρίσκονται στα εδαφικά δείγματα, όσο και για τις επιπτώσεις που μπορεί να έχουν αυτά στον άνθρωπο. Οι παρακάτω δείκτες χρησιμοποιούνται ευρέως σε μελέτες της παγκόσμιας βιβλιογραφίας που αφορούν τα βαρέα μέταλλα και τα ραδιονουκλεΐδια και αποτελούν έναν αξιόπιστο μέσο για τον προσδιορισμό της ρύπανσης των υπό μελέτη περιοχών. Ταυτόχρονα, αποτελούν ένα εργαλείο για την για την ανθρώπινη υγεία, καθώς η υπερβολική έκθεση σε ραδιενέργεια μπορεί να προκαλέσει αρκετές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. Τέλος, με την χρήση αυτών των δεικτών, μπορεί να προσδιοριστεί σε μεγάλο βαθμό εάν η πηγή προέλευσης ενός ραδιονουκλεϊδίου είναι φυσική ή ανθρωπογενής.

Geo-accumulation Index (I_{GEO})

Ο δείκτης I_{geo} αποτελεί ένα γενικό κριτήριο για τον υπολογισμό της μόλυνσης των οικοσυστημάτων από βαρέα μέταλλα και ραδιονουκλεΐδια. Πιο συγκεκριμένα με την χρήση του I_{geo} γίνεται η ποσοτικοποίηση της μόλυνσης που προκαλείται από κάθε ραδιονουκλεΐδιο ξεχωριστά. Για τον υπολογισμό του Geo-accumulation Index γίνεται χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_n}{1.5 * B_n}\right)$$

Όπου C_n είναι η μετρημένη συγκέντρωση του κάθε στοιχείου στο έδαφος δειγματοληψίας και B_n η βιβλιογραφική συγκέντρωση του αντίστοιχου στοιχείου στο φλοιό της Γης. Ο συντελεστής 1.5 χρησιμοποιείται για περίπτωση αλλαγής των γεωλογικών χαρακτηριστικών των εδαφών (Abdullah et al., 2016; Stevanović et al., 2018; Yakovlev et al., 2020; Zainal et al., 2016).

Enrichment Factor (EF)

Ο Enrichment Factor αρχικά χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της πηγής του κάθε στοιχείου στην ατμόσφαιρα, στα νερά και στα εδάφη. Ο Enrichment Factor είναι ένας δείκτης για τον υπολογισμό του βαθμού μόλυνσης των εδαφών από βαρέα μέταλλα και ραδιονουκλεΐδια. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί αν η κατανομή των στοιχείων στο υπό μελέτη έδαφος οφείλεται σε ανθρωπογενείς ή φυσικές πηγές. Για τον υπολογισμό του Enrichment Factor γίνεται χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$EF = \frac{(\frac{C_x}{Fe_x})_{\text{sediment}}}{(\frac{C_c}{Fe_c})_{\text{background}}}$$

Όπου $(\frac{C_x}{Fe_x})_{\text{sediment}}$ είναι ο λόγος της συγκέντρωσης του επιμέρους στοιχείου και του σιδήρου στο εδαφικό δείγμα. Το $(\frac{C_c}{Fe_c})_{\text{background}}$ είναι ο λόγος της βιβλιογραφικής συγκέντρωσης του επιμέρους στοιχείου στον φλοιό της Γης και της βιβλιογραφικής συγκέντρωσης του σιδήρου στον φλοιό της Γης (Abdullah et al., 2016; Yakovlev et al., 2020; Zainal et al., 2016).

Pollution Index (PI)

Ο Pollution Index είναι ένας δείκτης μόλυνσης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ποιότητας του περιβάλλοντος. Εξετάζει για το κάθε στοιχείο ξεχωριστά την μόλυνση που υπάρχει στο υπό μελέτη έδαφος. Ο Pollution Index υπολογίζεται κάνοντας χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$PI = \frac{C_x}{C_n}$$

Όπου C_x είναι η συγκέντρωση του στοιχείου στο εδαφικό δείγμα, και C_n η βιβλιογραφική συγκέντρωση του αντίστοιχου στοιχείου στο φλοιό της Γης (Abdullah et al., 2016).

External Hazard Index (H_{EX})

Ο δείκτης External Hazard Index χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κινδύνου από την ακτινοβολία-γ φυσικής προέλευσης. Ο συγκεκριμένος δείκτης υπολογίζεται κάνοντας χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$H_{ex} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810}$$

Όπου C_{Ra} , C_{Th} , και C_K είναι οι ενεργότητες του Ράδιου, του Θορίου και του Καλίου αντίστοιχα, στο εδαφικό δείγμα. Οι τιμές: 370, 259, 4810 είναι συντελεστές και έχουν ίδιες μονάδες μέτρησης με τις ενεργότητες των στοιχείων (Bq/kg). Ο δείκτης External Hazard Index έχει σαν ανώτατο αποδεκτό όριο το 1 (Ćujić et al., 2015; Stevanović et al., 2018; Yakovlev et al., 2020).

Radium equivalent activity (Ra_{eq})

Ο δείκτης Radium equivalent activity χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό του κινδύνου από τα ραδιονουκλεΐδια προς το περιβάλλον και υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1.43 * A_{Th} + 0.077 * A_K$$

Όπου A_{Ra} , A_{Th} , A_K είναι οι ενεργότητες του Ράδιου, του Θωρίου και του Καλίου αντίστοιχα, στο εδαφικό δείγμα. Οι τιμές 1,43 και 0,077 είναι συντελεστές. Ο δείκτης Radium equivalent activity υπολογίζεται σε (Bq/kg) και ως ανώτατο αποδεκτό όριο είναι τα 370 (Bq/kg) (Khalafallah et al., 2019; Stevanović et al., 2018; Yakovlev et al., 2020; Zainal et al., 2016).

Dose (D)

Η δόση της ακτινοβολίας-γ είναι μια θεμελιώδης δοσομετρική τιμή. Ο υπολογισμός της δόσης γίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$D = 0.462 * C_{Ra} + 0.604 * C_{Th} + 0.042 * C_K$$

Όπου C_{Ra} , C_{Th} και C_K είναι οι ενεργότητες του Ράδιου, του Θωρίου και του Καλίου αντίστοιχα σε (Bq/kg), στο εδαφικό δείγμα. Οι μονάδες μέτρησης της δόσης είναι τα (nGy/h) και η μέση τιμή της στον κόσμο είναι τα 55 (nGy/h) (Stevanović et al., 2018; Yakovlev et al., 2020).

Effective Dose (D_E)

Η ενεργή δόση είναι η μετατροπή της δόσης της ακτινοβολίας-γ για τον υπολογισμό της δόσης που εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό. Ο υπολογισμός της ενεργούς δόσης γίνεται με την χρήση του παρακάτω τύπου:

$$D_E = 0.7 * 1750 * D$$

Όπου D είναι η δόση της ακτινοβολίας-γ η οποία υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το 0.7 είναι συντελεστής μετατροπής και έχει μονάδες (Sv/Gy) και το 1,750 έχει μονάδα μέτρησης το χρόνο (h) και είναι ο μέσος χρόνος που περνάει σε εξωτερικό χώρο ο άνθρωπος κατά την διάρκεια ενός έτους (Stevanović et al., 2018; Yakovlev et al., 2020).

Dose Cs (D_{Cs})

Το ^{137}Cs είναι ένα τεχνητό ραδιονουκλεΐδιο και η ύπαρξη του στα εδάφη της Γης οφείλεται μόνο σε ανθρωπογενείς παράγοντες. Για αυτόν τον λόγο ο υπολογισμός της δόσης της ακτινοβολίας-γ που προκύπτει από το ^{137}Cs έχει ιδιαίτερη σημασία και υπολογίζεται ξεχωριστά από την δόση που προκύπτει από τα υπόλοιπα ραδιονουκλεΐδια. Η δόση (D_{Cs}) υπολογίζεται κάνοντας χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$D_{Cs} = a * C_{Cs}$$

Όπου C_{Cs} είναι η ενεργότητα του ^{137}Cs σε (Bq/kg) και a είναι ο ρυθμός της δόσης ανά μονάδα ενεργότητας του ^{137}Cs ο οποίος είναι ίσος με $0.30 * 10^{-10} \frac{\text{Gy}}{\text{Bq} \cdot \frac{\text{h}}{\text{kg}}}$. Η δόση (D_{Cs}) έχει μονάδα μέτρησης τα (nGy/h) (Nenadović et al., 2011).

Effective Dose Cs ($D_{E(Cs)}$)

Η ενεργή δόση του ^{137}Cs είναι η δόση του Καΐσιου η οποία καταλήγει στον ανθρώπινο οργανισμό. Ο υπολογισμός της γίνεται με την χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$D_{E_{Cs}} = 0.7 * 1750 * D_{Cs}$$

Όπου D_{Cs} είναι η δόση της ακτινοβολίας-γ από το Καΐσιο η οποία υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το 0.7 είναι συντελεστής μετατροπής και έχει μονάδες (Sv/Gy) και το 1,750 έχει μονάδα μέτρησης χρόνου (h) και είναι ο μέσος χρόνος που περνάει σε εξωτερικό χώρο ο άνθρωπος εντός ενός έτους (Nenadović et al., 2011).

2.2 Στατιστική Ανάλυση

2.2.1 Πολυμεταβλητή ανάλυση

Πολυμεταβλητή ανάλυση (multivariate analysis) ονομάζεται η στατιστική ανάλυση που εφαρμόζεται ταυτόχρονα σε όλες τις εξεταζόμενες μεταβλητές μιας μελέτης. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των μεθόδων πολυμεταβλητής ανάλυσης είναι αρκετά και αφορούν κυρίως στη δυνατότητα της εύρεσης ενός μοτίβου που περιγράφει τη μεταβολή πολλών μεταβλητών ταυτόχρονα, οι οποίες χαρακτηρίζουν μια περιοχή ή ένα φαινόμενο (Γκρέκα, 2010). Πιο συγκεκριμένα, η κατάταξη-διαίρεση των μεταβλητών σε ομάδες με κοινές ιδιότητες και ο εντοπισμός και η αναγνώριση τάσεων ή χαρακτηριστικών στα δεδομένα αποτελούν δύο σημαντικά πλεονεκτήματα. Επιπρόσθετα, ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι, η εύρεση των κυριότερων χαρακτηριστικών από ένα πλήθος δεδομένων που αφορούν ένα πολύπλοκο πρόβλημα και η παρουσίαση τους στο κοινό με τρόπο ξεκάθαρο και κατανοητό. Η παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών συνήθως περιλαμβάνει και την χρήση δισδιάστατης ή τρισδιάστατης απεικόνισης (Bierman et al., 2011).

Γενικά, υπάρχουν αρκετές πολυδιάστατες/πολυμεταβλητές μέθοδοι ανάλυσης οι οποίες προτείνονται για την ανάλυση χωρικών τάσεων σε δεδομένα που αφορούν εδαφικά δείγματα. Αυτές οι μέθοδοι διαφέρουν ανάλογα με τα ερωτήματα τα οποία έχουν τεθεί στην εκάστοτε μελέτη αλλά και ανάλογα με τα αποτελέσματα στα οποία φτάνουν (Bierman et al., 2011).

2.2.1.1 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών

Η Principal Component Analysis (PCA) είναι μια διερευνητική μέθοδος η οποία μειώνοντας τον αρχικό όγκο δεδομένων αναγνωρίζει πηγές μεταβλητότητας σε πολυκριτηριακά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, με την εφαρμογή της αυτό που επιτυγχάνεται είναι η προβολή του πολυδιάστατου χώρου των δεδομένων σε ένα χώρο λιγότερων διαστάσεων διατηρώντας το μέγιστο δυνατό όγκο της πληροφορίας που υπήρχε στα αρχικά δεδομένα (Γκρέκα, 2010). Το αποτέλεσμα της PCA είναι μια γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ των αντικειμένων ή δειγμάτων σε μια δισδιάστατη ή τρισδιάστατη απεικόνιση και ταυτόχρονα η ομοιότητα μεταξύ τους, καθώς τα πιο όμοια εμφανίζονται γραφικά πιο κοντά το ένα με το άλλο. Επιπλέον, η PCA βρίσκει μεγάλη εφαρμογή σε περιπτώσεις περιβαλλοντικών δεδομένων, όπως είναι τα δεδομένα των ενεργοτήτων των ραδιονουκλεϊδίων σε εδάφη, στα οποία καθιστά πιο απλή την ερμηνεία τους και την συσχέτιση των διαφόρων παραμέτρων τους. Η Principal Component Analysis, για να ερμηνεύσει και να συσχετίσει τα διάφορα δεδομένα, αντικαθιστά τις αρχικές μεταβλητές με τους γραμμικούς συνδυασμούς αυτών, οι οποίοι ονομάζονται κύριες συνιστώσες (Reid & Spencer, 2009).

2.2.2 Pearson's correlation coefficient

Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r είναι ένας από τους σημαντικότερους συντελεστές συσχέτισης και αφορά ποσοτικές μεταβλητές. Επιπλέον, βασίζεται στην έννοια της γραμμικής σχέσης και έχει πάρει το όνομα του από τον Άγγλο μαθηματικό Karl Pearson. Ο Pearson's correlation coefficient υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}}$$

Όπου x_i και y_i οι μεταβλητές οι οποίες εξετάζονται.

Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r δεν έχει μονάδες μέτρησης και λαμβάνει τιμές στο διάστημα $(-1, +1)$. Επομένως για κάθε ζεύγος μεταβλητών, η τιμή του συντελεστή συσχέτισης θα είναι $-1 \leq r \leq 1$. Συντελεστής $r=-1$ ή $r=1$ σημαίνει ότι υπάρχει τέλεια γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών και τα σημεία που ορίζονται από τα ζεύγη των τιμών τους στο διάγραμμα διασποράς βρίσκονται κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής (Γναρδέλλης, 2003). Η τιμή $r=0$ αντιστοιχεί σε ένα νέφος σημείων τα οποία είναι ασυσχέτιστα. Θετικός συντελεστής συσχέτισης σημαίνει ότι οι δύο μεταβλητές είναι θετικά συσχετιζόμενες και οι τιμές και οι τιμές τους μεταβάλλονται προς την ίδια κατεύθυνση, δηλαδή όταν μεγαλώνουν οι τιμές της μίας μεταβλητής μεγαλώνουν και οι τιμές της άλλης μεταβλητής και το αντίστροφο (Γναρδέλλης, 2003). Αρνητικός συντελεστής συσχέτισης σημαίνει αρνητική σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών, δηλαδή όταν αυξάνουν οι τιμές της μίας μεταβλητής μειώνονται οι τιμές της άλλης. Η μηδενική συσχέτιση σημαίνει ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Σε αυτή την περίπτωση, θα μπορούσε να υπάρχει σχέση μεταξύ των δύο εξεταζόμενων μεταβλητών, η οποία όμως δεν είναι γραμμική και για τον λόγο αυτό καταλήγει σε συντελεστή συσχέτισης Pearson $r=0$. Εκτός των χαρακτηριστικών τιμών του συντελεστή συσχέτισης, δηλαδή των $r=\pm 1$ και $r=0$, οι υπόλοιπες τιμές στο διάστημα $(-1, +1)$ ερμηνεύονται με εμπειρικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, τιμές κοντά στη μονάδα, συνήθως μεγαλύτερες του 0.80, θετικές ή αρνητικές ερμηνεύονται ως σχεδόν τέλεια ή πολύ ισχυρή συσχέτιση. Τιμές κοντά στο 0.5 μπορεί να ερμηνευτούν ως μέτρια συσχέτιση, ενώ τιμές κοντά στο μηδέν ως ασθενής συσχέτιση ή απουσία συσχέτισης. Γενικά, για τις τιμές του συντελεστή r που ερμηνεύονται εμπειρικά, η ερμηνεία αυτή μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το αντικείμενο της εκάστοτε μελέτης (Γναρδέλλης, 2003).

2.3 Ανάλυση Χωρικών Δεδομένων

Σύμφωνα με τον (Unwin, 1981), χωρική ανάλυση είναι η μελέτη της κατανομής των σημείων, γραμμών, περιοχών και επιφανειών ενός χάρτη. Οι Bailey and Gatrell (Bailey & Gatrell, 1995) ορίζουν τη χωρική ανάλυση ως την ποσοτική ανάλυση/μελέτη των χωρικών φαινομένων που βρίσκονται στο γεωγραφικό χώρο. Αναγνωρίζοντας την ευρύτητα του όρου χωρική ανάλυση, εξειδικεύουν τη συζήτηση τους στην ανάλυση χωρικών δεδομένων (Τσαούση, 2016). Η ανάλυση χωρικών δεδομένων αφορά τις καταστάσεις στις οποίες είναι διαθέσιμα δεδομένα παρατήρησης για κάποιο φαινόμενο που συμβαίνει στο γεωγραφικό χώρο και εξετάζει μοντέλα, μεθόδους και τεχνικές για να περιγράψει ή να ερμηνεύσει τη συμπεριφορά αυτού του φαινομένου και της πιθανής του σχέσης με άλλα χωρικά φαινόμενα (Τσαούση, 2016). Συνήθως η χωρική ανάλυση πραγματοποιείται με ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS), στο οποίο παρέχονται εργαλεία χωρικής ανάλυσης για τον υπολογισμό στατιστικών χαρακτηριστικών και την εκτέλεση μεθόδων και τεχνικών, όπως είναι η παρεμβολή δεδομένων (Longley & Goodchild, 2005).

2.3.1 Χωρική Παρεμβολή

Η χωρική παρεμβολή αποτελεί μια διαδικασία εκτίμησης της τιμής ενός χαρακτηριστικού σε σημεία που δεν ανήκουν στο δείγμα, με βάση τις μετρήσεις στα σημεία του δείγματος. Πιο συγκεκριμένα, είναι η διαδικασία κατά την οποία εκτιμάται η τιμή μίας παραμέτρου σε άλλες θέσεις της ίδιας περιοχής στις οποίες δεν έχουν γίνει μετρήσεις πεδίου (Καλογήρου, 2015). Η δυσκολία και το πρόβλημα της χωρικής παρεμβολής περιλαμβάνει την ανεύρεση μίας τέτοιας μαθηματικής συνάρτησης, που επιβεβαιώνεται για τα σημεία που υπάρχουν δεδομένα και παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια για την εκτίμηση των τιμών των σημείων, όπου τα πρωτογενή δεδομένα είναι ελλιπή. Με τη χωρική παρεμβολή επιχειρείται η μετατροπή δεδομένων από σημειακές παρατηρήσεις σε συνεχείς επιφάνειες με σκοπό να καταστεί δυνατή η εκτίμηση τιμών σε σημεία στα οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις (Τσαούση, 2016).

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς διαφορετικές μέθοδοι θα παράγουν διαφορετικές χωρικές απεικονίσεις και ενδεχομένως ασαφή γνώση και προσομοίωση του υπό εξέταση φαινομένου. Η χρήση ακατάλληλων μεθόδων ή λανθασμένων παραμέτρων, μπορεί να δώσει ένα στρεβλωμένο μοντέλο χωρικής κατανομής και τελικά να οδηγήσει τον ερευνητή σε λανθασμένες αποφάσεις. Από την άλλη πλευρά, η επιτυχημένη εφαρμογή της κατάλληλης μεθόδου παρεμβολής, επαφίεται στην επαρκή γνώση και σύγκριση των διαθέσιμων μεθόδων, καθώς επίσης και στη γνώση της φύσης και συμπεριφοράς του προσομοιωμένου φαινομένου (Τσαούση, 2016).

Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι χωρικής παρεμβολής, με σκοπό τη βέλτιστη προσέγγιση μίας επιφάνειας από σημειακά δεδομένα και βασίζονται σε θεωρητικές εκτιμήσεις, παραδοχές και περιορισμούς που απαιτείται να πληρούνται ώστε να υπολογιστούν οι τιμές των περιμέτρων χωρίς να παραχθούν λανθασμένα αποτελέσματα. Οι μέθοδοι παρεμβολής ανάλογα με τα θεμελιώδη μαθηματικά στα οποία βασίζονται, χωρίζονται στις ντετερμινιστικές ή αιτιοκρατικές και στις στοχαστικές ή πιθανοθεωρητικές μεθόδους παρεμβολής (Sluiter, 2009).

Οι ντετερμινιστικές μέθοδοι παράγουν μια συνεχή επιφάνεια χρησιμοποιώντας μόνο τα γεωμετρικά ή πολυωνυμικά χαρακτηριστικά των σημειακών μετρήσεων. Παραδείγματα ντετερμινιστικών μεθόδων είναι η μέθοδος του εγγύτερου γείτονα, η μέθοδος τριγωνισμού, η μέθοδος αντίστροφης σταθμισμένης απόστασης (IDW) και η πολυωνυμική μέθοδος παρεμβολής. Επιπλέον, οι ντετερμινιστικές τεχνικές παρεμβολής μπορούν να χωριστούν σε δύο επιμέρους κατηγορίες, τις μεθόδους γενικευμένων προσεγγίσεων (global methods) και τις μεθόδους τοπικών εκτιμήσεων (local methods) (Krivoruchko, 2011).

2.3.1.1 Μέθοδος Σταθμισμένων Αντιστρόφων Αποστάσεων (Inverse Irregular Weighted-IDW)

Η μέθοδος των σταθμισμένων αντιστρόφων αποστάσεων ανήκει στην κατηγορία των ντετερμινιστικών μεθόδων τοπικών εκτιμήσεων. Η IDW αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή της μεθόδου του εγγύτερου γείτονα, καθώς χρησιμοποιεί τιμές μεταβλητών όχι μόνο των γειτονικών σημείων του δείγματος. Αναλυτικότερα, στην IDW μέθοδο παρεμβολής, εφαρμόζεται η παραδοχή ότι τα χαρακτηριστικά των σημείων του δείγματος τα οποία βρίσκονται πιο κοντά το ένα με το άλλο είναι περισσότερο όμοια από ότι τα χαρακτηριστικά εκείνων των σημείων του δείγματος που απέχουν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους. Για να προβλεφθεί η τιμή ενός χαρακτηριστικού ενός σημείου εκτός του δείγματος, η IDW χρησιμοποιεί τις τιμές των σημείων του δείγματος που γειτνιάζουν με το σημείο της περιοχής πρόβλεψης. Τα σημεία εκείνα του δείγματος που εντοπίζονται σε μικρότερη απόσταση από το σημείο πρόβλεψης θα έχουν μεγαλύτερη επιρροή στην προβλεπόμενη τιμή από εκείνα που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση (Τσαούση, 2016).

Με αυτό τον τρόπο, με την μέθοδο IDW γίνεται η υπόθεση ότι η τιμή κάθε σημείου του δείγματος έχει μία επίδραση στις τιμές των χαρακτηριστικών των σημείων εκτός του δείγματος, η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση. Έτσι, τα σημεία του δείγματος που βρίσκονται πιο κοντά στο σημείο πρόβλεψης σταθμίζονται με μεγαλύτερο βάρος από ότι τα σημεία που βρίσκονται σε πιο μακρινή απόσταση από το σημείο πρόβλεψης (Τσαούση, 2016).

Η παρεμβολή με τη μέθοδο των αντιστρόφων σταθμισμένων αποστάσεων, γίνεται με βάση τη σχέση:

$$z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i), \text{ όπου } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Όπου $z(x)$ η τιμή της μεταβλητής στη ζητούμενη απόσταση, $z(x_i)$ οι τιμές-μετρήσεις στα σημεία του δείγματος, n ο αριθμός των σημείων του δείγματος που συμμετέχουν και λ_i τα βάρη σε κάθε σημείο του δείγματος, τα οποία υπολογίζονται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda_i = \frac{d_i^{-k}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-k}}$$

Όπου d_i οι αποστάσεις του σημείου προς εκτίμηση από το κάθε σημείο του δείγματος, k ο συντελεστής επιρροής της απόστασης, ο οποίος συνήθως παίρνει τιμή ίση με 1 ή 2 (Τσαούση, 2016).

3. Μεθοδολογία

3.1 Δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν

Για τον υπολογισμό των δεικτών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού κινδύνου από τα ραδιονουκλεΐδια στα υπό μελέτη εδάφη ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία.

Αρχικά, έγινε χρήση αρχείων shape file για την εισαγωγή των γεωλογικών χαρτών των περιοχών μελέτης (Λέσβος, Χίος, Θεσσαλία) και των σημείων δειγματοληψίας στο ARCGIS. Στην συνέχεια, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες προσδιορίστηκε το είδος του εδάφους σε κάθε σημείο δειγματοληψίας και στις τρεις περιοχές. Για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών δεικτών, έγινε χρήση τιμών υποβάθρου (background) στον φλοιό της Γης για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια σύμφωνα με τον Turekian (Turekian & Wedepohl, 1961). Ανάλογα με το τύπο εδάφους διαφέρει η τιμή υποβάθρου για το κάθε ραδιονουκλεΐδιο και για αυτό τον λόγο ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός του είδους των εδαφών στο κάθε σημείο δειγματοληψίας. Η τιμή υποβάθρου χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των δεικτών I_{GEO} , Enrichment factor και Pollution index.

Οι τιμές των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλεϊδίων σύμφωνα με τον Turekian (Turekian & Wedepohl, 1961) βρίσκονται σε ppm **Πίνακας 27**, ενώ οι μετρήσεις που έχουμε είναι ενεργότητες και μετρούνται σε (Bq/kg). Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η ενεργότητα ενός ραδιοϊσοτόπου αναφέρεται στο «πόσο συχνά διασπάται στη μονάδα του χρόνου» και δεν πρέπει να συγχέεται με την συγκέντρωση. Για αυτό τον λόγο, για τον υπολογισμό των προαναφερθέντων δεικτών, έγινε μετατροπή των ενεργοτήτων σε συγκεντρώσεις σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

→ 1ppm of ^{40}K equal 0,0309 Bq/kg

→ 1ppm of ^{226}Ra equal 11,1 Bq/kg

→ 1ppm of ^{232}Th equal 4,06 Bq/kg

→ 1ppm of ^{238}U equal 12,35 Bq/kg

Όσον αφορά στον υπολογισμό των περιβαλλοντικών δεικτών για το ^{137}Cs δεν βρέθηκε κάποια σχέση για την μετατροπή ενεργότητας Καισίου σε συγκέντρωση Καισίου και έτσι δεν έγινε χρήση των τιμών υποβάθρου σύμφωνα με τον Turekian (Turekian & Wedepohl, 1961). Ωστόσο, για τον υπολογισμό των προαναφερθέντων δεικτών χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή ενεργότητας του Καισίου στον φλοιό της Γης σύμφωνα με το Energy Research and Development Administration of US (ERDA, 1975).

Τέλος, όσον αφορά στον υπολογισμό του Enrichment factor, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα της εργασίας, είναι απαραίτητη η χρήση της συγκέντρωσης του σιδήρου στο εδαφικό δείγμα. Στις μετρήσεις των ενεργοτήτων που είχαμε για τις περιοχές μελέτης δεν υπήρχαν μετρήσεις για το Σίδηρο. Για αυτό τον λόγο, έγινε χρήση τιμών σιδήρου εδαφικού δείγματος από προηγούμενες έρευνες σε εδάφη της Ελλάδας. Πιο συγκεκριμένα, για την Λέσβο έγινε χρήση των τιμών Σιδήρου σύμφωνα με (Tzoraki et al., 2019), ενώ για την Θεσσαλία έγινε χρήση τιμών Σιδήρου σύμφωνα

με (Antoniadis et al., 2019). Τέλος, όσον αφορά στην Χίο, δεν έχει γίνει καμία μέτρηση πεδίου για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του Σιδήρου στο έδαφος και έτσι έγινε χρήση της ίδια τιμής συγκέντρωσης Σιδήρου με την Λέσβο.

Όλοι οι τύποι των δεικτών που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται και αναλύονται στο **Κεφάλαιο 2.1** της παρούσας εργασίας.

3.1.1 Μέθοδος απομακρυσμένου σημείου

Οι περιβαλλοντικοί δείκτες Geo-accumulation Index και Enrichment factor υπολογίστηκαν και με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου. Αναλυτικότερα, για τον υπολογισμό αυτών των δεικτών με την συγκεκριμένη μέθοδο έγινε η χρήση των ίδιων σχέσεων που περιγράφονται και παραπάνω. Σε αντίθεση με την μεθοδολογία που χρησιμοποιούνται βιβλιογραφικές τιμές για τις συγκεντρώσεις των υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδίων και του Σιδήρου, χρησιμοποιούνται τιμές που έχουν προκύψει από τις μετρήσεις των εδαφικών δειγμάτων. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε περιοχή μελέτης, επιλέχθηκε ένα σημείο με κριτήριο την μικρότερη ενεργότητα του Καισίου (^{137}Cs), και για τον υπολογισμό του I_{GEO} και του EF έγινε χρήση των ενεργοτήτων των ραδιονουκλεϊδίων που μετρήθηκαν σε αυτό το σημείο. Για την Λέσβο ως απομακρυσμένο σημείο χρησιμοποιήθηκε η περιοχή της Άντισσας ενώ για την Χίο χρησιμοποιήθηκε η περιοχή του Πελλιναίου. Όσον αφορά στην Θεσσαλία, λόγω της έκτασης της επιλέχθηκαν δύο σημεία αναφοράς, ένα στο ανατολικό μέρος και ένα στο δυτικό. Τα δύο αυτά απομακρυσμένα σημεία είναι η Όσσα (Ανατολικά) και το Φράγμα της λίμνης Πλαστήρα (Δυτικά).

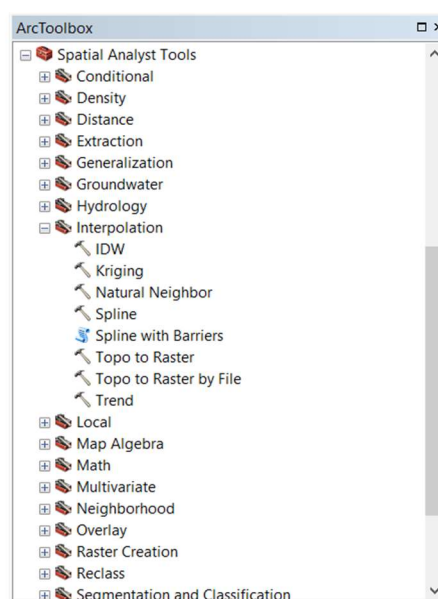
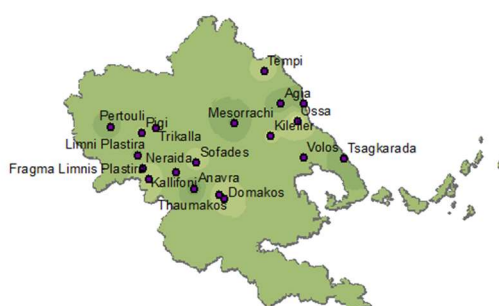
3.2 Χάρτες Κατανομής με μέθοδο IDW με την χρήση GIS

Στην παρούσα εργασία, για την δημιουργία των χαρτών κατανομής με την μέθοδο IDW, έγινε χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Το ArcGIS Desktop αποτελεί μια σουίτα εφαρμογών, που περιλαμβάνει τα ArcMap, ArcCatalog και ArcToolbox. Με συνδυαστική χρήση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε ενέργεια χρειαστεί όσον αφορά τη δημιουργία και την επεξεργασία χαρτών GIS, είτε απλή είτε πολυσύνθετη, όπως χαρτογράφηση, γεωγραφική ανάλυση, επεξεργασία και σύνθεση δεδομένων, απεικόνιση και γεωανάλυση.

Αρχικά, έγινε χρήση αρχείων shape file για την εισαγωγή των γεωλογικών χαρτών των περιοχών μελέτης (Λέσβος, Χίος, Θεσσαλία) στο GIS. Στην συνέχεια, τοποθετήθηκαν στους χάρτες τα σημεία δειγματοληψίας από τις 3 περιοχές μελέτης σύμφωνα με τις συντεταγμένες (ΕΓΣΑ'87) των μετρήσεων. Επιπλέον, έγινε εισαγωγή των μετρήσεων των ενεργοτήτων όλων των ραδιονουκλεϊδίων για κάθε σημείο δειγματοληψίας, οι οποίες αποτελούν και τα δεδομένα για την δημιουργία των χαρτών χωρικής κατανομής.

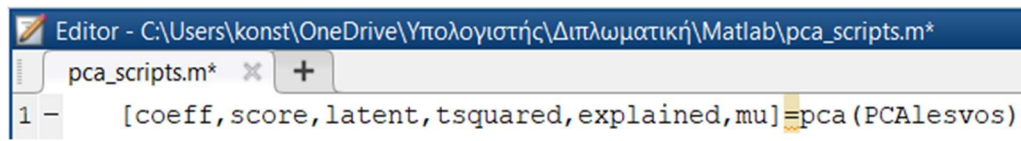
Για την εφαρμογή της μεθόδου των σταθμισμένων αντιστρόφων αποστάσεων έγινε η χρήση του ArcToolbox. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, η σειρά των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι η εξής:

ArcToolbox→Spatial analyst tool→Interpolation→IDW



3.3 Principal Component Analysis με την χρήση MATLAB

Για την πραγματοποίηση της Principal Component Analysis χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό της MATLAB (R2017b). Αρχικά, έγινε η εισαγωγή των μετρήσεων των ενεργοτήτων όλων των ραδιονουκλεϊδίων σε μορφή πινάκων για κάθε περιοχή μελέτης ξεχωριστά. Στην συνέχεια, με την χρήση του κώδικα που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 7**, προέκυψαν οι πίνακες `coeff` και `score` όπως φαίνεται στην **Εικόνα 8** και **Εικόνα 9** αντίστοιχα. Τέλος, με την χρήση του κώδικα που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 10**, προέκυψαν τα διαγράμματα των κύριων συνιστωσών που περιγράφουν την συσχέτιση των υπό μελέτη μεταβλητών.



Εικόνα 7: Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό της Matlab για να προκύψουν οι απαραίτητοι πίνακες για την Principal Component Analysis

```
>> coeff=pca(PCalesvos)

coeff =

    0.1091    0.5119    0.2916    0.6324   -0.4899   -0.0329    0.0078
    0.0565    0.2662    0.1342    0.3886    0.8676    0.0643   -0.0106
    0.0822    0.4100    0.1520   -0.4006   -0.0350    0.7705   -0.2157
    0.0788    0.3847    0.1432   -0.3704    0.0574   -0.5930   -0.5772
    0.0797    0.3927    0.1462   -0.3823    0.0491   -0.2223    0.7875
    0.9826   -0.1723   -0.0690    0.0011   -0.0010    0.0011    0.0002
   -0.0077   -0.4087    0.9095   -0.0733    0.0180    0.0015   -0.0005
```

Εικόνα 8: Πίνακας με τις τιμές coefficient στο λογισμικό της Matlab

score =

| | | | | | | |
|-----------|-----------|----------|----------|----------|---------|---------|
| -364.1629 | -36.2196 | 5.9497 | 7.4026 | 2.1666 | -1.5202 | -0.0752 |
| -484.5754 | 15.4135 | -20.9185 | 1.0096 | -4.5473 | 0.1884 | 0.0188 |
| -453.0221 | 55.6911 | 13.4771 | 10.9954 | -5.0371 | -1.8171 | 0.0369 |
| -363.2844 | -12.3286 | 7.4304 | 15.1927 | -4.2385 | 2.3012 | -0.0416 |
| -73.6802 | -76.6181 | 147.0542 | -3.0775 | 0.0902 | -0.0474 | 0.0107 |
| 129.4127 | 62.4413 | 7.3752 | -10.2522 | 3.5513 | 0.3024 | -0.0756 |
| 273.1042 | 34.8368 | -7.6032 | -3.0924 | -3.5538 | -3.3794 | 0.0152 |
| 686.7589 | 55.5155 | 12.1859 | 39.1421 | 0.6123 | -0.0586 | -0.0187 |
| 76.1709 | -50.1257 | -48.9222 | -2.5179 | -2.8219 | 2.5851 | -0.0306 |
| 170.6093 | 60.1072 | 5.6979 | 4.4784 | 15.3789 | 1.0301 | 0.0363 |
| 112.7509 | -35.1116 | -42.0858 | -1.3299 | 1.2676 | 0.0921 | 0.0093 |
| -67.0820 | -33.7104 | -42.4426 | 3.1847 | 1.7461 | -1.4887 | -0.0015 |
| 607.6707 | -113.8614 | -3.3802 | -10.5370 | 1.0108 | 0.0927 | 0.0675 |
| -432.6114 | -32.8273 | -3.4192 | 7.3995 | 0.8160 | 0.8503 | -0.0166 |
| -452.1656 | 100.5814 | 14.3399 | -28.0003 | 1.5101 | 1.0075 | 0.0443 |
| 130.3137 | -29.9482 | -21.9469 | -24.9344 | 2.2089 | -1.4934 | -0.0768 |
| 730.4690 | 64.2463 | 14.4471 | -12.9709 | -10.1793 | 1.3132 | 0.0016 |
| -226.6764 | -28.0824 | -37.2388 | 7.9073 | 0.0190 | 0.0416 | 0.0959 |

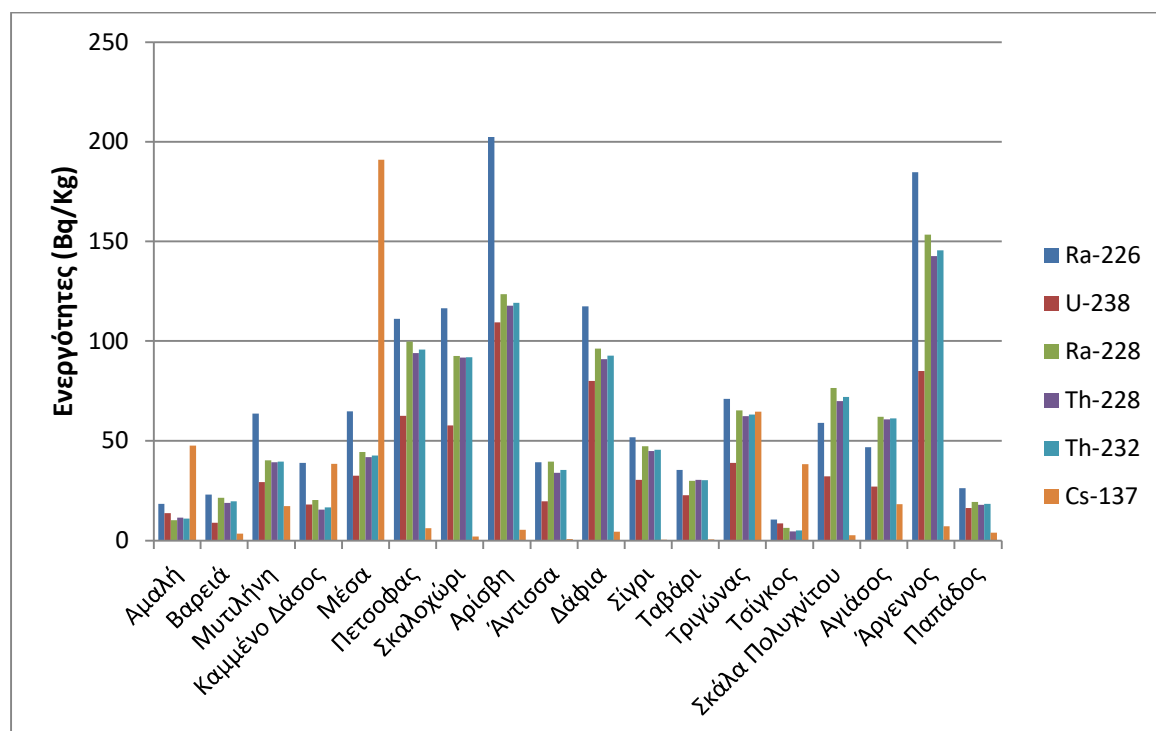
Εικόνα 9: Πίνακας με τις τιμές score στο λογισμικό της Matlab

```
Command Window
fx >> biplot(coeff(:,1:2), 'scores', score(:,1:2), 'varlabels', {'Ra226', 'U238', 'Ra228', 'Th228', 'Th232', 'K40', 'Cs137'});
```

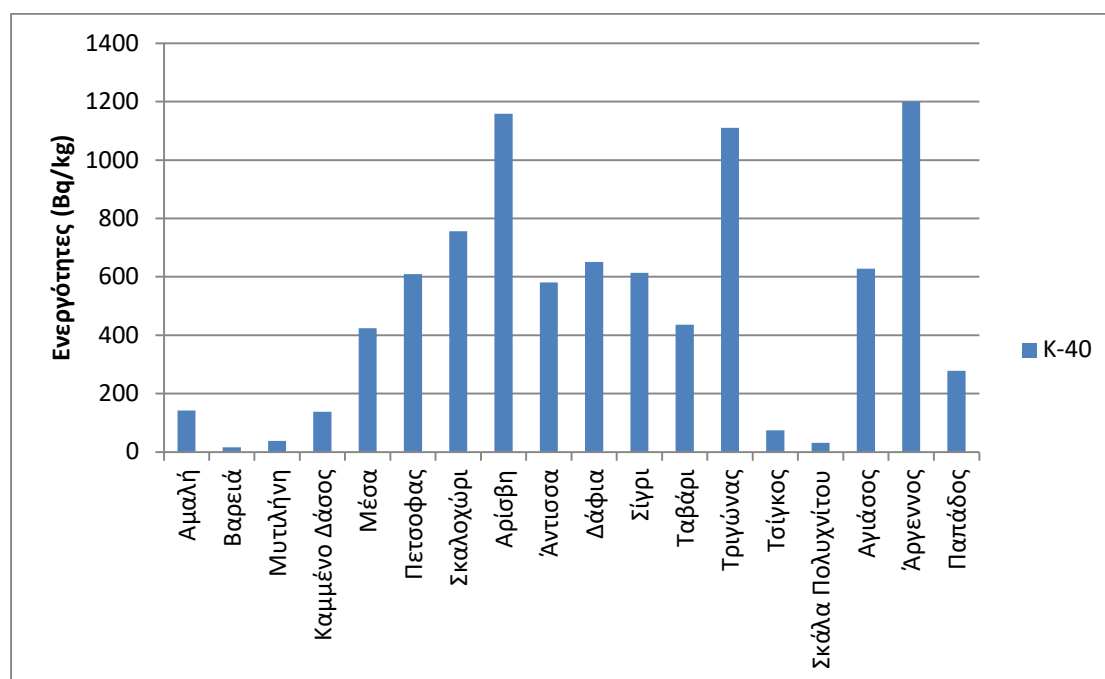
Εικόνα 10: Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό της Matlab για να προκύψουν οι γραφικές παραστάσεις για την PCA

4. Αποτελέσματα

Λέσβος

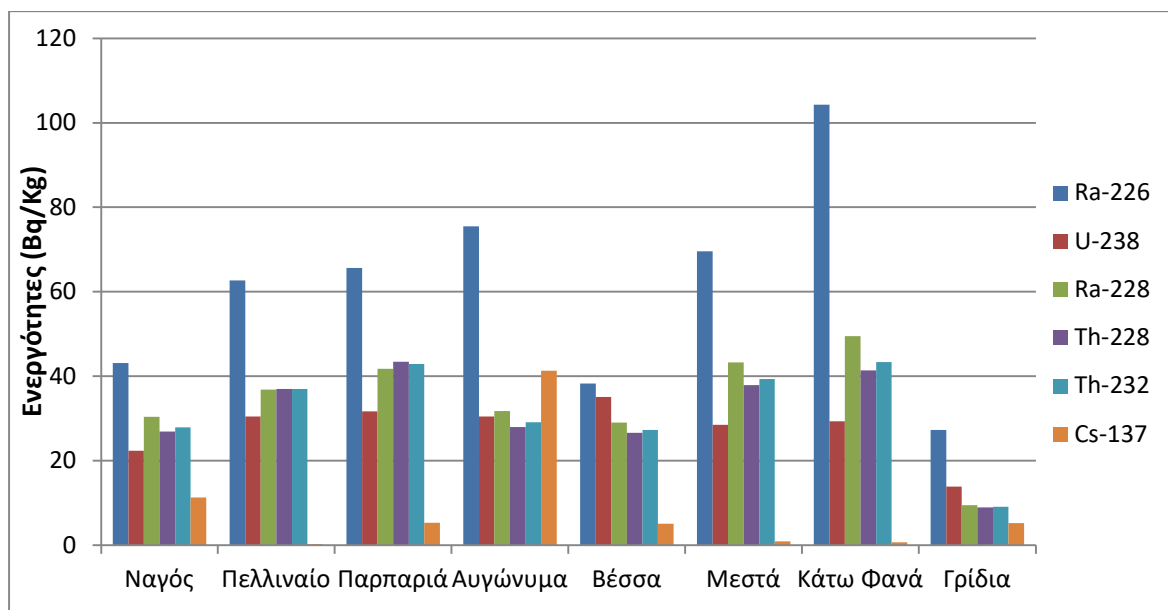


Εικόνα 11: Διάγραμμα των ενεργοτήτων των ραδιονουκλεϊδίων στην Λέσβο

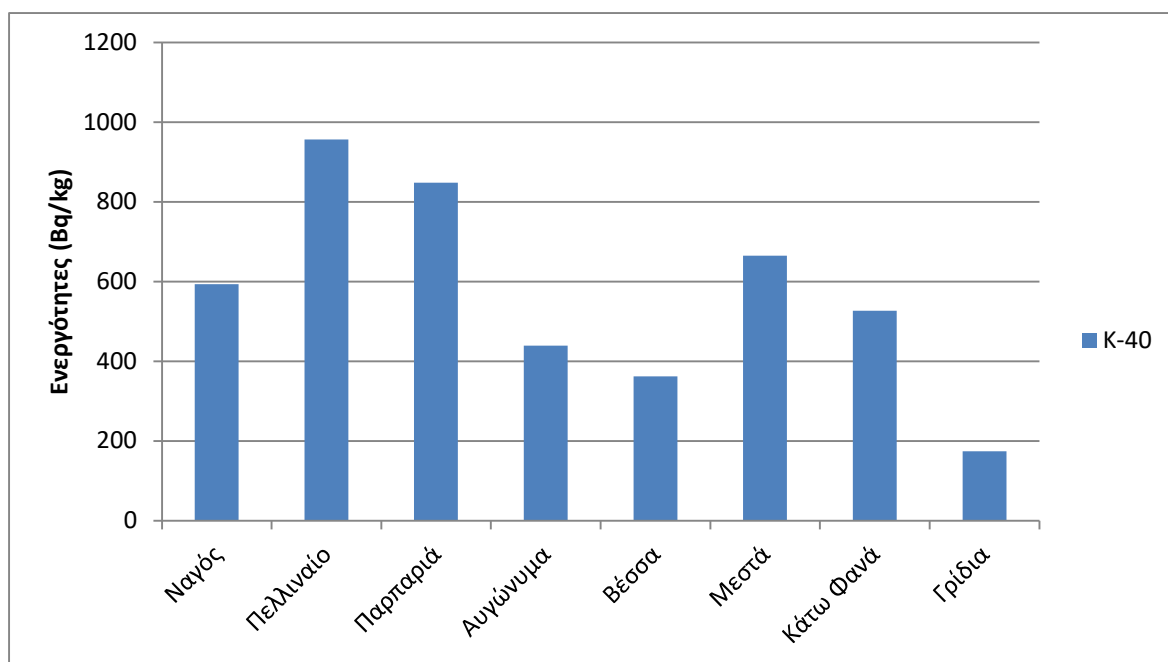


Εικόνα 12: Διάγραμμα των ενεργοτήτων του Καλίου στην Λέσβο

Χίος

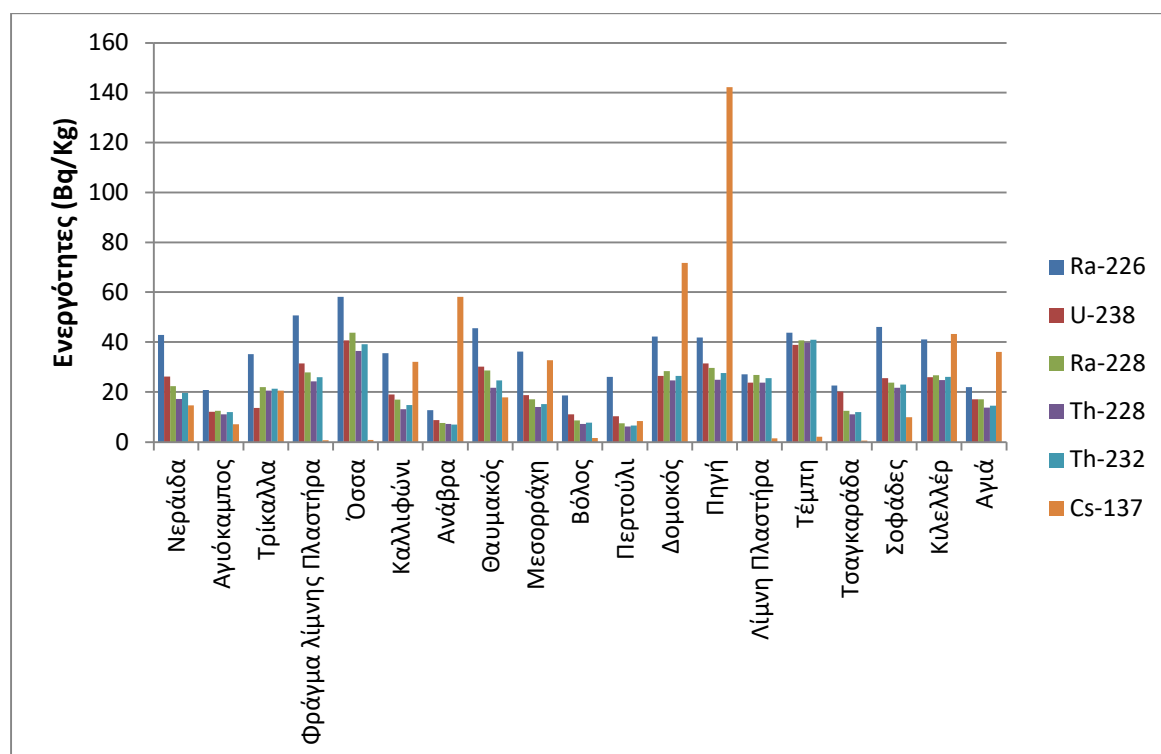


Εικόνα 13: Διάγραμμα των ενεργοτήτων των ραδιονουκλεϊδίων στην Χίο

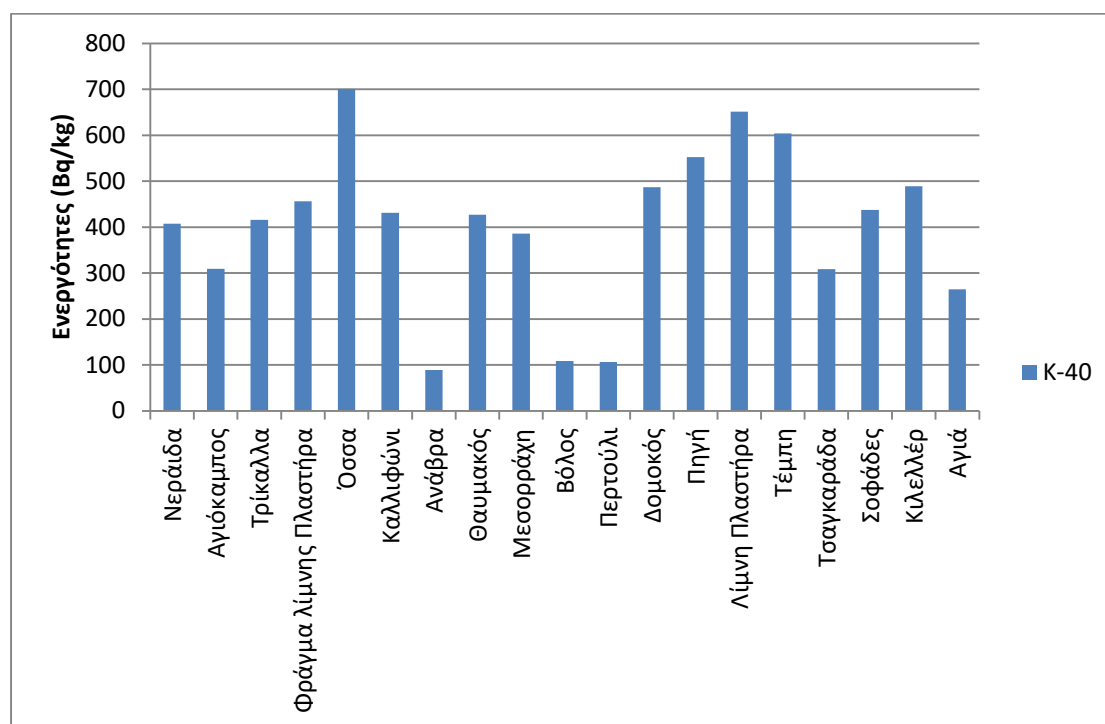


Εικόνα 14: Διάγραμμα των ενεργοτήτων του Καλίου στην Χίο

Θεσσαλία



Εικόνα 15: Διάγραμμα των ενεργοτήτων των ραδιονουκλεϊδίων στην Θεσσαλία



Εικόνα 16: Διάγραμμα των ενεργοτήτων του Καλίου στην Θεσσαλία

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται οι ενεργότητες των υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδίων για τις περιοχές της Λέσβου, της Χίου και της Θεσσαλίας.

Όσον αφορά στην Λέσβο, οι μεγαλύτερες ενεργότητες για τα ^{226}Ra και ^{238}U βρέθηκαν στο εδαφικό δείγμα της Αρίσβης, οι μεγαλύτερες ενεργότητες για τα ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K στο εδαφικό δείγμα της Άργεννου ενώ η μεγαλύτερη ενεργότητα για το ^{137}Cs παρατηρήθηκε στα Μέσα. Οι μικρότερες τιμές ενεργοτήτων για τα ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K βρέθηκαν στο εδαφικό δείγμα του Τσίγκου ενώ η μικρότερη τιμή για το ^{137}Cs βρέθηκε στο Σίγρι.

Στην Χίο, τα ^{226}Ra , ^{228}Ra και ^{232}Th παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας στο εδαφικό δείγμα των Κάτω Φανών, το ^{238}U στο εδαφικό δείγμα της Βέσσας, το ^{228}Th στο εδαφικό δείγμα της Παρπαριάς, το ^{40}K στην περιοχή του Πελλιναίου και το ^{137}Cs στα Αυγώνυμα. Όσον αφορά στις μικρότερες τιμές ενεργότητας, για όλα τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια με εξαίρεση το Καΐσιο, βρέθηκαν στο εδαφικό δείγμα των Γριδίων. Η μικρότερη τιμή ενεργότητας για το ^{137}Cs παρατηρήθηκε στο Πελλιναίο.

Στην Θεσσαλία, στο εδαφικό δείγμα της Όσσας, παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες τιμές ενεργοτήτων για τα ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra και ^{40}K . Ακόμη, οι μεγαλύτερες ενεργότητες για τα ^{228}Th και ^{232}Th βρέθηκαν στο εδαφικό δείγμα των Τεμπών ενώ η μεγαλύτερη τιμή ενεργότητας για το ^{137}Cs βρέθηκε στην περιοχή της Πηγής. Οι μικρότερες τιμές ενεργοτήτων για τα ^{226}Ra , ^{238}U και ^{40}K βρέθηκαν στο εδαφικό δείγμα του Καλλιφώνιου, οι μικρότερες τιμές για τα ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th βρέθηκαν στο Περτούλι ενώ το εδαφικό δείγμα στην περιοχή της Τσαγκαράδας παρουσίασε την μικρότερη τιμή για το ^{137}Cs .

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, οι τιμές των ενεργοτήτων του Καλίου στις εξεταζόμενες περιοχές, είναι αρκετά μεγαλύτερες συγκριτικά με τις ενεργότητες των υπόλοιπων φυσικών ραδιονουκλεϊδίων. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας, το Κάλιο είναι το όγδοο σε αφθονία στοιχείο του γήινου φλοιού με εκτιμώμενη συγκέντρωση 1.84%, και ως εκ τούτου οι μεγαλύτερες ενεργότητες που παρουσιάζει στα εδάφη της Ελλάδας είναι φυσιολογικές. Οι λόγοι για τους οποίους το Κάλιο βρίσκεται σε αφθονία στην φύση είναι οι εξής. Αρχικά, ενσωματώνεται εύκολα μέσα στο πλέγμα των αργιλικών ορυκτών λόγω του μεγάλου του μεγέθους. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης διαλυτότητάς του εμφανίζεται σαν απλό κατιόν K^+ σε όλη την έκταση ευστάθειας των φυσικών υδάτων. Τέλος, άλλος ένας λόγος που το Κάλιο παρουσιάζει μεγάλες τιμές ενεργότητας είναι ότι αποτελεί σημαντικό στοιχείο της βιόσφαιρας και προσλαμβάνεται εύκολα από τους φυτικούς οργανισμούς. Οι αυξημένες τιμές ενεργότητας του Καλίου, στις εξεταζόμενες περιοχές της Ελλάδας, έρχονται σε συμφωνία με τις παγκόσμιες μέσες τιμές ενεργότητας Καλίου ανά τον κόσμο.

4.1 Geo-accumulation Index (I_{GEO})

Για την **Λέσβο** οι τιμές του Geo-accumulation Index βρίσκονται στον **Πίνακα 9**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ²²⁶Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,774** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **1,085** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **0,289**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 9**, παρατηρούμε πως για τις εξής περιοχές: Αμαλή, Καμμένο Δάσος, Τσίγος, Σκάλα Πολυχνίτου, Αγιάσος και Παπάδος ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**. Επιπλέον, οι περιοχές Αρίσβη και Άργεννος που παρουσιάζουν τιμή I_{GEO} λίγο μεγαλύτερη από 1, χαρακτηρίζονται ως **“Moderately contaminated”**. Όλες οι υπόλοιπες περιοχές της Λέσβου έχουν δείκτη I_{GEO} για το ²²⁶Ra από 0 έως 1 και χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ²³⁸U έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,908** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,771** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,014**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 9**, παρατηρούμε πως για τις εξής περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Καμμένο Δάσος, Τριγώνας, Τσίγος, Σκάλα Πολυχνίτου, Αγιάσος και Παπάδος ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**. Όλες οι υπόλοιπες περιοχές της Λέσβου έχουν δείκτη I_{GEO} για το ²³⁸U από 0 έως 1 και χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ²²⁸Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-1,063** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,799** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **0,063**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 9**, παρατηρούμε πως για τις εξής περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Καμμένο Δάσος, Τριγώνας, Τσίγος, Αγιάσος και Παπάδος ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**. Όλες οι υπόλοιπες περιοχές της Λέσβου έχουν δείκτη I_{GEO} για το ²²⁸Ra από 0 έως 1 και χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ²²⁸Th έχει μικρότερη τιμή ίση με **-1,212** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,768** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **0,030**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 9**, παρατηρούμε πως για τις εξής περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Καμμένο Δάσος, Τριγώνας, Τσίγος, Σκάλα Πολυχνίτου, Αγιάσος και Παπάδος ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**. Όλες οι υπόλοιπες περιοχές της Λέσβου έχουν δείκτη I_{GEO} για το ²²⁸Th από 0 έως 1 και χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ²³²Th έχει μικρότερη τιμή ίση με **-1,169** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,776** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **0,040**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 9**, παρατηρούμε πως για τις εξής περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Καμμένο Δάσος, Τριγώνας, Τσίγος, Σκάλα Πολυχνίτου, Αγιάσος και Παπάδος ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**. Όλες οι υπόλοιπες περιοχές της

Λέσβου έχουν δείκτη I_{GEO} για το ^{232}Th από 0 έως 1 και χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{40}K έχει μικρότερη τιμή ίση με **-1,376** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,494** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,300**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 9**, παρατηρούμε πως για τις εξής περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Μυτιλήνη, Καμμένο Δάσος, Μέσα, Τριγώνας, Τσίγος, Σκάλα Πολυχνίτου και Παπάδος ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**. Όλες οι υπόλοιπες περιοχές της Λέσβου έχουν δείκτη I_{GEO} για το ^{40}K από 0 έως 1 και χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{137}Cs έχει μικρότερη τιμή ίση με **-2,304** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,390** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-1,039**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 9**, παρατηρούμε πως για τις όλες περιοχές της Λέσβου, εκτός από την Μέσα, ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**. Όσον αφορά την Μέσα, ο δείκτης I_{GEO} υπολογίστηκε ίσος με 0,390 και έτσι χαρακτηρίζεται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Για την **Χίο** οι τιμές του Geo-accumulation Index βρίσκονται στον **Πίνακα 15**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{226}Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,128** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,455** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **0,131**. Στα Γρίδια η τιμή του I_{GEO} υπολογίστηκε ίση με **-0,128** και έτσι η περιοχή χαρακτηρίζεται ως **“Uncontaminated”**. Για όλες τις υπόλοιπες περιοχές της Χίου, ο δείκτης I_{GEO} για το ^{226}Ra έχει τιμή από 0 έως 1 και έτσι χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{238}U έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,469** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,065** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,238**. Για όλες της περιοχές δειγματοληψίας της Χίου ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και όλες οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{228}Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,298** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,679** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **0,265**. Για το Πελλιναίο, την Παρπαριά και τα Γρίδια οι τιμές του I_{GEO} για το ^{228}Ra προέκυψαν αρνητικές άρα οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**. Στα υπόλοιπα σημεία δειγματοληψίας της Χίου, ο δείκτης I_{GEO} έχει τιμή από 0 έως 1 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{228}Th έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,296** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,602** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **0,229**. Για το Πελλιναίο, την Παρπαριά και τα Γρίδια οι τιμές του I_{GEO} για το ^{228}Th προέκυψαν αρνητικές άρα οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**. Στα υπόλοιπα σημεία δειγματοληψίας της Χίου, ο δείκτης I_{GEO} έχει τιμή από 0 έως 1 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{232}Th έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,296** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,622** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **0,240**. Για το Πελλιναίο, την

Παρπαριά και τα Γρίδια οι τιμές του I_{GEO} για το ^{232}Th προέκυψαν αρνητικές άρα οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**. Στα υπόλοιπα σημεία δειγματοληψίας της Χίου, ο δείκτης I_{GEO} έχει τιμή από 0 έως 1 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{40}K έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,162** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,726** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **0,363**. Για το Πελλιναίο και την Παρπαριά οι τιμές του I_{GEO} για το ^{40}K προέκυψαν αρνητικές άρα οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**. Στα υπόλοιπα σημεία δειγματοληψίας της Χίου, ο δείκτης I_{GEO} έχει τιμή από 0 έως 1 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{137}Cs έχει μικρότερη τιμή ίση με **-2,555** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,274** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-1,404**. Για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Χίου, οι τιμές του I_{GEO} για το ^{137}Cs προέκυψαν αρνητικές και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**.

Για την **Θεσσαλία** οι τιμές του Geo-accumulation Index βρίσκονται στον **Πίνακα 21**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{226}Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,686** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,100** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,202**. Στις περιοχές: Πηγή, Τέμπη, και Σοφάδες η τιμή του δείκτη I_{GEO} είναι από 0 έως 1 και οι συγκεκριμένες περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**. Σε όλες τις άλλες περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας οι τιμές του δείκτη I_{GEO} για το ^{226}Ra προέκυψαν αρνητικές και έτσι οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{238}U έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,891** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,020** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,448**. Για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας, οι τιμές του I_{GEO} για το ^{238}U προέκυψαν αρνητικές και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{228}Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,995** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,595** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,303**. Στις περιοχές: Τρίκαλλα, Καλλιφώνι, Πηγή, Τέμπη, και Σοφάδες η τιμή του δείκτη I_{GEO} είναι από 0 έως 1 και οι συγκεκριμένες περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**. Σε όλες τις άλλες περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας οι τιμές του δείκτη I_{GEO} για το ^{228}Ra προέκυψαν αρνητικές και έτσι οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{228}Th έχει μικρότερη τιμή ίση με **-1,071** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,585** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,368**. Στις περιοχές: Τρίκαλλα, Καλλιφώνι, Πηγή, Τέμπη, και Σοφάδες η τιμή του δείκτη I_{GEO} είναι από 0 έως 1 και οι συγκεκριμένες περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**. Σε όλες τις άλλες περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας οι τιμές του δείκτη I_{GEO} για το ^{228}Th προέκυψαν αρνητικές και έτσι οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{232}Th έχει μικρότερη τιμή ίση με **-1,044** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,597** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,338**. Στις περιοχές: Τρίκαλλα, Καλλιφώνι, Πηγή, Τέμπη, και Σοφάδες η τιμή του δείκτη I_{GEO} είναι από 0 έως 1 και οι

συγκεκριμένες περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**. Σε όλες τις άλλες περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας οι τιμές του δείκτη I_{GEO} για το ^{232}Th προέκυψαν αρνητικές και έτσι οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{40}K έχει μικρότερη τιμή ίση με **-1,141** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,683** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,232**. Στις περιοχές: Τρίκαλλα, Καλλιφώνι, Πηγή, Τέμπη, και Σοφάδες η τιμή του δείκτη I_{GEO} είναι από 0 έως 1 και οι συγκεκριμένες περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**. Σε όλες τις άλλες περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας οι τιμές του δείκτη I_{GEO} για το ^{40}K προέκυψαν αρνητικές και έτσι οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{137}Cs έχει μικρότερη τιμή ίση με **-2,191** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,262** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,915**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 21**, παρατηρούμε πως για τις όλες περιοχές της Θεσσαλίας, εκτός από την Πηγή, ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**. Όσον αφορά την Πηγή, ο δείκτης I_{GEO} υπολογίστηκε ίσος με 0,262 και έτσι χαρακτηρίζεται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

4.2 Enrichment Factor (EF)

Για την **Λέσβο** οι τιμές του Enrichment Factor βρίσκονται στον **Πίνακα 10**.

Σύμφωνα με τον **Πίνακα 31**, γίνεται ο χαρακτηρισμός του εμπλουτισμού των εδαφών από το κάθε ραδιονουκλίδιο σε όλες τις περιοχές δειγματοληψίας.

Ο **Enrichment factor**, για το ^{226}Ra , έχει τιμή μικρότερη του 2 για τις περιοχές: Αμαλή, Τσίγκος και Παπάδος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”** ενώ για τις περιοχές: Καμμένο Δάσος, Σκάλα Πολυχνίτου και Αγιάσος έχει τιμή από 2 έως 5, και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”**. Επιπρόσθετα, για τις περιοχές: Βαρειά, Άντισσα, Ταβάρι και Τριγώνας ο Enrichment factor για το ^{226}Ra παίρνει τιμές από 5 έως 20 και οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Severe enrichment”**, ενώ οι περιοχές: Μυτιλήνη, Μέσα και Σίγρι παρουσιάζουν **“Very severe enrichment”** καθώς έχουν τιμές EF από 20 έως 40. Τέλος, ο Enrichment factor έχει τιμή μεγαλύτερη του 40 για τις περιοχές: Πέτσοφας, Σκαλοχώρι, Αρίσβη, Δάφια και Άργεννος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Extreme enrichment”**.

Ο **Enrichment factor**, για το ^{238}U , έχει τιμή μικρότερη του 2 για τις περιοχές: Αμαλή, Καμμένο Δάσος, Τσίγκος, Αγιάσος και Παπάδος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”** ενώ για τις περιοχές: Βαρειά, Σκάλα Πολυχνίτου και Τριγώνας έχει τιμή από 2 έως 5, και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”**. Επιπρόσθετα, για τις περιοχές: Μυτιλήνη, Μέσα, Άντισσα, Σίγρι και Ταβάρι ο Enrichment factor για το ^{238}U παίρνει τιμές από 5 έως 20 και οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Severe enrichment”**, ενώ οι περιοχές: Πέτσοφας, Σκαλοχώρι, Δάφια και Άργεννος παρουσιάζουν **“Very severe enrichment”** καθώς έχουν τιμές EF από 20 έως 40. Τέλος, ο Enrichment factor έχει τιμή μεγαλύτερη του 40 για την Αρίσβη και έτσι χαρακτηρίζεται από **“Extreme enrichment”**.

Ο **Enrichment factor**, για τα ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th έχει τιμή μικρότερη του 2 για τις περιοχές: Αμαλή, Καμμένο Δάσος, Τσίγκος και Παπάδος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”** ενώ για τις περιοχές: Τρίγωνας, Σκάλα Πολυχνίτου και Αγιάσος έχει τιμή από 2 έως 5, και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”**. Επιπρόσθετα, για τις περιοχές: Βαρειά, Μυτιλήνη, Μέσα, Άντισσα, Σίγρι και Ταβάρι ο Enrichment factor για τα παραπάνω ραδιονουκλείδια παίρνει τιμές από 5 έως 20 και οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Severe enrichment”**, ενώ οι περιοχές: Πέτσοφας, Σκαλοχώρι και Δάφια παρουσιάζουν **“Very severe enrichment”** καθώς έχουν τιμές EF από 20 έως 40. Τέλος, ο Enrichment factor έχει τιμή μεγαλύτερη του 40 για τις περιοχές: Αρίσβη και Άργεννος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Extreme enrichment”**.

Ο **Enrichment factor**, για το ^{40}K , έχει τιμή μικρότερη του 2 για τις περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Μυτιλήνη, Καμμένο Δάσος, Τσίγκος, Σκάλα Πολυχνίτου και Παπάδος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”** ενώ για τις περιοχές: Τριγώνας και Αγιάσος έχει τιμή από 2 έως 5, και έτσι οι περιοχές αυτές

χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”**. Επιπρόσθετα, για τις περιοχές: Μέσα, Πέτσοφας, Σκαλοχώρι, Άντισσα, Δάφια, Σίγρι και Ταβάρι ο Enrichment factor για το ^{40}K παίρνει τιμές από 5 έως 20 και οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Severe enrichment”**. Τέλος, οι περιοχές: Αρίσβη και Άργεννος παρουσιάζουν **“Very severe enrichment”** καθώς έχουν τιμές EF από 20 έως 40.

Ο **Enrichment factor** για το ^{137}Cs , σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 10**, έχει τιμή από 2 έως 5 για τις περιοχές: Καμμένο Δάσος, Τριγώνας και Τσίγκος. Για αυτό τον λόγο οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”**. Για την περιοχή της Μέσας, ο Enrichment factor για το ^{137}Cs , έχει τιμή από 20 έως 40 και έτσι η περιοχή χαρακτηρίζεται από **“Very severe enrichment”**. Τέλος, όλες οι υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της Λέσβου, χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”** καθώς ο Enrichment factor υπολογίστηκε μικρότερος του 2.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον Enrichment factor, αρκετές περιοχές της Λέσβου φαίνεται να έχουν πολύ εμπλουτισμένα εδάφη από τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια παρουσιάζοντας τιμές του EF μεγαλύτερες και από 40.

Για την **Χίο** οι τιμές του Enrichment Factor βρίσκονται στον **Πίνακα 16**.

Ο **Enrichment factor** για τα ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K έχει τιμή μικρότερη του 2 για τις περιοχές: Ναγός, Αυγώνυμα, Βέσσα, Μεστά, Κάτω Φανά και Γρίδια. Έτσι, σύμφωνα με τον **Πίνακα 31** οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”**. Επιπλέον, για το Πελινναίο και την Παρπαριά, ο EF έχει τιμή από 2 έως 5 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”**.

Ο **Enrichment factor** για το ^{137}Cs , σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 16**, για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Χίου έχει τιμή μικρότερη του 2. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές του EF βρίσκονται πολύ κοντά στο μηδέν και έτσι όλες οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”**.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως για όλες τις περιοχές της Χίου από τις οποίες λήφθηκε εδαφικό δείγμα, ο εμπλουτισμός από τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια είναι μικρός.

Για την **Θεσσαλία** οι τιμές του Enrichment Factor βρίσκονται στον **Πίνακα 22**.

Ο **Enrichment factor**, για το ^{226}Ra , για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας, εκτός από την περιοχή της Όσσας, έχει τιμή μικρότερη του 2 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”**. Όσον αφορά την Όσσα, χαρακτηρίζεται από **“Moderate enrichment”** καθώς έχει τιμή για τον Enrichment factor από 2 έως 5.

Ο **Enrichment factor** για τα ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K έχει τιμή μικρότερη του 2 για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας. Έτσι, όλες οι περιοχές για τις οποίες συλλέχθηκε εδαφικό δείγμα, χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”** όσον αφορά τα προαναφερθέντα ραδιονουκλείδια.

Ο **Enrichment factor**, για το ^{137}Cs , για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας, εκτός από την περιοχή του Δομοκού, έχει τιμή μικρότερη του 2 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από “**Minor enrichment**”. Όσον αφορά τον Δομοκό, χαρακτηρίζεται από “**Moderate enrichment**” καθώς έχει τιμή για τον Enrichment factor από 2 έως 5.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως για όλες τις περιοχές της Θεσσαλίας από τις οποίες λήφθηκε εδαφικό δείγμα, ο εμπλουτισμός από τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια είναι μικρός.

4.3 Δείκτες με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

4.3.1 Geo-accumulation Index (I_{GEO})

Για την **Λέσβο** οι τιμές του Geo-accumulation Index για το απομακρυσμένο σημείο βρίσκονται στον **Πίνακα 11**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{226}Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,754** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,537** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,038**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 11**, παρατηρούμε πως για τις εξής περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Καμμένο Δάσος, Άντισσα, Σίγρι, Ταβάρι, Τσίγκος, Αγιάσος και Παπάδος ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**. Επιπλέον, όλες οι υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας στην Λέσβο έχουν δείκτη I_{GEO} για το ^{226}Ra από 0 έως 1 και χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{238}U έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,540** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,571** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **0,007**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 11**, παρατηρούμε πως για τις εξής περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Μυτιλήνη, Καμμένο Δάσος, Άντισσα, Ταβάρι, Τσίγκος, Αγιάσος και Παπάδος ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**. Όλες οι υπόλοιπες περιοχές της Λέσβου έχουν δείκτη I_{GEO} για το ^{238}U από 0 έως 1 και χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{228}Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,973** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,412** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,138**. Για το ^{228}Th έχει μικρότερη τιμή ίση με **-1,054** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,449** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,103**. Όσον αφορά το ^{232}Th ο δείκτης I_{GEO} έχει μικρότερη τιμή **-1,028** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,439** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,112**. Για τα τρία προαναφερθέντα ραδιονουκλείδια στις περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Μυτιλήνη, Καμμένο Δάσος, Μέσα, Άντισσα, Σίγρι, Ταβάρι, Τσίγκος και Παπάδος ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**. Όλες οι υπόλοιπες περιοχές της Λέσβου έχουν δείκτη I_{GEO} για τα ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th από 0 έως 1 και χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{40}K έχει μικρότερη τιμή ίση με **-1,730** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,139** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,486**. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 11**, παρατηρούμε πως για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Λέσβου εκτός από την Αρίσβη, τον Τριγώνα και την Άργεννο ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”**. Όσον αφορά την Αρίσβη, τον Τριγώνα και την Άργεννο ο δείκτης I_{GEO} για το ^{40}K υπολογίστηκε από 0 έως 1 και οι προαναφερθέντες περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**.

Για την **Χίο** οι τιμές του Geo-accumulation Index για το απομακρυσμένο σημείο βρίσκονται στον **Πίνακα 17**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{226}Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,537** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,045** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,222**. Στα Κάτω Φανά η τιμή του I_{GEO} υπολογίστηκε ίση με 0,045 και έτσι η περιοχή χαρακτηρίζεται ως **“Uncontaminated to moderately contaminated”**. Για όλες τις υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της Χίου, ο δείκτης I_{GEO} για το ^{226}Ra έχει τιμή μικρότερη από 0 και έτσι οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{238}U έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,519** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,115** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,232**. Επίσης, ο δείκτης I_{GEO} για το ^{228}Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,765** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,048** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,250**. Για το ^{228}Th έχει μικρότερη τιμή **-0,793** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,107** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,288**. Όσον αφορά το ^{232}Th ο δείκτης I_{GEO} έχει μικρότερη τιμή **-0,785** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,107** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,277**. Τέλος, για το ^{40}K ο δείκτης I_{GEO} έχει μικρότερη τιμή **-0,916** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,176** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,448**. Για όλα τα προαναφερθέντα ραδιονουκλείδια σε όλες περιοχές δειγματοληψίας της Χίου, ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**.

Για την **Θεσσαλία** οι τιμές του Geo-accumulation Index για το απομακρυσμένο σημείο βρίσκονται στον **Πίνακα 23**.

Ο δείκτης I_{GEO} για το ^{226}Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,777** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,176** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,390**. Ακόμη, ο δείκτης I_{GEO} για το ^{238}U έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,744** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,176** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,405**. Επίσης, ο δείκτης I_{GEO} για το ^{228}Ra έχει μικρότερη τιμή ίση με **-0,883** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,149** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,410**. Για το ^{228}Th έχει μικρότερη τιμή **-0,881** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,139** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,418**. Όσον αφορά το ^{232}Th ο δείκτης I_{GEO} έχει μικρότερη τιμή **-0,883** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,148** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,417**. Τέλος, για το ^{40}K ο δείκτης I_{GEO} έχει μικρότερη τιμή **-0,986** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **-0,022** ενώ η μέση τιμή του δείκτη είναι ίση με **-0,369**. Για όλα τα προαναφερθέντα ραδιονουκλείδια σε όλες περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας, ο δείκτης I_{GEO} έχει αρνητική τιμή και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως **“Uncontaminated”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 30**.

4.3.2 Enrichment Factor (EF)

Για την **Λέσβο** οι τιμές του Enrichment Factor για το απομακρυσμένο σημείο βρίσκονται στον **Πίνακα 12**.

Σύμφωνα με τον **Πίνακα 31**, γίνεται ο χαρακτηρισμός του εμπλουτισμού των εδαφών από το κάθε ραδιονουκλίδιο σε όλες τις περιοχές δειγματοληψίας.

Ο **Enrichment factor**, για το ^{226}Ra , έχει τιμή μικρότερη του 2 για τις περιοχές: Αμαλή και Τσίγκος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”** ενώ για τις περιοχές: Βαρειά, Καμμένο Δάσος, Αγιάσος και Παπάδος έχει τιμή από 2 έως 5, και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”**. Επιπρόσθετα, για τις περιοχές: Μυτιλήνη, Μέσα, Άντισσα, Σίγρι, Ταβάρι, Τριγώνας, Σκάλα Πολυχνίτου, Πέτσοφας, Σκαλοχώρι και Δάφια ο Enrichment factor για το ^{226}Ra παίρνει τιμές από 5 έως 20 και οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Severe enrichment”**. Τέλος, ο Enrichment factor έχει τιμή από 20 έως 40 για την Αρίσβη και την Άργεννο και οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Very severe enrichment”**.

Ο **Enrichment factor**, για το ^{238}U , έχει τιμή μικρότερη του 2 για την περιοχή του Τσίγκου και έτσι ο Τσίγκος χαρακτηρίζεται από **“Minor enrichment”** ενώ για τις περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Καμμένο Δάσος, Αγιάσος και Παπάδος έχει τιμή από 2 έως 5, και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”**. Επιπρόσθετα, για τις περιοχές: Μυτιλήνη, Μέσα, Πέτσοφας, Σκαλοχώρι, Άντισσα, Σίγρι, Ταβάρι, Τριγώνας και Σκάλα Πολυχνίτου ο Enrichment factor για το ^{238}U παίρνει τιμές από 5 έως 20 και οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Severe enrichment”**. Τέλος, ο Enrichment factor έχει τιμή από 20 έως 40 για την Αρίσβη, την Δάφια και την Άργεννο και οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Very severe enrichment”**.

Ο **Enrichment factor**, για τα ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th έχει τιμή μικρότερη του 2 για τις περιοχές: Αμαλή, Καμμένο Δάσος, Τσίγκος και Παπάδος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”** ενώ για τις περιοχές: Βαρειά, Ταβάρι και Αγιάσος έχει τιμή από 2 έως 5, και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”**. Επιπρόσθετα, για τις περιοχές: Μυτιλήνη, Μέσα, Πέτσοφας, Σκαλοχώρι, Αρίσβη, Άντισσα, Δάφια, Σίγρι, Τριγώνας και Σκάλα Πολυχνίτου ο Enrichment factor για τα παραπάνω ραδιονουκλείδια παίρνει τιμές από 5 έως 20 και οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Severe enrichment”**. Τέλος, ο Enrichment factor έχει τιμή από 20 έως 40 για την Άργεννο και η περιοχή χαρακτηρίζεται από **“Very severe enrichment”**.

Ο **Enrichment factor**, για το ^{40}K , έχει τιμή μικρότερη του 2 για τις περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Μυτιλήνη, Καμμένο Δάσος, Τσίγκος, Σκάλα Πολυχνίτου και Παπάδος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”** ενώ για τις περιοχές: Μέσα, Ταβάρι και Αγιάσος έχει τιμή από 2 έως 5, και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”**. Τέλος, για όλες τις υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της Λέσβου ο Enrichment factor για το ^{40}K παίρνει τιμές από 5 έως 20 και οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Severe enrichment”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 31**.

Για την **Χίο** οι τιμές του Enrichment Factor για το απομακρυσμένο σημείο βρίσκονται στον **Πίνακα 18**.

Για όλα τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια (^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K), για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Χίου εκτός από το Πελλιναίο και την Παρπαριά, ο **Enrichment factor** έχει τιμή μικρότερη του 2 και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”**. Όσον αφορά το Πελλιναίο και την Παρπαριά, ο EF έχει τιμή από 2 έως 5 για τα παραπάνω ραδιονουκλεΐδια, και έτσι οι περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Moderate enrichment”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 31**.

Για την **Θεσσαλία** οι τιμές του Enrichment Factor για το απομακρυσμένο σημείο βρίσκονται στον **Πίνακα 24**.

Για τα ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th , για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας στην Θεσσαλία, ο Enrichment factor έχει τιμή μικρότερη του 2 και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”**.

Ο **Enrichment factor**, για το ^{40}K , σε όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας εκτός από την Λίμνη Πλαστήρα, υπολογίστηκε μικρότερος του 2 και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Minor enrichment”**. Όσον αφορά την περιοχή της Λίμνης Πλαστήρα, η τιμή του EF είναι από 2 έως 5 για το ^{40}K , και έτσι χαρακτηρίζεται από **“Moderate enrichment”**.

4.4 Pollution Index

Για την **Λέσβο** οι τιμές του Pollution Index βρίσκονται στον **Πίνακα 14**.

Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 32**, γίνεται ο χαρακτηρισμός της μόλυνσης των εδαφών από το κάθε ραδιονουκλίδιο σε όλες τις περιοχές δειγματοληψίας.

Ο **Pollution index**, για το ^{226}Ra , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,252 (Τσίγκος)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **18,237 (Αρίσβη)**. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 14**, ο Pollution index έχει τιμή μικρότερη του 1 για τις περιοχές: Αμαλή, Καμμένο Δάσος, Τσίγκος και Παπάδος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”**. Επίσης οι περιοχές: Βαρειά, Τριγώνας και Αγιάσος χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”** καθώς ο PI για το ^{226}Ra υπολογίστηκε από 1 έως 3 στις περιοχές αυτές. Τέλος, ο Pollution index για όλες τις υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της Λέσβου έχει τιμή μεγαλύτερη του 3 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“High pollution”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για το ^{238}U , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,185 (Τσίγκος)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **8,857 (Αρίσβη)**. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 14**, ο Pollution index έχει τιμή μικρότερη του 1 για τις περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Καμμένο Δάσος, Τριγώνας, Τσίγκος, Αγιάσος και Παπάδος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”**. Επίσης οι περιοχές: Μυτιλήνη, Μέσα, Άντισσα, Σίγρι, Ταβάρι και Σκάλα Πολυχνίτου χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”** καθώς ο PI για το ^{238}U υπολογίστηκε από 1 έως 3 στις περιοχές αυτές. Τέλος, ο Pollution index για τις περιοχές: Πέτσοφας, Σκαλοχώρι, Αρίσβη, Δάφια και Άργεννος έχει τιμή μεγαλύτερη του 3 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“High pollution”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για τα ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th παρουσιάζει μικρότερη τιμή στην περιοχή του Τσίγκου ενώ μεγαλύτερη τιμή στην περιοχή της Αρίσβης. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 14**, ο Pollution index έχει τιμή μικρότερη του 1 για τις περιοχές: Αμαλή, Καμμένο Δάσος, Τσίγκος και Παπάδος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”**. Επίσης οι περιοχές: Βαρειά, Μυτιλήνη, Μέσα, Άντισσα, Σίγρι, Ταβάρι, Τριγώνας και Αγιάσος χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”** καθώς ο PI για τα παραπάνω ραδιονουκλείδια υπολογίστηκε από 1 έως 3 στις περιοχές αυτές. Τέλος, ο Pollution index για όλες τις υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της Λέσβου έχει τιμή μεγαλύτερη του 3 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“High pollution”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για το ^{40}K , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,063 (Βαρειά)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **4,676 (Άργεννος)**. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 14**, ο Pollution index έχει τιμή μικρότερη του 1 για τις περιοχές: Αμαλή, Βαρειά, Μυτιλήνη, Καμμένο Δάσος, Τσίγκος, Σκάλα Πολυχνίτου, Αγιάσος και Παπάδος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”**. Επίσης οι περιοχές: Μέσα, Πέτσοφας, Σκαλοχώρι, Άντισσα, Δάφια, Σίγρι, Ταβάρι και Τριγώνας χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”** καθώς ο PI για το ^{40}K υπολογίστηκε από 1 έως 3 στις περιοχές αυτές. Τέλος, ο Pollution index για όλες τις υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της

Λέσβου έχει τιμή μεγαλύτερη του 3 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“High pollution”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για το ^{137}Cs , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,008 (Σίγγρι)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **3,714 (Μέσα)**. Για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Λέσβου, εκτός από τον Τριγώνα και την Μέσα, ο Pollution index έχει τιμή μικρότερη του 1 και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”**. Όσον αφορά τον Τριγώνα, ο PI υπολογίστηκε ίσος με 1,258 και η περιοχή χαρακτηρίζεται από **“Middle pollution”**, ενώ για την Μέσα ο PI έχει τιμή 3,714 και η περιοχή χαρακτηρίζεται από **“High pollution”** για το ^{137}Cs .

Για την **Χίο** οι τιμές του Pollution Index βρίσκονται στον **Πίνακα 20**.

Ο **Pollution index**, για το ^{226}Ra , έχει μικρότερη τιμή ίση με **1,118 (Γρίδια)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **4,272 (Κάτω Φανά)**. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 20**, ο Pollution index έχει τιμή από 1 έως 3 για τις περιοχές: Ναγός, Πελλιναίο, Παρπαριά, Βέσσα και Γρίδια και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”**. Επίσης, οι περιοχές: Αυγώνυμα, Μεστά και Κάτω Φανά χαρακτηρίζονται από **“High pollution”** καθώς η τιμή του PI για τις περιοχές αυτές υπολογίστηκε μεγαλύτερη από 3.

Ο **Pollution index**, για το ^{238}U , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,510 (Γρίδια)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **1,290 (Βέσσα)**. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 20**, ο Pollution index έχει τιμή μικρότερη του 1 για τις περιοχές: Ναγός, Πελλιναίο, Παρπαριά και Γρίδια και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”**. Επιπλέον, οι περιοχές: Αυγώνυμα, Βέσσα, Μεστά και Κάτω Φανά χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”** καθώς η τιμή του PI για τις περιοχές αυτές υπολογίστηκε από 1 έως 3.

Ο **Pollution index**, για τα ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th παρουσιάζει μικρότερη τιμή στην περιοχή του Πελλιναίου ενώ μεγαλύτερη τιμή στην περιοχή των Κάτω Φανών. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 20**, ο Pollution index έχει τιμή μικρότερη του 1 για τις περιοχές: Πελλιναίο και Παρπαριά και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”**. Επίσης, τα Γρίδια χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”** καθώς η τιμή του PI για τα παραπάνω ραδιονουκλεΐδια υπολογίστηκε από 1 έως 3. Τέλος, ο Pollution index για όλες τις υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της Χίου έχει τιμή μεγαλύτερη του 3 και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“High pollution”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για το ^{40}K , έχει μικρότερη τιμή ίση με **1,032 (Παρπαριά)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **7,973 (Μεστά)**. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 20**, ο Pollution index έχει τιμή από 1 έως 3 για τις περιοχές: Πελλιναίο, Παρπαριά και Γρίδια και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”**. Επιπλέον, για όλες τις υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της Χίου, ο Pollution index για το ^{40}K έχει τιμή μεγαλύτερη από 3 και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“High pollution”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για το ^{137}Cs , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,004 (Πελλιναίο)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **0,804 (Αυγώνυμα)**. Για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Χίου ο PI για το ^{137}Cs υπολογίστηκε μικρότερος από 1 και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”**.

Για την **Θεσσαλία** οι τιμές του Pollution Index βρίσκονται στον **Πίνακα 26**.

Ο **Pollution index**, για το ^{226}Ra , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,309 (Ανάβρα)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **1,888 (Σοφάδες)**. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 26**, ο Pollution index έχει τιμή μικρότερη του 1 για τις περιοχές: Αγίοκαμπος, Ανάβρα, Μεσορράχη, Βόλος, Περτούλι, Λίμνη Πλαστήρα, Τσαγκαράδα και Αγιά και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”**. Ο Pollution index για τις υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας έχει τιμή από 1 έως 3 και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για το ^{238}U , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,193 (Ανάβρα)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **1,432 (Τέμπη)**. Για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας, εκτός από την Πηγή και τα Τέμπη, ο Pollution index έχει τιμή μικρότερη του 1 και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”**. Όσον αφορά την Πηγή και τα Τέμπη, οι τιμές του PI για το ^{238}U υπολογίστηκαν από 1 έως 3 και έτσι οι προαναφερθέντες περιοχές χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για το ^{228}Ra , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,152 (Περτούλι)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **5,897 (Τέμπη)**. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 26**, ο Pollution index έχει τιμή από 1 έως 3 για τις περιοχές: Καλλιφώνι και Βόλος και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”**. Επίσης, οι περιοχές: Τρίκαλλα, Πηγή, Τέμπη και Σοφάδες έχουν τιμή PI, για το ^{228}Ra , μεγαλύτερη από 3 και χαρακτηρίζονται από **“High pollution”**. Τέλος, όλες οι υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας έχουν Pollution index μικρότερο από 1 και έτσι χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για τα ^{228}Th και ^{232}Th , παρουσιάζει μικρότερη τιμή για το Περτούλι ενώ μεγαλύτερη τιμή για τα Τέμπη. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 26**, ο Pollution index έχει τιμή από 1 έως 3 για τις περιοχές: Καλλιφώνι, Βόλος και Τρίκαλλα και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από **“Middle pollution”**. Επίσης, οι περιοχές: Πηγή, Τέμπη και Σοφάδες έχουν τιμή PI, για τα παραπάνω ραδιονουκλεΐδια, μεγαλύτερη από 3 και χαρακτηρίζονται από **“High pollution”**. Τέλος, όλες οι υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας έχουν Pollution index μικρότερο από 1 και έτσι χαρακτηρίζονται από **“Low pollution”** σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για το ^{40}K , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,109 (Ανάβρα)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **7,236 (Τέμπη)**. Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 26**, ο Pollution index έχει τιμή από 1 έως 3 για την περιοχή του Βόλου και έτσι χαρακτηρίζεται από **“Middle pollution”**. Επίσης, οι περιοχές: Τρίκαλλα, Καλλιφώνι, Πηγή, Τέμπη και Σοφάδες έχουν τιμή PI, για το ^{40}K , μεγαλύτερη από 3 και χαρακτηρίζονται από **“High pollution”**. Τέλος, όλες οι υπόλοιπες περιοχές

δειγματοληψίας της Θεσσαλίας έχουν Pollution index μικρότερο από 1 και έτσι χαρακτηρίζονται από “**Low pollution**” για το ^{40}K σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Ο **Pollution index**, για το ^{137}Cs , έχει μικρότερη τιμή ίση με **0,010 (Τσαγκαράδα)** και μεγαλύτερη τιμή ίση με **2,767 (Πηγή)**. Για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας, εκτός από την Ανάβρα, την Δομοκό και την Πηγή, ο Pollution index έχει τιμή μικρότερη του 1 και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από “**Low pollution**”. Όσον αφορά την Ανάβρα, την Δομοκό και την Πηγή η τιμή του PI, για το ^{137}Cs , έχει τιμή από 1 έως 3 και έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από “**Middle pollution**” σύμφωνα με τον **Πίνακα 32**.

Οι τιμές των H_{ex} , Ra_{eq} , D , De , $D_{(Cs)}$, $De_{(Cs)}$ για την Λέσβο, την Χίο και την Θεσσαλία βρίσκονται στους **Πίνακες: 13, 19 και 25** αντίστοιχα.

4.5 External Hazard Index (H_{ex})

Στην **Λέσβο** οι τιμές του **External Hazard Index** είναι από **0,063** έως **1,310** ενώ η μέση τιμή του είναι ίση με **0,510**. Η μικρότερη τιμή του H_{ex} βρέθηκε στην περιοχή του **Τσίγκου** ενώ η μεγαλύτερη τιμή στην **Αργεννο**. Αξίζει να σημειωθεί, πως στην **Αργεννο** και στην **Αρίσβη** οι τιμές του H_{ex} που υπολογίστηκαν ίσες με **1,310** και **1,248** αντίστοιχα, βρίσκονται εκτός του αποδεκτού ορίου για τον H_{ex} που είναι ίσο με **1**. Αντιθέτως, για όλες τις υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας στην Λέσβο οι δείκτες H_{ex} είναι μικρότεροι της μονάδας.

Στην **Χίο** οι τιμές του **External Hazard Index** είναι από **0,145** έως **0,559** ενώ η μέση τιμή του είναι ίση με **0,406**. Η μικρότερη τιμή του H_{ex} βρέθηκε στα **Γρίδια** ενώ η μεγαλύτερη τιμή στα **Κάτω Φανά**. Για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Χίου οι δείκτες H_{ex} που υπολογίστηκαν έχουν τιμή μικρότερη της μονάδας και άρα βρίσκονται εντός του βιβλιογραφικού ορίου.

Στην **Θεσσαλία** οι τιμές για τον H_{ex} έχουν εύρος τιμών από **0,080** έως **0,454** ενώ η μέση τιμή είναι ίση με **0,258**. Η μικρότερη τιμή του H_{ex} βρέθηκε στην **Ανάβρα** ενώ η μεγαλύτερη τιμή υπολογίστηκε για την περιοχή της **Όσσας**. Για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας οι δείκτες H_{ex} έχουν τιμή μικρότερη της μονάδας και βρίσκονται εντός του βιβλιογραφικού ορίου.

Στις τρεις διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας που μελετήθηκαν όλες οι τιμές για τον δείκτη H_{ex} βρέθηκαν μικρότερες της μονάδας με εξαίρεση δύο περιοχές δειγματοληψίας στην Λέσβο. Κάτι τέτοιο σημαίνει, ότι ο κίνδυνος που προκύπτει από την ακτινοβολία-γ φυσικής προέλευσης είναι πολύ μικρός για τις υπό μελέτη περιοχές. Παγκόσμιες τιμές του External Hazard Index βρίσκονται στον **Πίνακα 2**.

4.6 Radium equivalent activity (Ra_{eq})

Στην **Λέσβο** οι τιμές του **Radium equivalent activity** είναι από **23,179(Bq/kg)** έως **485,072(Bq/kg)** ενώ η μέση τιμή του είναι ίση με **188,917(Bq/kg)**. Η μικρότερη τιμή του Ra_{eq} βρέθηκε στην περιοχή του **Τσίγκου** ενώ η μεγαλύτερη τιμή στην **Αργεννο**. Αξίζει να σημειωθεί, πως στην **Αργεννο** και στην **Αρίσβη** οι τιμές του Ra_{eq} που υπολογίστηκαν ίσες με **485,072(Bq/kg)** και **462,039(Bq/kg)** αντίστοιχα, βρίσκονται εκτός του αποδεκτού ορίου για τον δείκτη Ra_{eq} που είναι ίσο με **370(Bq/kg)**. Αντιθέτως, για όλες τις υπόλοιπες περιοχές δειγματοληψίας στην Λέσβο οι δείκτες Ra_{eq} είναι μικρότεροι του ανώτατου αποδεκτού ορίου.

Στην **Χίο** οι τιμές του **Radium equivalent activity** είναι από **53,716(Bq/kg)** έως **206,887(Bq/kg)** ενώ η μέση τιμή του είναι ίση με **150,461(Bq/kg)**. Η μικρότερη τιμή του Ra_{eq} βρέθηκε στα **Γρίδια** ενώ η μεγαλύτερη τιμή στα **Κάτω Φανά**. Για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Χίου οι δείκτες Ra_{eq} που υπολογίστηκαν έχουν τιμή μικρότερη των **370(Bq/kg)** και άρα βρίσκονται εντός του βιβλιογραφικού ορίου.

Στην **Θεσσαλία** οι τιμές του **Radium equivalent activity** είναι από **29,432(Bq/kg)** έως **168,210(Bq/kg)** ενώ η μέση τιμή του είναι ίση με **95,484(Bq/kg)**. Η μικρότερη

τιμή του Ra_{eq} βρέθηκε στα **Ανάβρα** ενώ η μεγαλύτερη τιμή υπολογίστηκε για την περιοχή της **Όσσας**. Για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας οι δείκτες Ra_{eq} που υπολογίστηκαν έχουν τιμή μικρότερη των **370(Bq/kg)** και άρα βρίσκονται εντός του βιβλιογραφικού ορίου.

Στις τρεις διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας που μελετήθηκαν όλες οι τιμές για τον δείκτη Ra_{eq} βρέθηκαν μικρότερες των 370(Bq/kg) με εξαίρεση δύο περιοχές δειγματοληψίας στην Λέσβο. Ως συμπέρασμα προκύπτει, πως ο περιβαλλοντικός κίνδυνος που προκύπτει από τα ραδιονουκλεΐδια, που μετρήθηκαν στα εδαφικά δείγματα, είναι πολύ μικρός. Παγκόσμιες τιμές του Ra_{eq} βρίσκονται στον **Πίνακα 2**.

4.7 Dose (D)

Στην **Λέσβο** οι τιμές της **δόσης** που υπολογίστηκαν είναι από **10,883(nGy/h)** έως **223,204(nGy/h)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **87,141(nGy/h)**. Η μικρότερη τιμή της δόσης προέκυψε για την περιοχή του **Τσίγκου** ενώ η μεγαλύτερη τιμή της **Αργεννίου**.

Στην **Χίο** οι τιμές της δόσης που υπολογίστηκαν είναι από **25,368(nGy/h)** έως **96,354(nGy/h)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **71,197(nGy/h)**. Η μικρότερη τιμή της δόσης υπολογίστηκε για τα **Γρίδια** ενώ η μεγαλύτερη τιμή για τα **Κάτω Φανά**.

Στην **Θεσσαλία** οι τιμές της δόσης που υπολογίστηκαν είναι από **13,755(nGy/h)** έως **79,784(nGy/h)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **45,411(nGy/h)**. Η μικρότερη τιμή της δόσης προέκυψε στα **Ανάβρα** ενώ η μεγαλύτερη τιμή στην **Όσσα**.

Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται οι τιμές των δόσεων που υπολογίστηκαν σε άλλες παγκόσμιες μελέτες. Συγκρίνοντας τις μέσες τιμές της δόσης που υπολογίστηκαν για τις περιοχές της Λέσβου, της Χίου και της Θεσσαλίας με τις βιβλιογραφικές τιμές της δόσης καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα. Αρχικά, όσον αφορά στην Θεσσαλία η μέση τιμή της δόσης βρέθηκε μικρότερη από τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές. Αντιθέτως, για τις περιοχές της Λέσβου και της Χίου, η μέση τιμή της δόσης βρέθηκε υψηλότερη από τις περισσότερες μελέτες αλλά και από την παγκόσμια μέση τιμή δόσης που είναι τα **55(nGy/h)**. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές της δόσης που προέκυψαν στις δύο αυτές περιοχές, έχουν παρόμοια τιμή με την δόση που υπολογίστηκε για την περιοχή του Obrenovac στην Σερβία (Ćujić et al., 2015). Η συγκεκριμένη περιοχή της Σερβίας είναι ηφαιστειογενείς και τα εδάφη της περιέχουν σε μεγάλο βαθμό ανθρακικές ενώσεις. Ως εκ τούτου, τα εδαφικά χαρακτηριστικά της Λέσβου και της Χίου παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με τα εδαφικά χαρακτηριστικά του Obrenovac στην Σερβία.

4.8 Effective Dose (D_E)

Στην **Λέσβο** οι τιμές της **Effective dose** που υπολογίστηκαν είναι από **13,347($\mu\text{Sv/y}$)** έως **273,737($\mu\text{Sv/y}$)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **106,869($\mu\text{Sv/y}$)**. Η μικρότερη τιμή της δόσης προέκυψε για την περιοχή του **Τσίγκου** ενώ η μεγαλύτερη τιμή της **Αργεννίου**.

Στην **Χίο** οι τιμές της **Effective dose** που υπολογίστηκαν είναι από **31,111($\mu\text{Sv/y}$)** έως **118,168($\mu\text{Sv/y}$)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **87,316($\mu\text{Sv/y}$)**. Η μικρότερη τιμή της δόσης υπολογίστηκε για τα **Γρίδια** ενώ η μεγαλύτερη τιμή για τα **Κάτω Φανά**.

Στην **Θεσσαλία** οι τιμές της **Effective dose** που υπολογίστηκαν είναι από **16,869($\mu\text{Sv/y}$)** έως **97,848($\mu\text{Sv/y}$)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **55,692($\mu\text{Sv/y}$)**. Η μικρότερη τιμή της δόσης προέκυψε στα **Ανάβρα** ενώ η μεγαλύτερη τιμή στην **Όσσα**.

Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται οι τιμές των δραστικών δόσεων που υπολογίστηκαν σε άλλες μελέτες. Συγκρίνοντας τις μέσες τιμές της **effective dose** που υπολογίστηκαν για τις περιοχές της Λέσβου, της Χίου και της Θεσσαλίας με τις βιβλιογραφικές τιμές της **effective dose** καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα. Αρχικά, όσον αφορά στην Θεσσαλία η μέση τιμή της δραστικής δόσης βρέθηκε μικρότερη από τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές. Αντιθέτως, για τις περιοχές της Λέσβου και της Χίου, η μέση τιμή της δραστικής δόσης βρέθηκε υψηλότερη από τις περισσότερες μελέτες αλλά και από την παγκόσμια μέση τιμή δόσης που είναι τα **70,000($\mu\text{Sv/y}$)** (UNSCEAR, 2000).

4.9 Dose Cs (D_{Cs})

Στην **Λέσβο** οι τιμές της **δόσης Καισίου** που υπολογίστηκαν είναι από **0,012(nGy/h)** έως **5,727(nGy/h)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **0,752(nGy/h)**. Η μικρότερη τιμή της δόσης Καισίου προέκυψε για το **Σίγρι** ενώ η μεγαλύτερη τιμή για τα **Μέσα**.

Στην **Χίο** οι τιμές της **δόσης Καισίου** που υπολογίστηκαν είναι από **0,007(nGy/h)** έως **1,240(nGy/h)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **0,262(nGy/h)**. Η μικρότερη τιμή της δόσης Καισίου υπολογίστηκε για το **Πελλιναίο** ενώ η μεγαλύτερη τιμή για τα **Αυγώνυμα**.

Στην **Θεσσαλία** οι τιμές της **δόσης Καισίου** που υπολογίστηκαν είναι από **0,015(nGy/h)** έως **4,266(nGy/h)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **0,792(nGy/h)**. Η μικρότερη τιμή της δόσης προέκυψε στη **Τσαγκαράδα** ενώ η μεγαλύτερη τιμή στην **Πηγή**.

Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζεται η τιμή της δόσης Καισίου που υπολογίστηκε σε μια μελέτη στο Βελιγράδι της Σερβίας. Η δειγματοληψία εδάφους στην συγκεκριμένη μελέτη έλαβε χώρα το 2009. Παρατηρούμε πως, οι μέσες τιμές δόσης Καισίου που προέκυψαν για τις περιοχές της **Λέσβου** και της **Θεσσαλίας**, **0,752(nGy/h)** και **0,792(nGy/h)** αντίστοιχα, είναι λίγο μεγαλύτερες από την τιμή που προέκυψε στην μελέτη για το Βελιγράδι **0,32(nGy/h)**. Αντιθέτως, η μέση τιμή δόσης Καισίου που υπολογίστηκε για την **Χίο** ίση με **0,262(nGy/h)**, είναι πιο μικρή από εκείνη του Βελιγραδίου (Nenadović et al., 2011).

4.10 Effective Dose Cs ($D_{E(Cs)}$)

Στην **Λέσβο** οι τιμές της **δραστηκής δόσης Καισίου** που υπολογίστηκαν είναι από **0,014($\mu\text{Sv/y}$)** έως **7,024($\mu\text{Sv/y}$)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **0,922($\mu\text{Sv/y}$)**. Η μικρότερη τιμή της δραστηκής δόσης Καισίου προέκυψε για το **Σίγρι** ενώ η μεγαλύτερη τιμή για τα **Μέσα**.

Στην **Χίο** οι τιμές της **δραστηκής δόσης Καισίου** που υπολογίστηκαν είναι από **0,008($\mu\text{Sv/y}$)** έως **1,520($\mu\text{Sv/y}$)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **0,321($\mu\text{Sv/y}$)**. Η μικρότερη τιμή της δραστηκής δόσης Καισίου υπολογίστηκε για το **Πελλιναίο** ενώ η μεγαλύτερη τιμή για τα **Αυγώνυμα**.

Στην **Θεσσαλία** οι τιμές της **δραστηκής δόσης Καισίου** που υπολογίστηκαν είναι από **0,018($\mu\text{Sv/y}$)** έως **5,232($\mu\text{Sv/y}$)** και η μέση τιμή της είναι ίση με **0,971($\mu\text{Sv/y}$)**. Η μικρότερη τιμή της δραστηκής δόσης προέκυψε στη **Τσαγκαράδα** ενώ η μεγαλύτερη τιμή στην **Πηγή**.

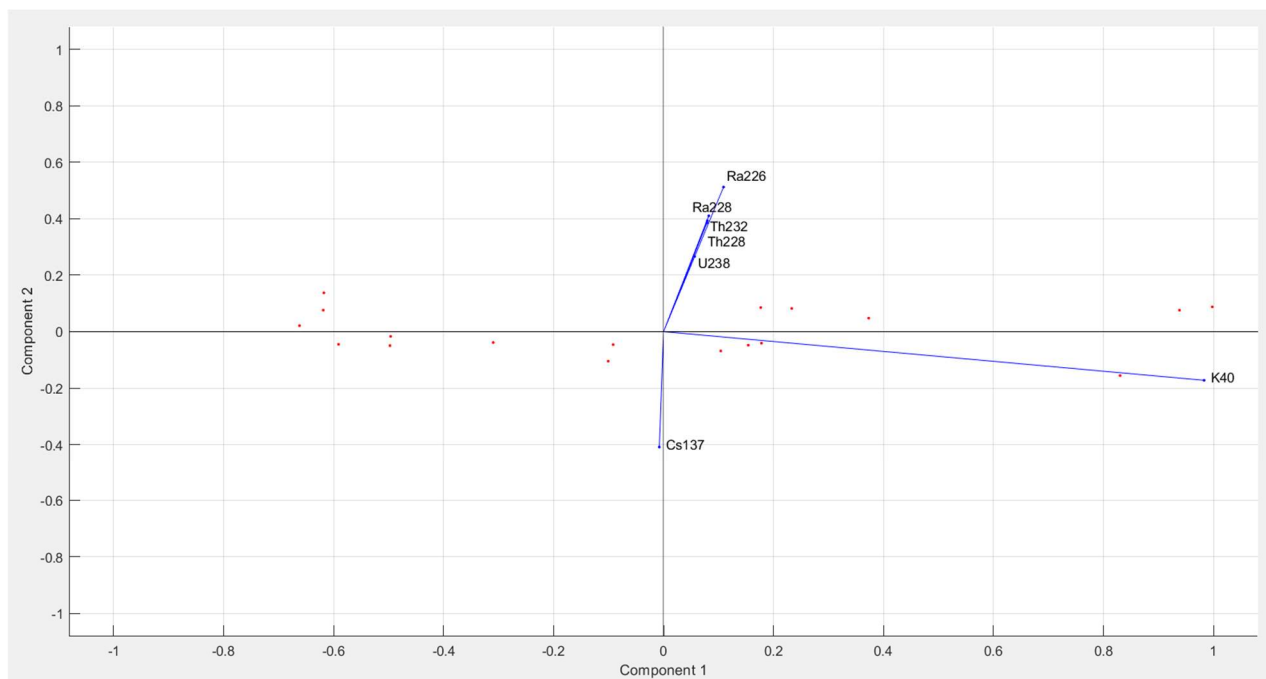
Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζεται η τιμή της δραστηκής δόσης Καισίου που υπολογίστηκε σε μια μελέτη στο Βελιγράδι της Σερβίας. Παρατηρούμε πως, οι μέσες τιμές δραστηκής δόσης Καισίου που προέκυψαν για τις περιοχές της Λέσβου, της Χίου και της Θεσσαλίας είναι μικρότερες από την μέση τιμή δραστηκής δόσης Καισίου για το Βελιγράδι που υπολογίστηκε ίση με **3,87($\mu\text{Sv/y}$)** (Nenadović et al., 2011).

Πίνακας 2: Τιμές των H_{ex} , R_{eq} , D , De , $D(cs)$, $De(cs)$ από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία σε διάφορες περιοχές

| Author | Location | H_{ex} | R_{eq} (Bq/kg) | D (nGy/h) | De (μSv/y) | $D(^{137}Cs)$ (nGy/h) | $De(^{137}Cs)$ (μSv/y) |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|------------------------------------|---|--|
| Παρούσα μελέτη | Lesvos (Greece) | 0,51 | 188,92 | 87,14 | 106,87 | 0,75 | 0,92 |
| Παρούσα μελέτη | Chios (Greece) | 0,41 | 150,46 | 71,20 | 87,32 | 0,26 | 0,32 |
| Παρούσα μελέτη | Thessaly (Greece) | 0,26 | 95,48 | 45,41 | 55,69 | 0,79 | 0,97 |
| (Čujić et al., 2015) | Obrenovac (Serbia) | 0,4 | | 76,3 | 93,6 | | |
| (Abdullah et al., 2016) | Manjung (Malaysia) | <1 | | | | | |
| (Elias et al., 2012) | Manjung (Malaysia) | 0,32-0,52 | 118,62-193,06 | | | | |
| (Yakovlev et al., 2020) | Severodvinsk (Russia) | 0,05 | 19 | 9 | | | |
| (Al-Hamarneh & Awadallah, 2009) | Jordan | 0,28 | 103,1 | 51,5 | | | |
| (Stevanović et al., 2018) | Toplica (Serbia) | 0,3 | 120,1 | 56,4 | 69,2 | | 0,5 |
| (Nenadović et al., 2011) | Beograd (Serbia) | | | | | 0,32 | 3,87 |
| (Durusoy & Yildirim, 2017) | Salihli (Turkey) | 0,34 | 125 | 56,9 | 69,8 | | |
| (UNSCEAR, 2000) | | <1 | <370 | 57 | 70 | | |
| | Nile Valley, Egypt | | 51,7 | 24,30 | 60 | | |

4.11 Principal Component Analysis

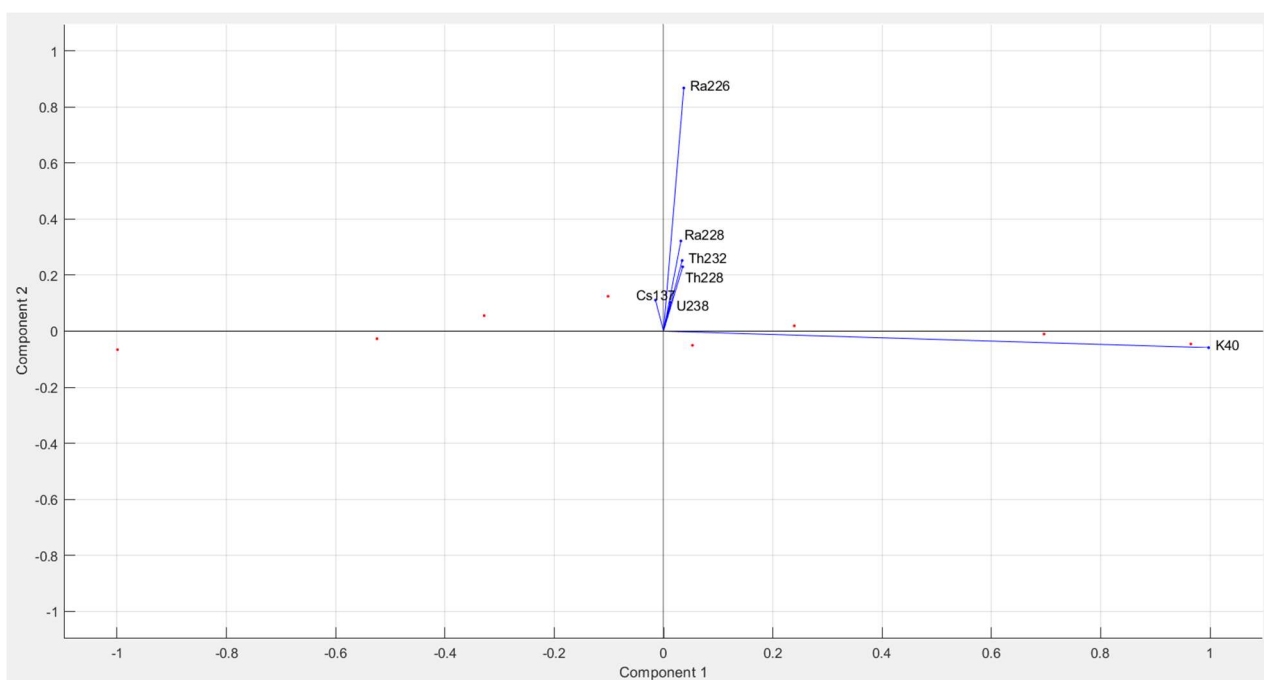
Λέσβος



Εικόνα 17: Γραφική απεικόνιση της PCA για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια στην Λέσβο

Στην παραπάνω **Εικόνα 17** παρουσιάζεται το διάγραμμα που προέκυψε από την Principal Component Analysis για την περιοχή της Λέσβου. Σύμφωνα με το διάγραμμα παρατηρούμε πως υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ των ραδιονουκλιδίων: ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th . Αντίθετα μεταξύ του ^{40}K και του ^{137}Cs και των υπόλοιπων ραδιονουκλιδίων, επειδή τα βέλη τους έχουν αντίθετες κατευθύνσεις, παρουσιάζουν αρνητική συσχέτιση. Επιπλέον παρατηρούμε πως η πρώτη κύρια συνιστώσα, η οποία αντιστοιχεί στον οριζόντιο άξονα, έχει θετικούς συντελεστές για όλα τα ραδιονουκλείδια εκτός από το ^{137}Cs . Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη κύρια συνιστώσα, που αντιστοιχεί στον κατακόρυφο άξονα, έχει θετικούς συντελεστές για τα ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th και αρνητικούς για το ^{40}K και το ^{137}Cs . Τέλος, σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, προκύπτει πως η μεταβλητή που έχει συνεισφέρει περισσότερο στις δύο πρώτες κύριες συνιστώσες είναι το ^{40}K , καθώς παρουσιάζει το βέλος με το μεγαλύτερο μήκος.

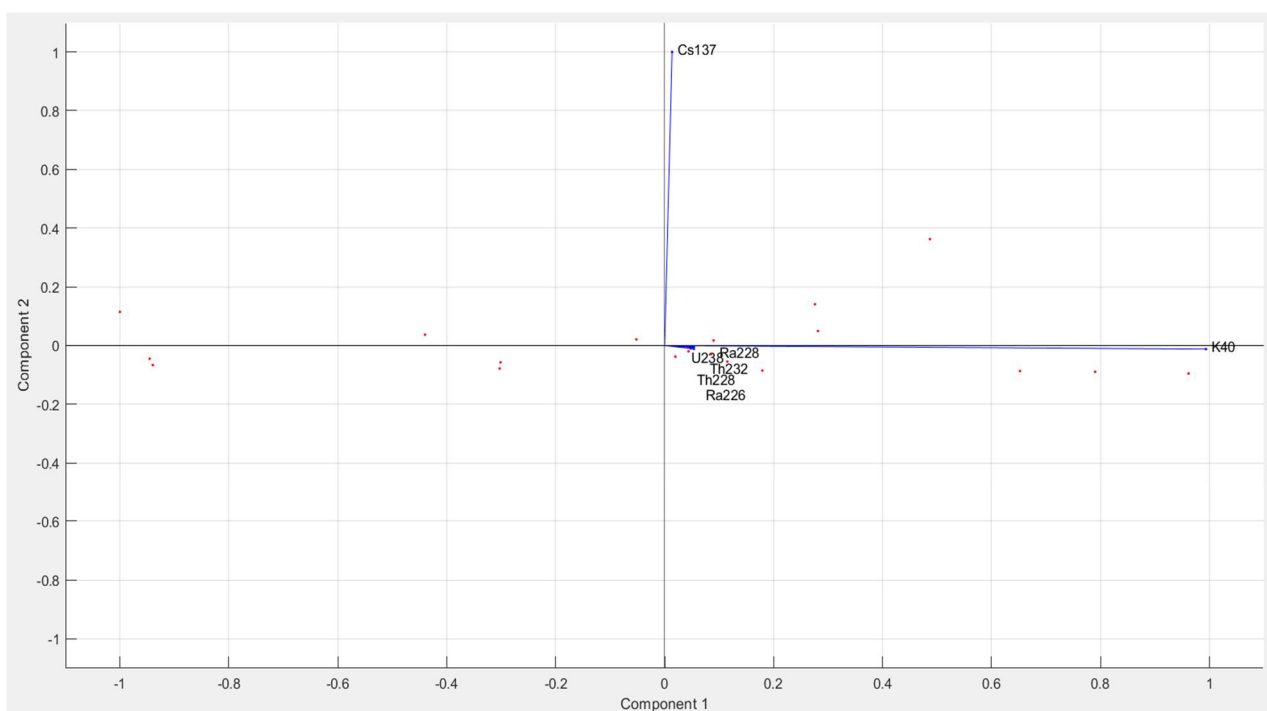
Χίος



Εικόνα 18: Γραφική απεικόνιση της PCA για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια στην Χίο

Στην παραπάνω **Εικόνα 18** παρουσιάζεται το διάγραμμα που προέκυψε από την Principal Component Analysis για την περιοχή της Χίου. Σύμφωνα με το διάγραμμα παρατηρούμε πως υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ των ραδιονουκλιδίων: ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th . Αντίθετα μεταξύ του ^{40}K και του ^{137}Cs και των υπόλοιπων ραδιονουκλιδίων, επειδή τα βέλη τους έχουν αντίθετες κατευθύνσεις, παρουσιάζουν αρνητική συσχέτιση. Επιπλέον παρατηρούμε πως η πρώτη κύρια συνιστώσα, η οποία αντιστοιχεί στον οριζόντιο άξονα, έχει θετικούς συντελεστές για όλα τα ραδιονουκλείδια εκτός από το ^{137}Cs . Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη κύρια συνιστώσα, που αντιστοιχεί στον κατακόρυφο άξονα, έχει θετικούς συντελεστές για τα ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{137}Cs , ενώ αρνητικό συντελεστή για το ^{40}K . Τέλος, σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, προκύπτει πως η μεταβλητή που έχει συνεισφέρει περισσότερο στις δύο πρώτες κύριες συνιστώσες είναι το ^{40}K , καθώς παρουσιάζει το βέλος με το μεγαλύτερο μήκος.

Θεσσαλία



Εικόνα 19: Γραφική απεικόνιση της PCA για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια στην Θεσσαλία

Στην παραπάνω **Εικόνα 19** παρουσιάζεται το διάγραμμα που προέκυψε από την Principal Component Analysis για την περιοχή της Θεσσαλίας. Σύμφωνα με το διάγραμμα παρατηρούμε πως υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ των ραδιονουκλεϊδίων: ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K καθώς τα βέλη τους βρίσκονται προς την ίδια κατεύθυνση. Αντιθέτως, μεταξύ του ^{137}Cs και των υπόλοιπων προαναφερθέντων ραδιονουκλεϊδίων υπάρχει αρνητική συσχέτιση. Επιπλέον, παρατηρούμε πως η πρώτη κύρια συνιστώσα, η οποία αντιστοιχεί στον οριζόντιο άξονα, έχει θετικούς συντελεστές για όλα τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια. Όσον αφορά τη δεύτερη κύρια συνιστώσα, που αντιστοιχεί στον κατακόρυφο άξονα, έχει θετικό συντελεστή μόνο για το ^{137}Cs , ενώ για όλα υπόλοιπα ραδιονουκλεΐδια έχει αρνητικό συντελεστή. Τέλος, σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, προκύπτει πως η μεταβλητή που έχει συνεισφέρει περισσότερο στις δύο πρώτες κύριες συνιστώσες είναι το ^{40}K , καθώς παρουσιάζει το βέλος με το μεγαλύτερο μήκος.

4.12 Pearson's correlation coefficient

Στον **Πίνακα 3** παρουσιάζονται οι τιμές του Pearson's correlation coefficient για την περιοχή της Λέσβου.

Όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα, τα ραδιονουκλεΐδια: ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th παρουσιάζουν μεταξύ τους (ανά ζεύγη) τιμές για το r από 0,92-0,99. Αυτό σημαίνει πως τα προαναφερθέντα ραδιονουκλεΐδια παρουσιάζουν πολύ ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τους. Κάτι τέτοιο είναι φυσιολογικό καθώς τα συγκεκριμένα φυσικά ραδιονουκλεΐδια έχουν κοινές πηγές προέλευσης και παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά στην φύση. Ακόμη, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα όλα τα προαναφερθέντα ραδιονουκλεΐδια παρουσιάζουν τιμές για τον Pearson's correlation coefficient από 0,76 έως 0,78 με το Κάλιο (^{40}K). Κάτι τέτοιο σημαίνει πως τα ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th παρουσιάζουν πολύ ισχυρή συσχέτιση και με το ^{40}K . Τέλος, όσον αφορά το ^{137}Cs , όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, οι τιμές του r με όλα τα υπόλοιπα ραδιονουκλεΐδια είναι από -0,22 έως -0,06 και έτσι προκύπτει το συμπέρασμα πως δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του ^{137}Cs και των ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th , ^{40}K . Αυτό το αποτέλεσμα είναι λογικό καθώς το Καΐσιο είναι ένα τεχνητό ραδιονουκλεΐδιο και έχει άλλες πηγές προέλευσης από τα υπόλοιπα φυσικά ραδιονουκλεΐδια.

Πίνακας 3: Τιμές των Pearson's correlation coefficients για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια στην Λέσβο

| | <i>Ra-226</i> | <i>U-238</i> | <i>Ra-228</i> | <i>Th-228</i> | <i>Th-232</i> | <i>K-40</i> | <i>Cs-137</i> |
|--------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| Ra-226 | 1 | | | | | | |
| U-238 | 0,97867182 | 1 | | | | | |
| Ra-228 | 0,94417219 | 0,923616 | 1 | | | | |
| Th-228 | 0,94517699 | 0,926944 | 0,998598 | 1 | | | |
| Th-232 | 0,94465783 | 0,926159 | 0,999268 | 0,999885 | 1 | | |
| K-40 | 0,77370569 | 0,763519 | 0,77289 | 0,779692 | 0,776943 | 1 | |
| Cs-137 | -0,1466147 | -0,16744 | -0,21569 | -0,21348 | -0,21419 | -0,06017 | 1 |

Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζονται οι τιμές του Pearson's correlation coefficient για την περιοχή της Χίου.

Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα τα ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th παρουσιάζουν μεταξύ τους πολύ ισχυρή συσχέτιση καθώς οι τιμές του συντελεστή r είναι μεγαλύτερες από 0,76. Επίσης, το ^{238}U παρουσιάζει μέτρια συσχέτιση με το ^{226}Ra ενώ με τα ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα(4). Όσον αφορά το ^{40}K παρουσιάζει μέτρια συσχέτιση με το ^{226}Ra και το ^{238}U , ισχυρή συσχέτιση με το ^{228}Ra ενώ παρουσιάζει πολύ ισχυρή συσχέτιση με το ^{228}Th και το ^{232}Th . Τέλος, όσον αφορά το ^{137}Cs , όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, οι τιμές του r με όλα τα υπόλοιπα ραδιονουκλεΐδια είναι από -0,28 έως 0,08 και έτσι προκύπτει το συμπέρασμα πως δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του ^{137}Cs και των ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th , ^{40}K . Αυτό το αποτέλεσμα είναι λογικό καθώς το Κάισιο είναι ένα τεχνητό ραδιονουκλεΐδιο και έχει άλλες πηγές προέλευσης από τα υπόλοιπα φυσικά ραδιονουκλεΐδια.

Πίνακας 4: Τιμές των Pearson's correlation coefficients για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια στην Χίο

| | <i>Ra-226</i> | <i>U-238</i> | <i>Ra-228</i> | <i>Th-228</i> | <i>Th-232</i> | <i>K-40</i> | <i>Cs-137</i> |
|--------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| Ra-226 | 1 | | | | | | |
| U-238 | 0,47406975 | 1 | | | | | |
| Ra-228 | 0,84864661 | 0,683938 | 1 | | | | |
| Th-228 | 0,76006414 | 0,720239 | 0,966765 | 1 | | | |
| Th-232 | 0,78890448 | 0,717034 | 0,982626 | 0,997393 | 1 | | |
| K-40 | 0,38302066 | 0,475864 | 0,66354 | 0,797361 | 0,766024 | 1 | |
| Cs-137 | 0,07707353 | 0,06648 | -0,19561 | -0,23158 | -0,21988 | -0,2753 | 1 |

Στον **Πίνακα 5** παρουσιάζονται οι τιμές του Pearson's correlation coefficient για την περιοχή της Θεσσαλίας.

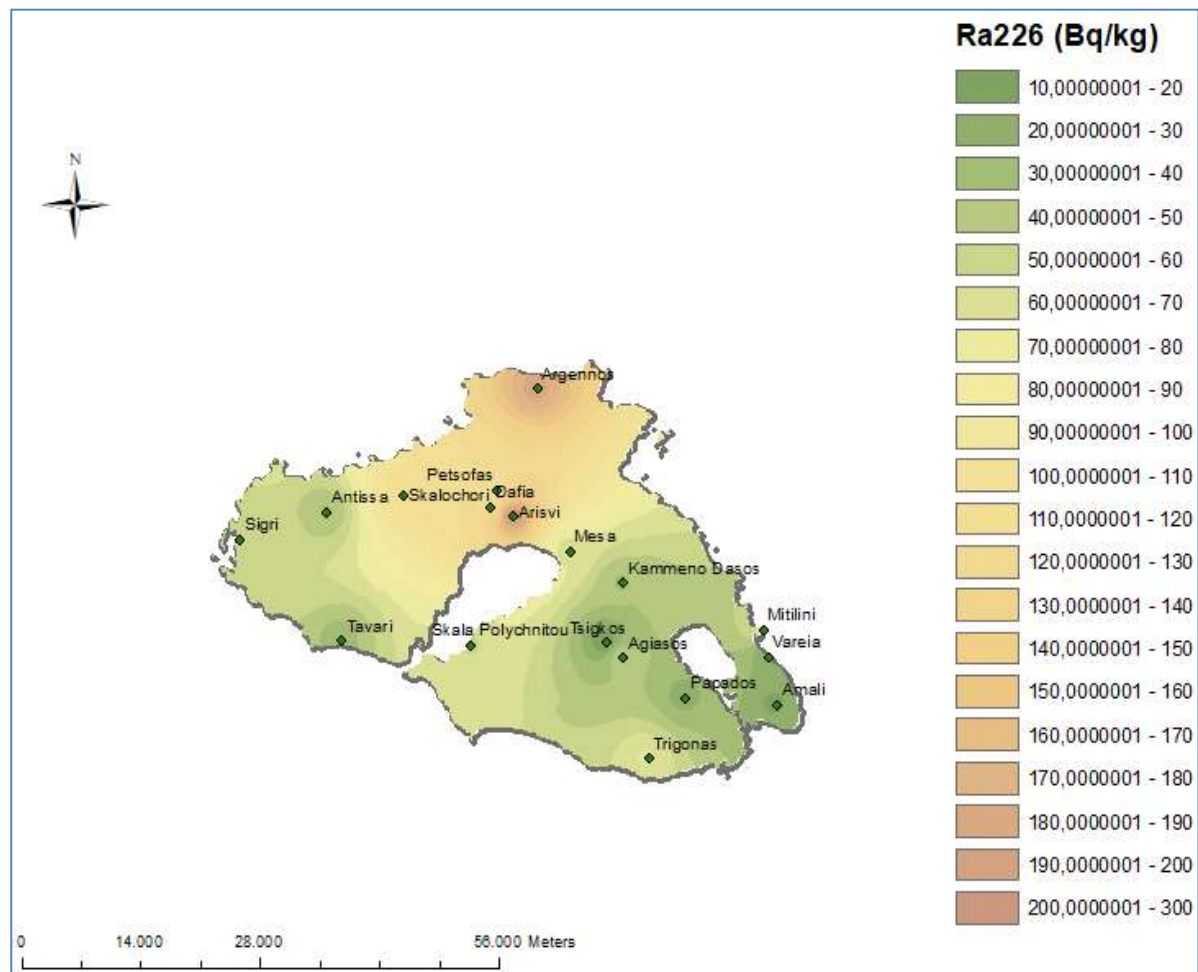
Όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα, τα ραδιονουκλεΐδια: ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K παρουσιάζουν μεταξύ τους (ανά ζεύγη) τιμές για το r από 0,79-0,99. Αυτό σημαίνει πως τα προαναφερθέντα ραδιονουκλεΐδια παρουσιάζουν πολύ ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τους. Κάτι τέτοιο είναι φυσιολογικό καθώς τα συγκεκριμένα φυσικά ραδιονουκλεΐδια έχουν κοινές πηγές προέλευσης και παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά στην φύση. Όσον αφορά το ^{137}Cs , όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, οι τιμές του r με όλα τα υπόλοιπα ραδιονουκλεΐδια είναι από 0,02 έως 0,07 και έτσι προκύπτει το συμπέρασμα πως δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του ^{137}Cs και των ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th , ^{40}K . Αυτό το αποτέλεσμα είναι λογικό καθώς το Καίσιο είναι ένα τεχνητό ραδιονουκλεΐδιο και έχει άλλες πηγές προέλευσης από τα υπόλοιπα φυσικά ραδιονουκλεΐδια.

Πίνακας 5: Τιμές των Pearson's correlation coefficients για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια στην Θεσσαλία

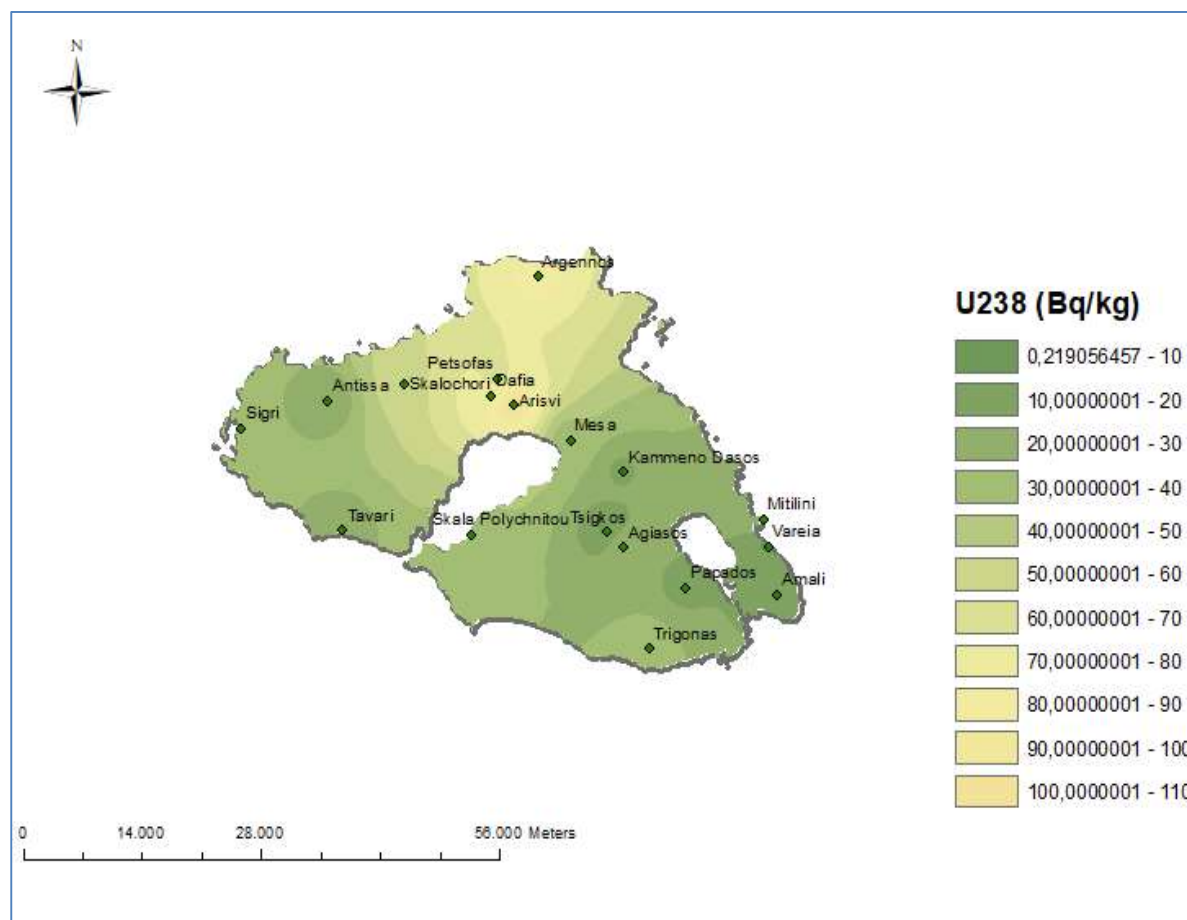
| | <i>Ra-226</i> | <i>U-238</i> | <i>Ra-228</i> | <i>Th-228</i> | <i>Th-232</i> | <i>K-40</i> | <i>Cs-137</i> |
|--------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| Ra-226 | 1 | | | | | | |
| U-238 | 0,8618791 | 1 | | | | | |
| Ra-228 | 0,84327919 | 0,94381 | 1 | | | | |
| Th-228 | 0,7915265 | 0,912815 | 0,984647 | 1 | | | |
| Th-232 | 0,81594866 | 0,929947 | 0,993364 | 0,997407 | 1 | | |
| K-40 | 0,75775007 | 0,847251 | 0,90944 | 0,891772 | 0,908235 | 1 | |
| Cs-137 | 0,02277986 | 0,044923 | 0,052478 | 0,02707 | 0,04409 | 0,065723 | 1 |

4.13 Χάρτες Κατανομής

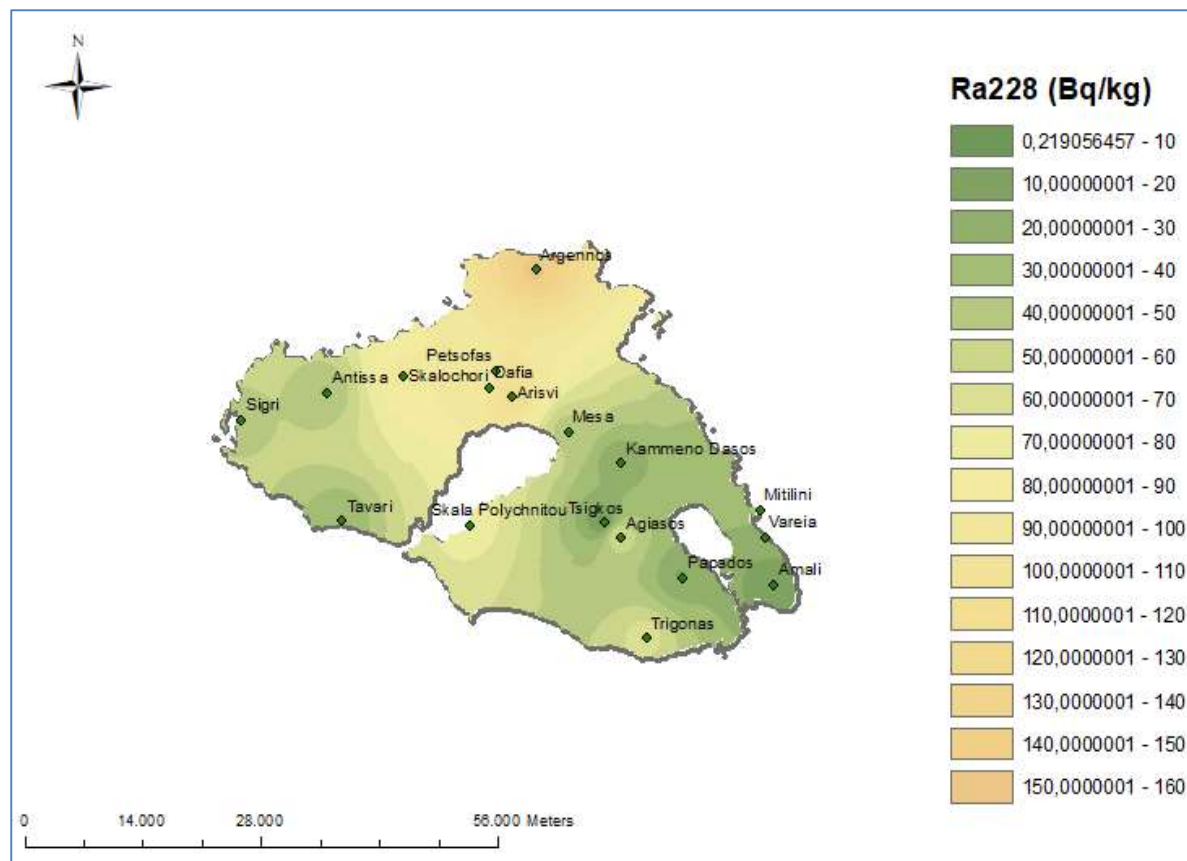
Λέσβος



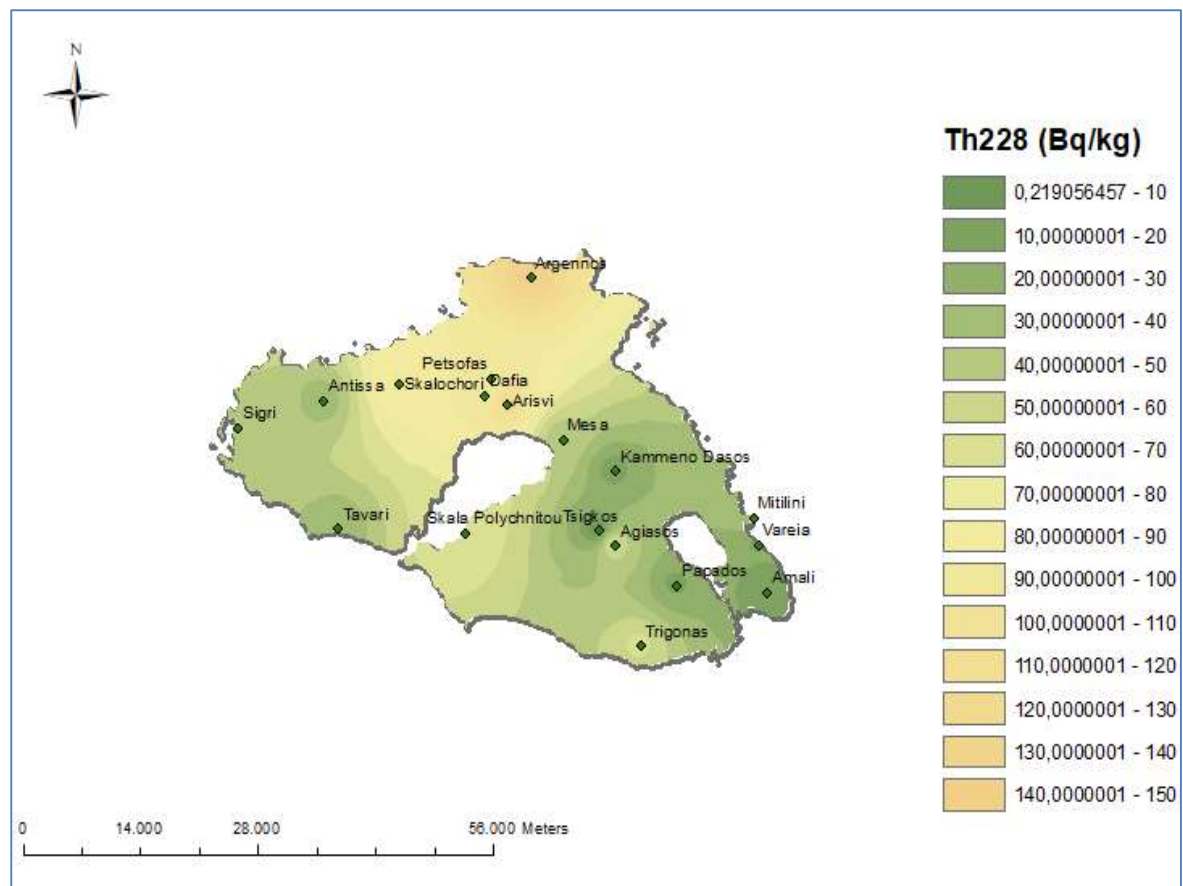
Εικόνα 20: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (Ra226) στην Λέσβο



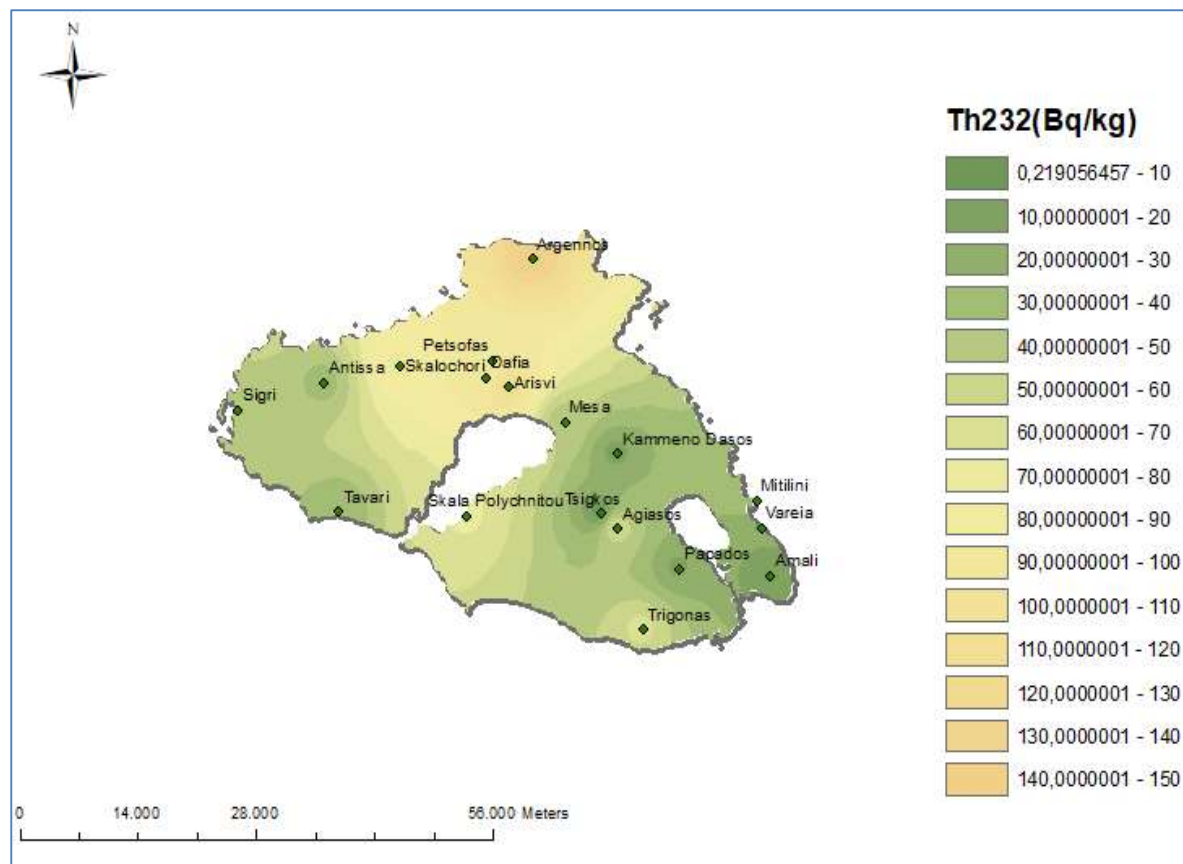
Εικόνα 21: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ουράνιο (U238) στην Λέσβο



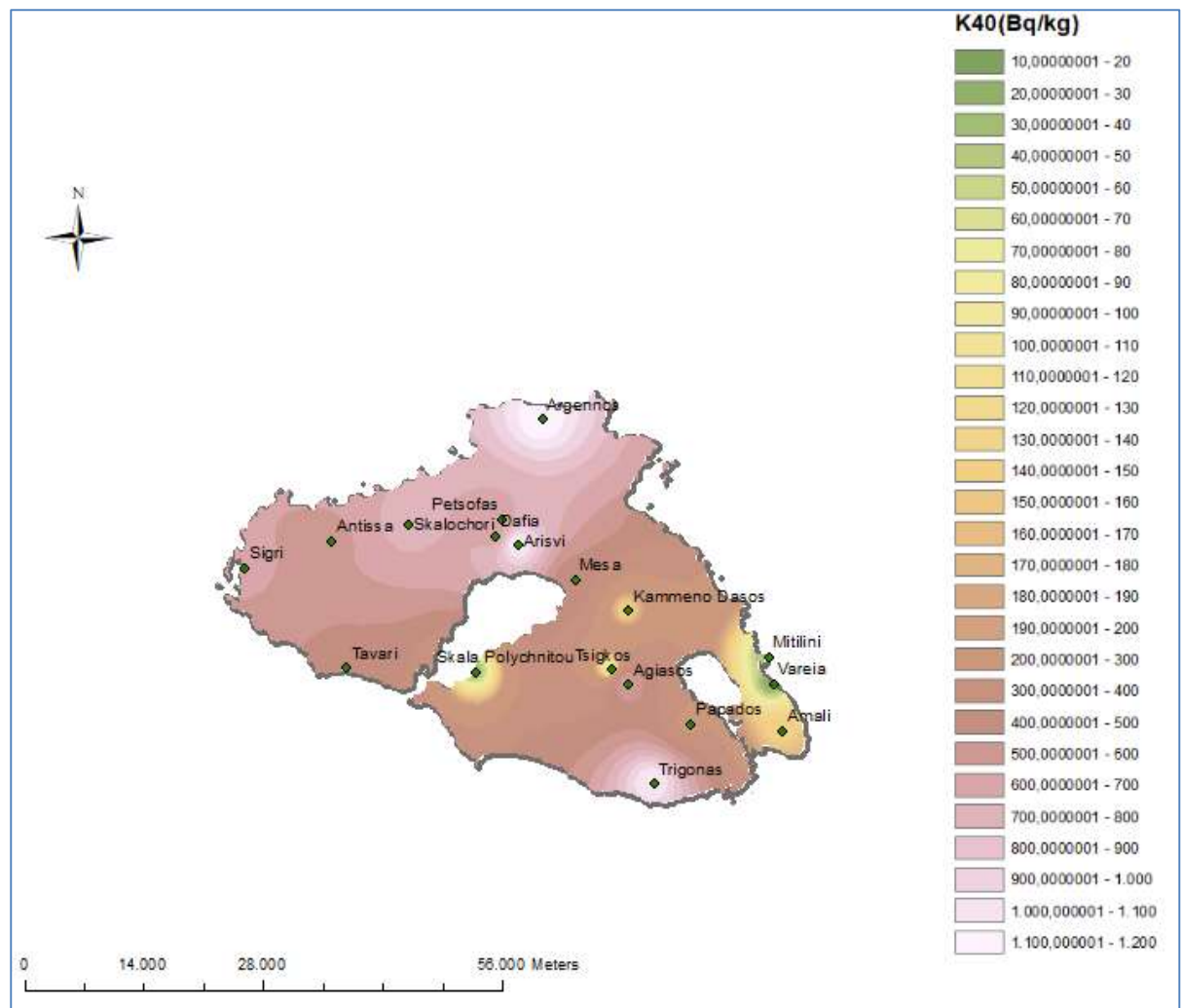
Εικόνα 22: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (Ra228) στην Λέσβο



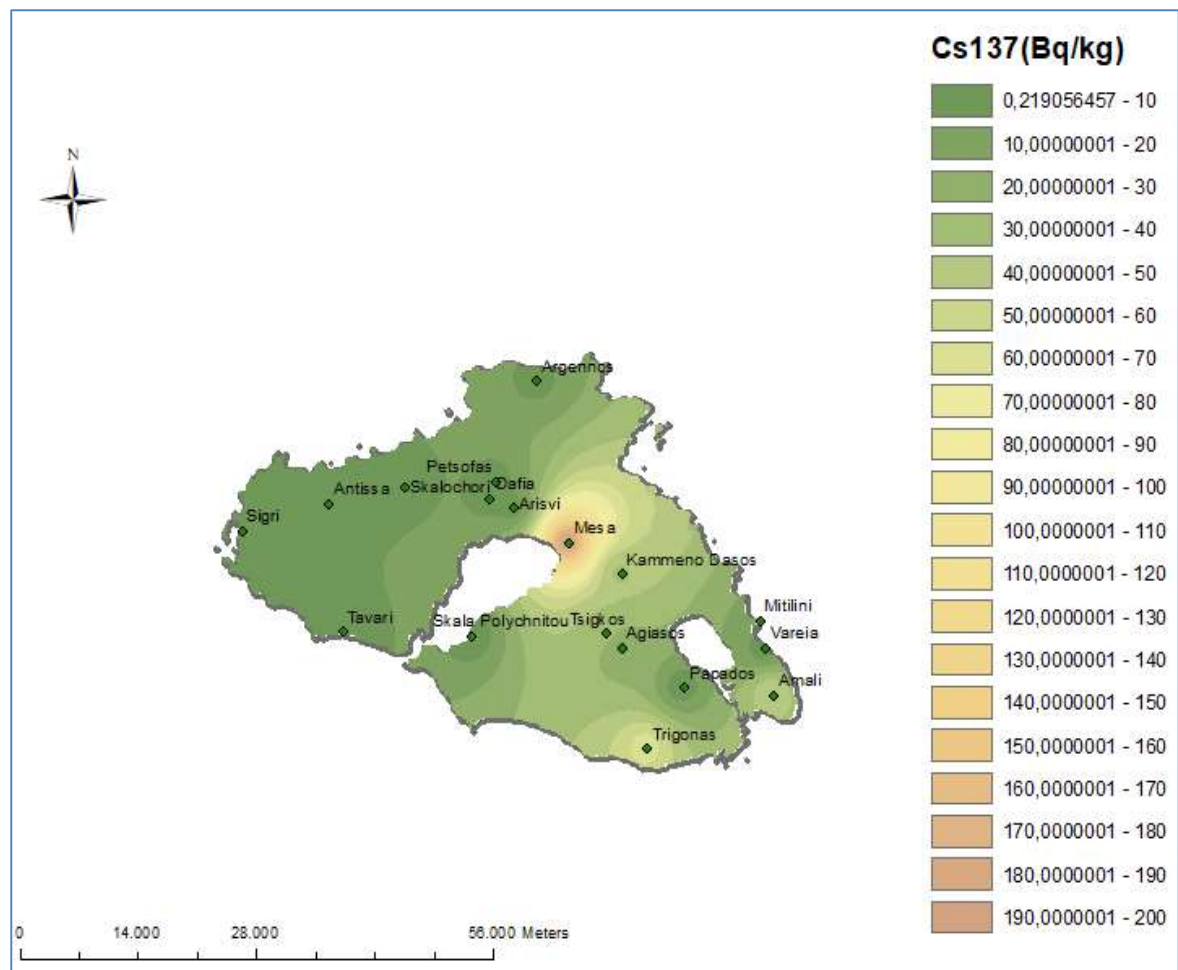
Εικόνα 23: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th228) στην Λέσβο



Εικόνα 24: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th232) στην Λέσβο

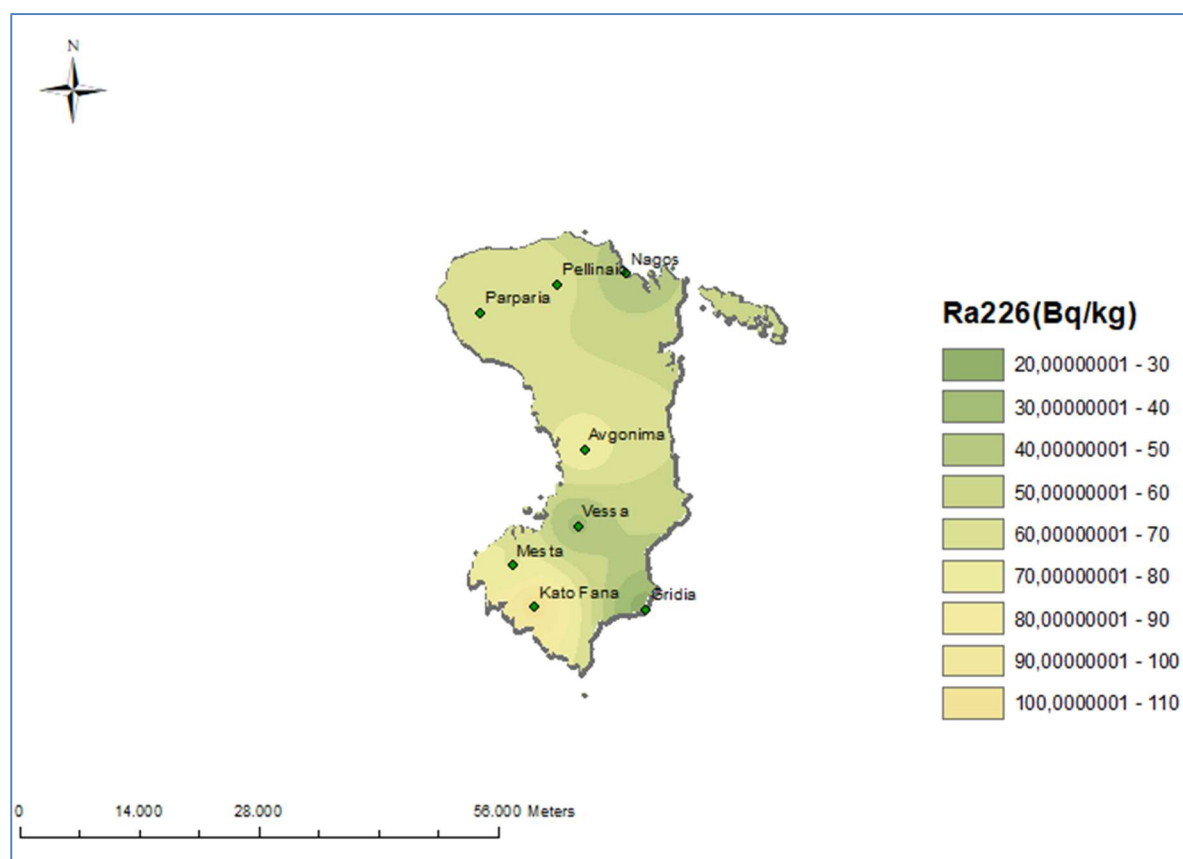


Εικόνα 25: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Κάλιο (K40) στην Λέσβο

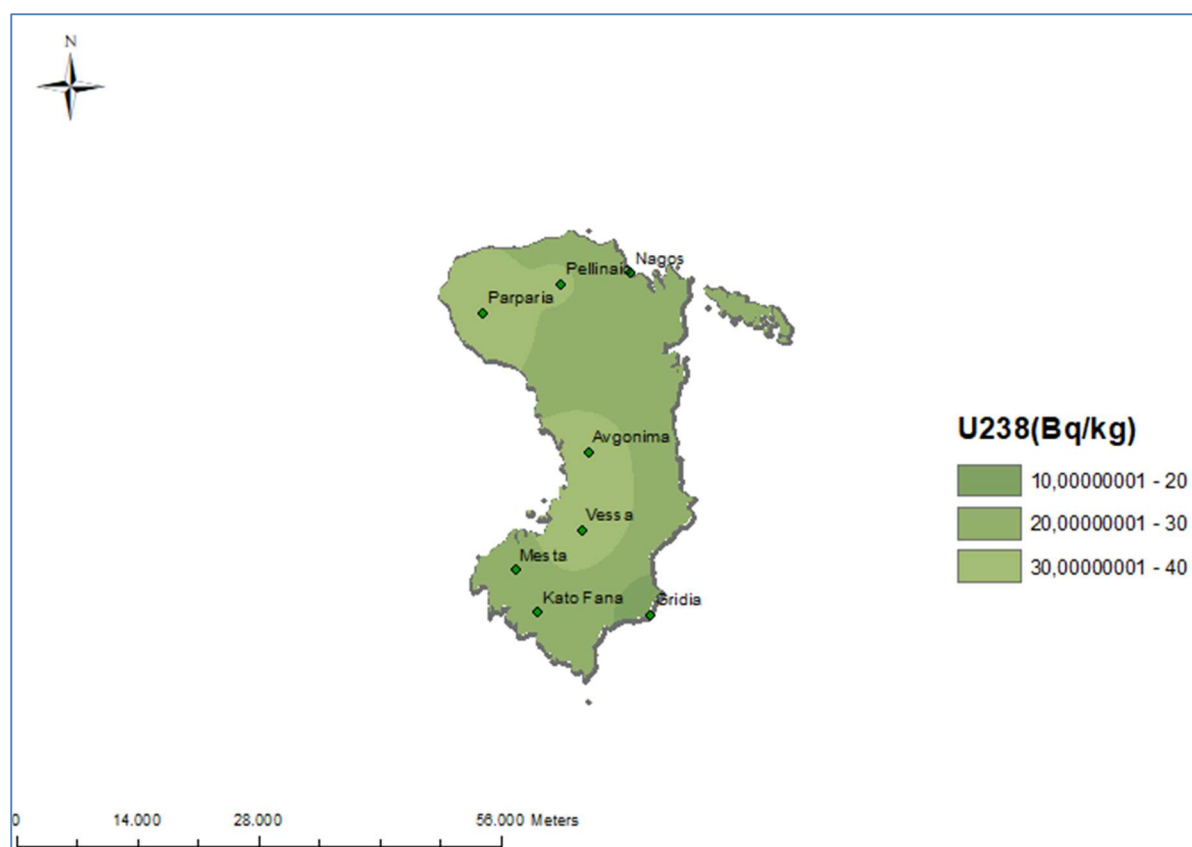


Εικόνα 26: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Καίσιο (Cs137) στην Λέσβο

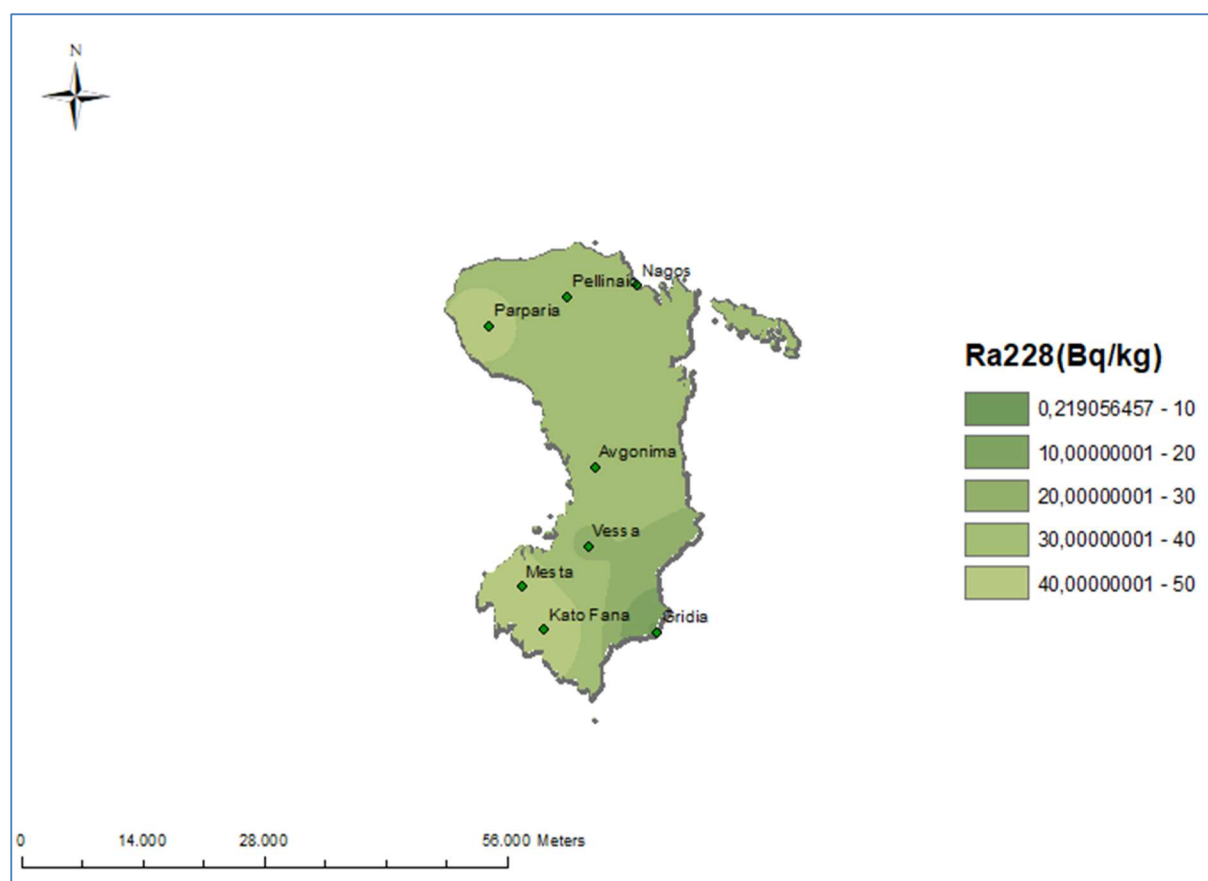
Χίος



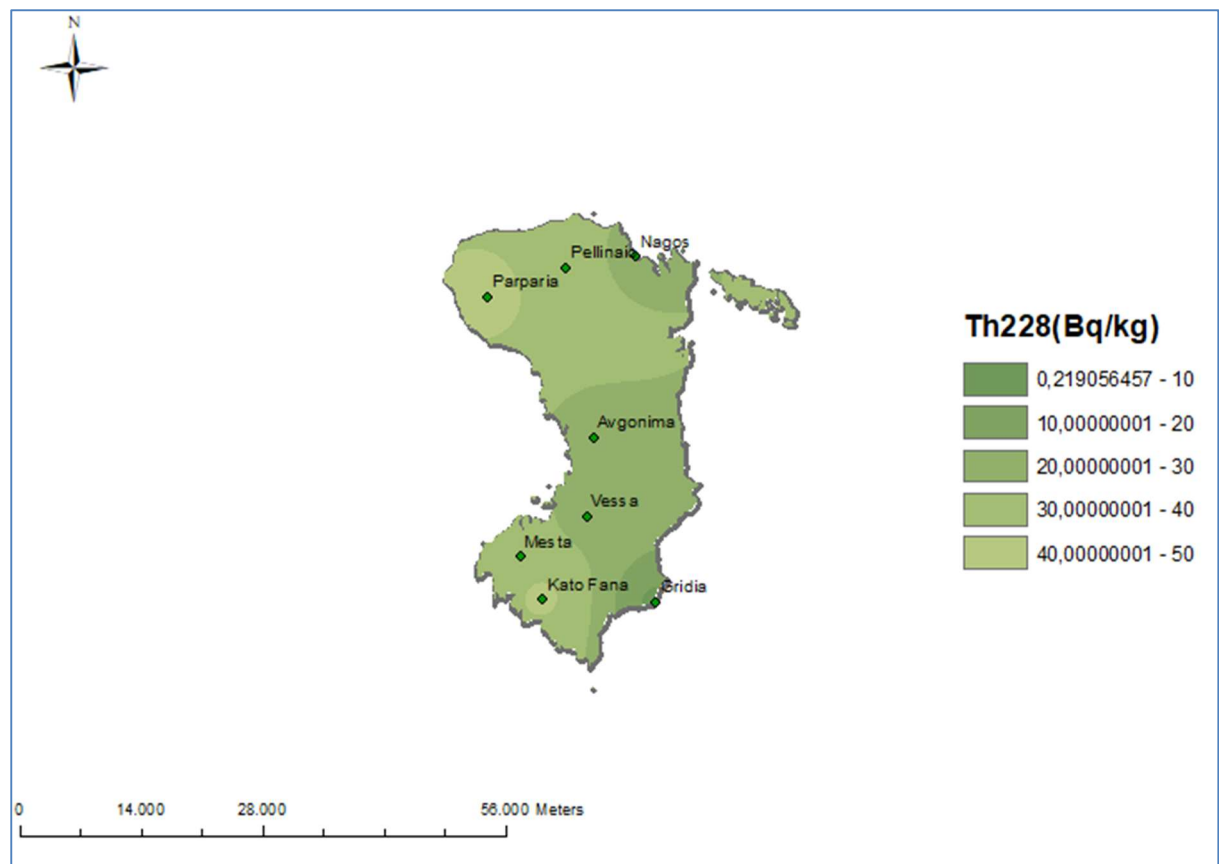
Εικόνα 27: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (226) στην Χίο



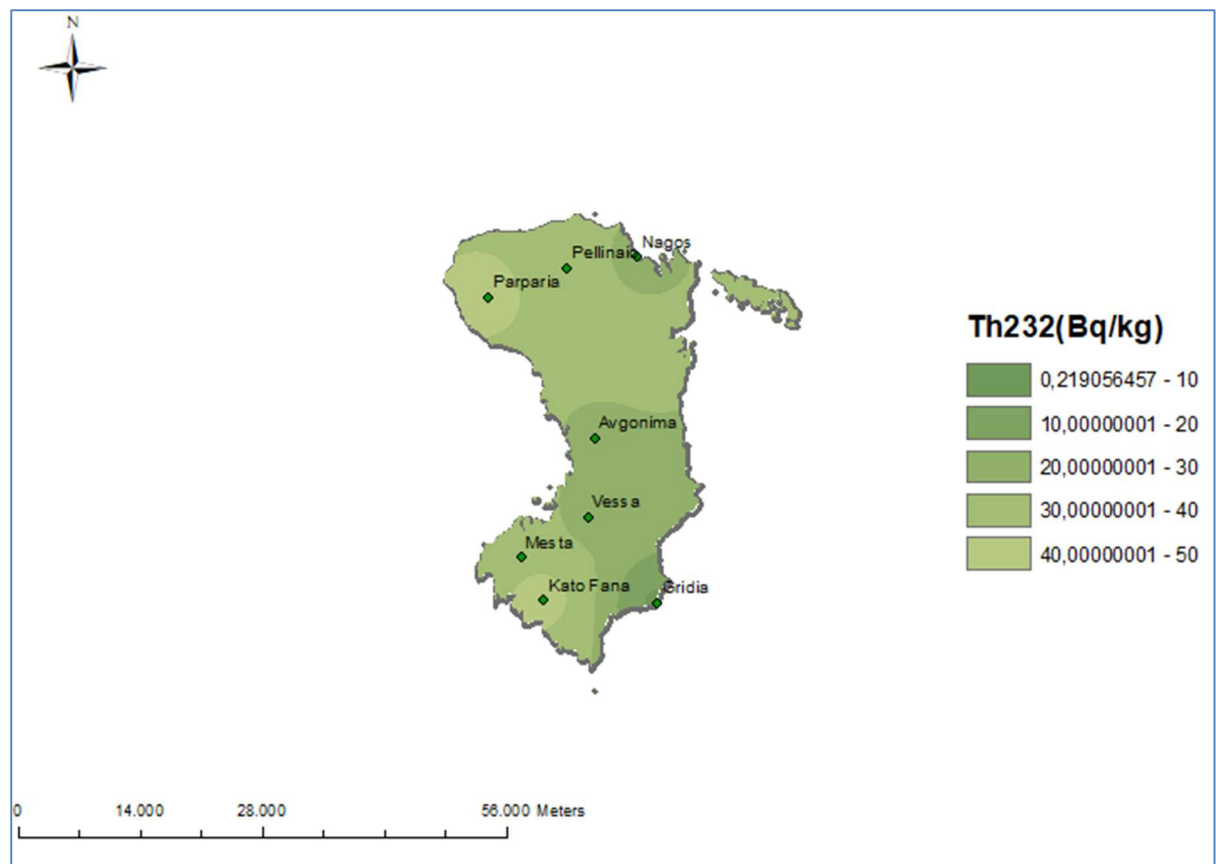
Εικόνα 28: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ουράνιο (U238) στην Χίο



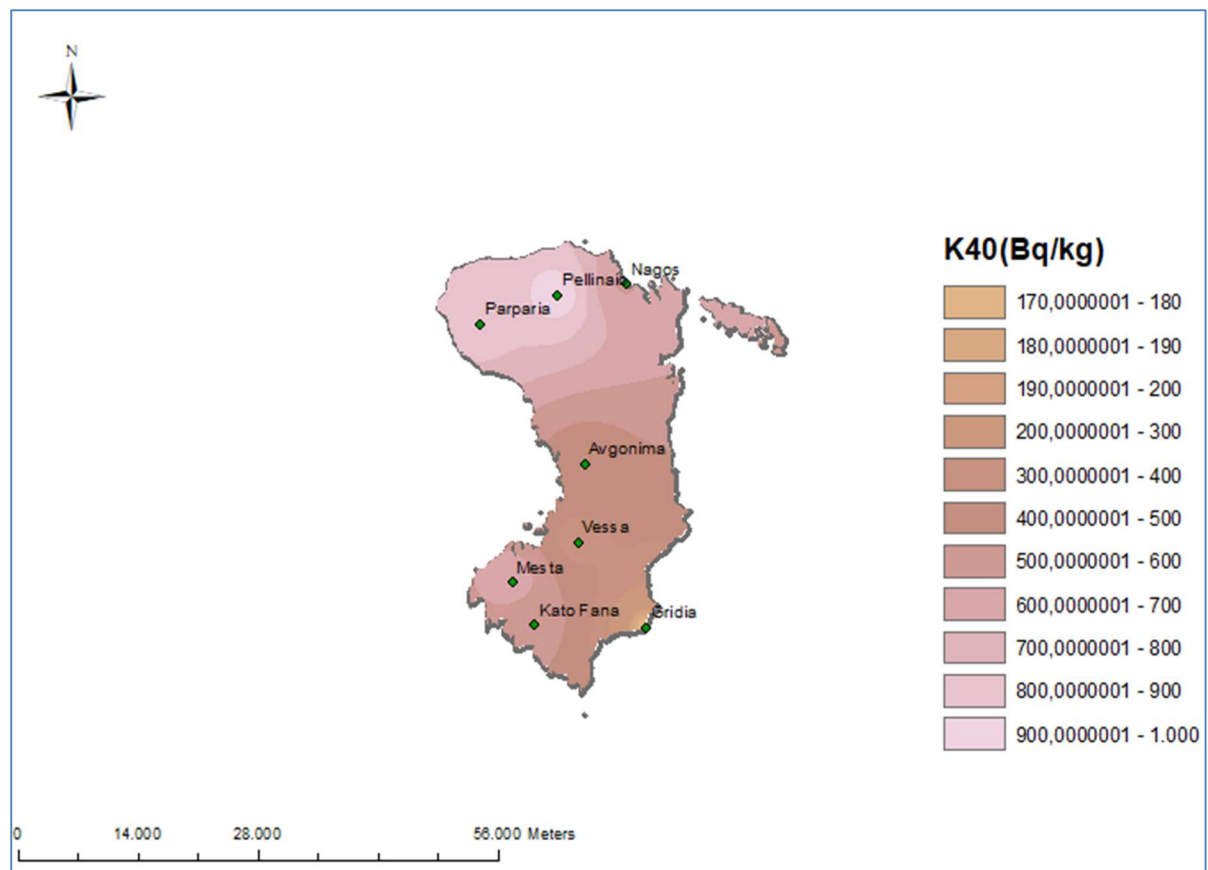
Εικόνα 29: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (Ra228) στην Χίο



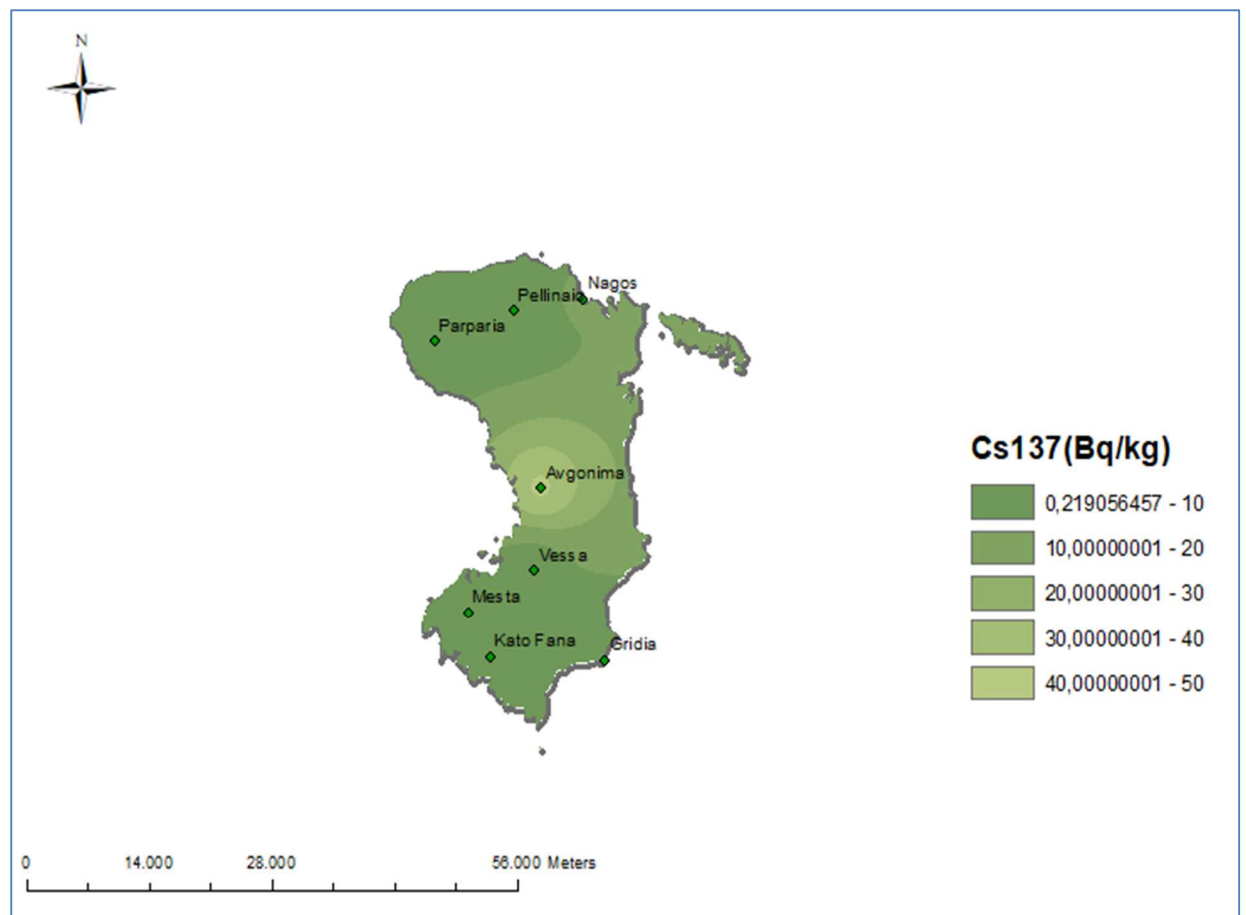
Εικόνα 30: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th228) στην Χίο



Εικόνα 31: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th232) στην Χίο

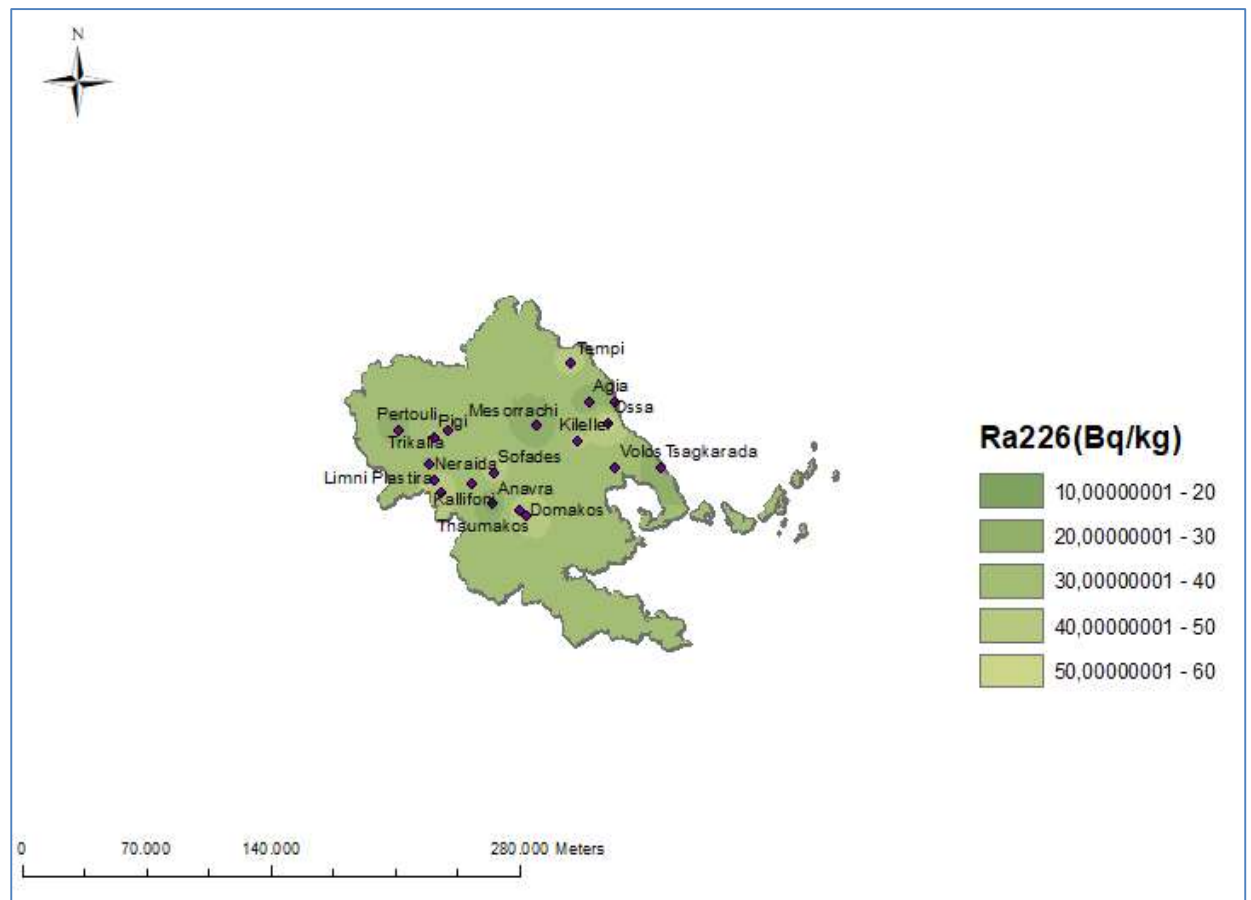


Εικόνα 32: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Κάλιο (K40) στην Χίο

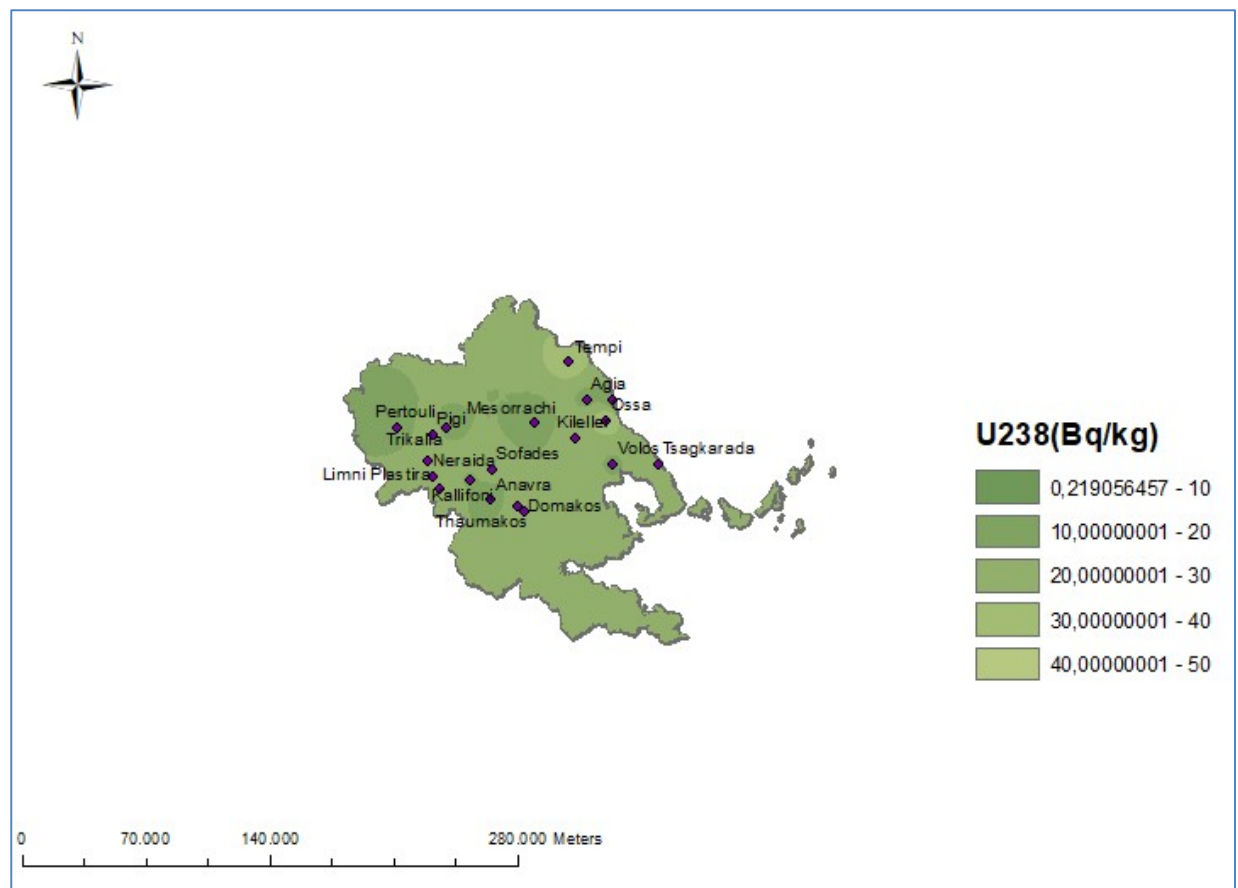


Εικόνα 33: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Καίσιο ($Cs137$) στην Χίο

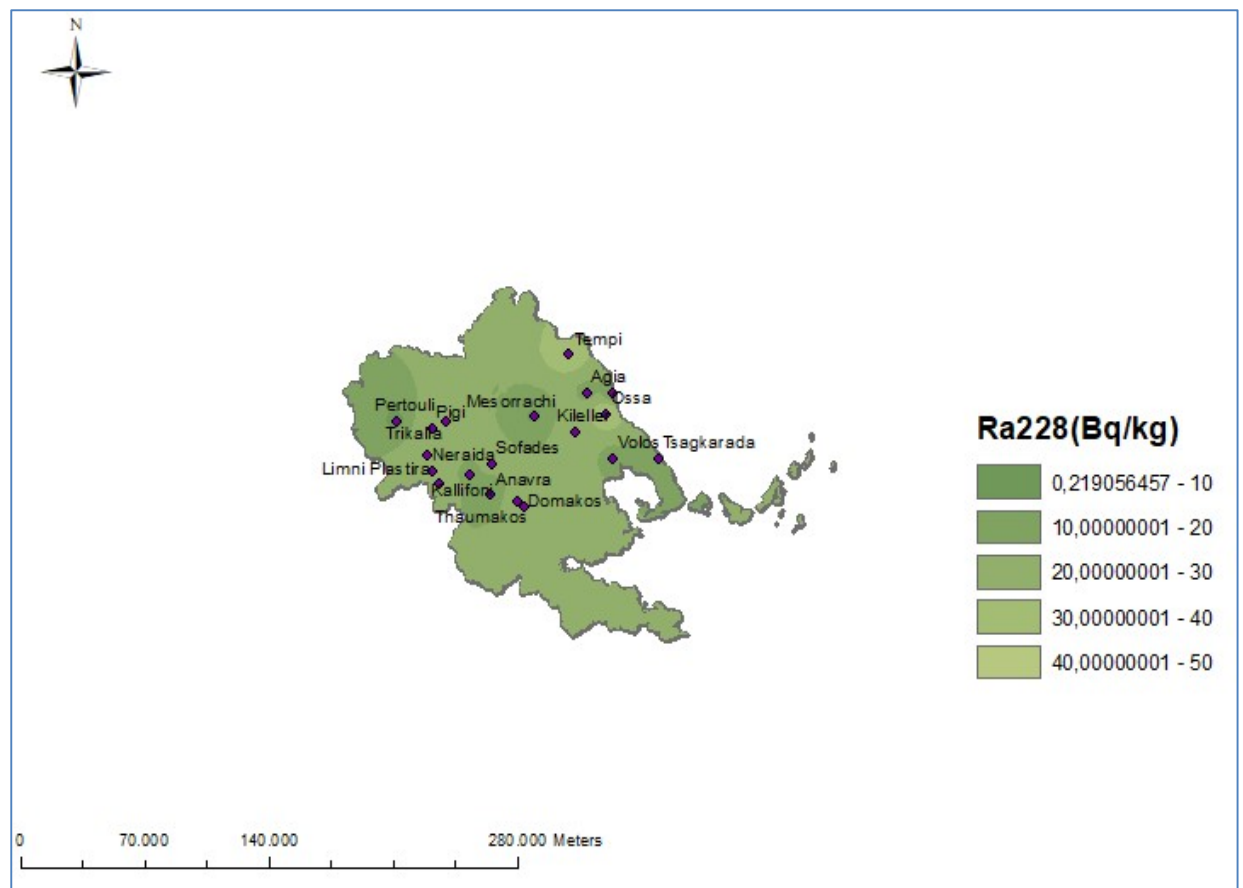
Θεσσαλία



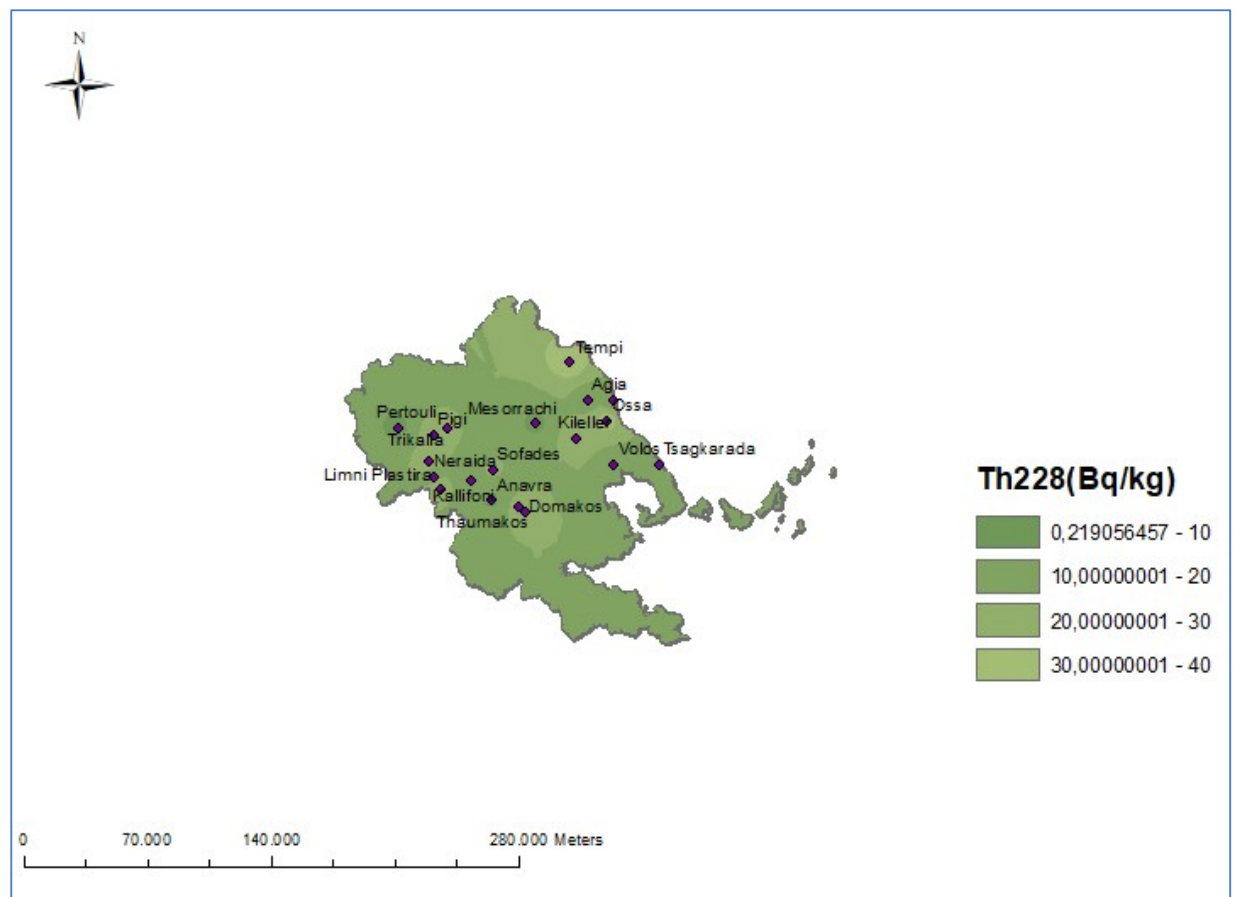
Εικόνα 34: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο (Ra226) στην Θεσσαλία



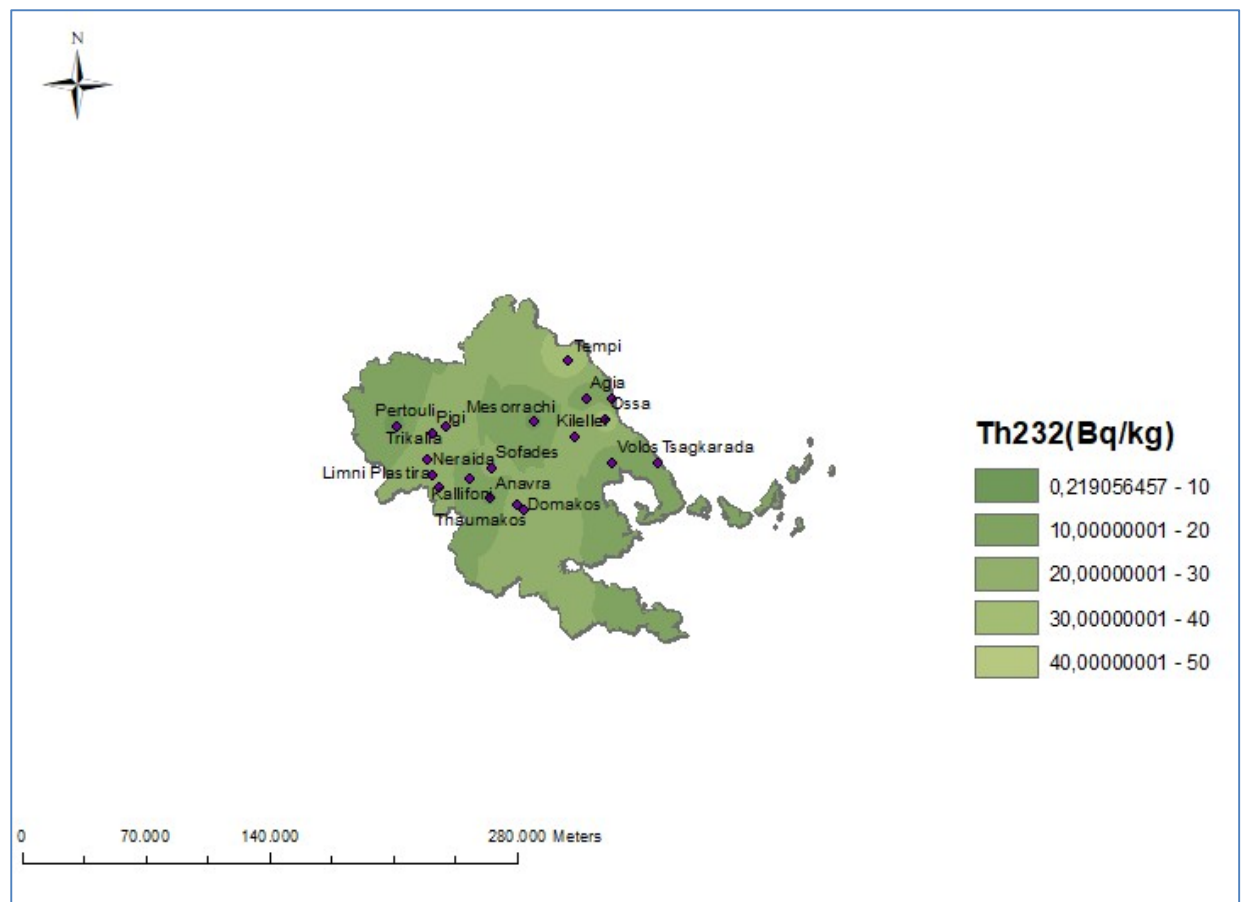
Εικόνα 35: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ουράνιο (U^{238}) στην Θεσσαλία



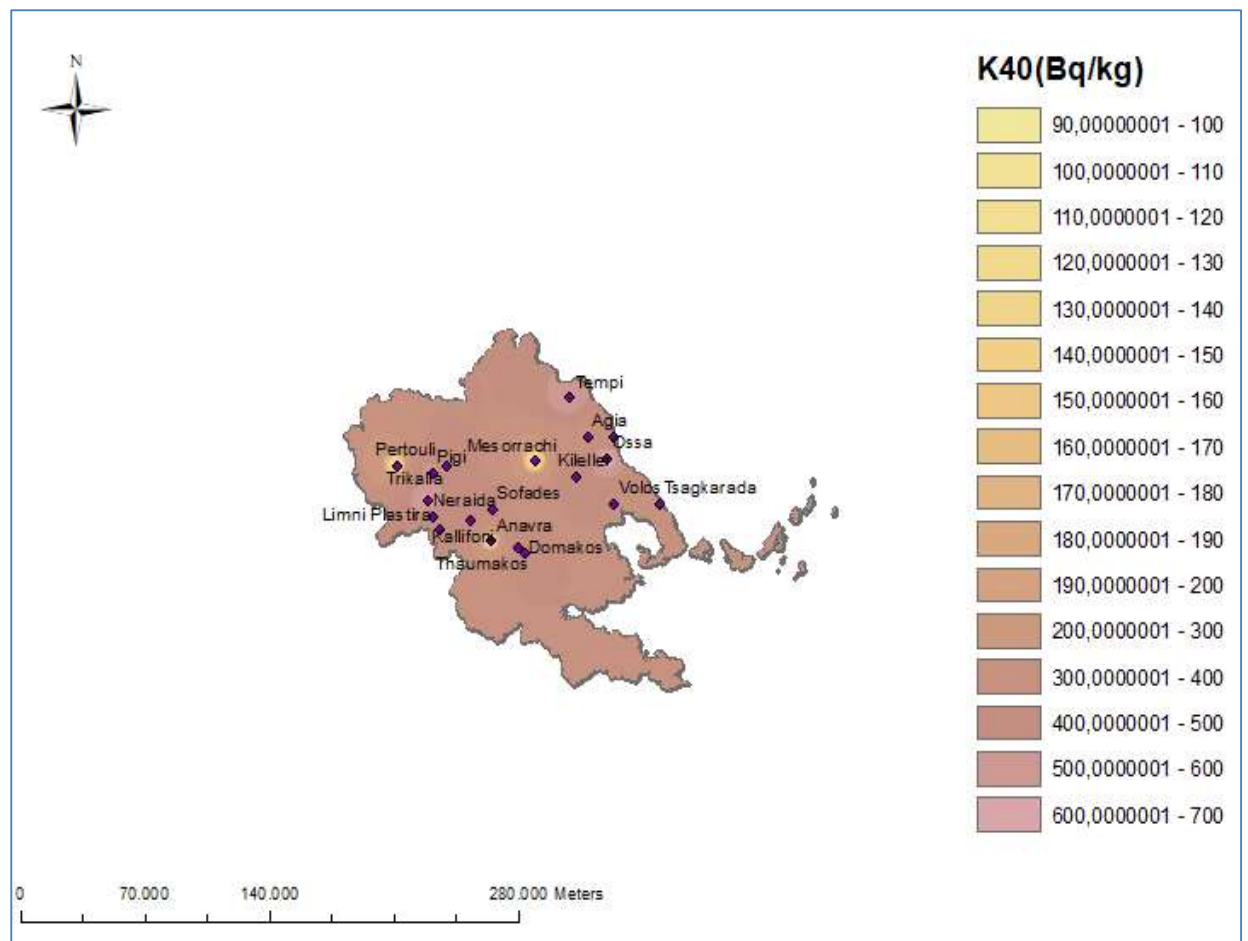
Εικόνα 36: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Ράδιο ($Ra228$) στην Θεσσαλία



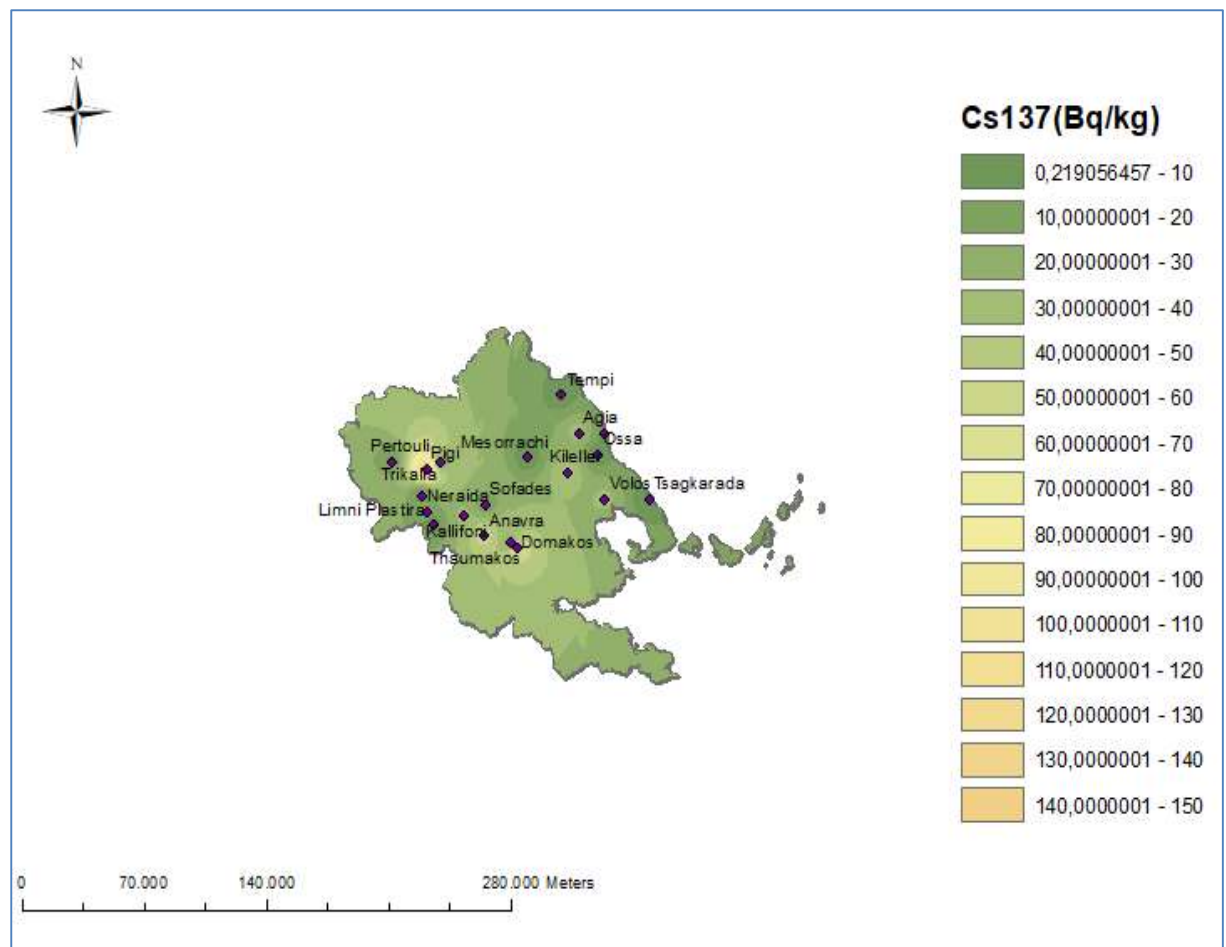
Εικόνα 37: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th228) στην Θεσσαλία



Εικόνα 38: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Θόριο (Th232) στην Θεσσαλία



Εικόνα 39: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Κάλιο (K40) στην Θεσσαλία



Εικόνα 40: Χάρτης χωρικής κατανομής για το Καίσιο ($Cs137$) στην Θεσσαλία

5. Συζήτηση

Αρχικά, σύμφωνα με τον Geo-accumulation Index με την βιβλιογραφική μέθοδο, στην Λέσβο όλες οι περιοχές δειγματοληψίας φαίνεται να μην είναι ρυπασμένες από τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια με εξαίρεση την Αρίσβη και τον Άργεννο που χαρακτηρίστηκαν ως “Moderately contaminated” για το ^{226}Ra . Ωστόσο, τα εδάφη για τα υπόλοιπα ραδιονουκλεΐδια σε αυτές τις περιοχές δεν παρουσίασαν σημαντική ρύπανση. Στην Χίο και στην Θεσσαλία όλες οι περιοχές δειγματοληψίας χαρακτηρίζονται από καθόλου έως μικρή ρύπανση σύμφωνα με τον δείκτη I_{geo} .

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα της παρούσας εργασίας, ο Geo-accumulation Index υπολογίστηκε και με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου. Τα αποτελέσματα του I_{geo} με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα του I_{geo} με την βιβλιογραφική μέθοδο. Πιο συγκεκριμένα, και οι τρεις περιοχές μελέτης χαρακτηρίζονται από καθόλου έως μικρή ρύπανση για όλα τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια όπως φαίνεται και στους **Πίνακες 39-41**. Σε αντίθεση με την βιβλιογραφική μέθοδο, το έδαφος στην Αρίσβη και στον Άργεννο χαρακτηρίστηκε ως “Uncontaminated-moderately contaminated” για το ^{226}Ra .

Επιπλέον, σύμφωνα με τον Enrichment Factor με την βιβλιογραφική μέθοδο, η Λέσβος παρουσίασε μεγάλο εμπλουτισμό στα εδάφη της από τα ραδιονουκλεΐδια, γεγονός που οφείλεται στην γεωλογία της που αποτελείτε σε μεγάλο βαθμό από ηφαιστειογενή πετρώματα. Πιο συγκεκριμένα, οι περισσότερες περιοχές δειγματοληψίας της Λέσβου παρουσίασαν από σοβαρό έως υπερβολικά σοβαρό εμπλουτισμό όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 36**. Μεγαλύτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις περιοχές: Μέσα, Πέτσοφας, Σκαλοχώρι, Αρίσβη, Άντισσα, Δάφια, Σίγρι, Ταβάρι και Άργεννος στις οποίες ο εμπλουτισμός από όλα τα ραδιονουκλεΐδια, με εξαίρεση το τεχνητό Καίσιο, είναι πολύ σοβαρός. Όσον αφορά στην Χίο και στην Θεσσαλία, τα εδάφη χαρακτηρίζονται από ελάχιστο έως μικρό εμπλουτισμό όπως φαίνεται στον **Πίνακα 37** και **Πίνακα 38** αντίστοιχα.

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τον Enrichment Factor με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου, η Λέσβος παρουσίασε στις περισσότερες περιοχές δειγματοληψίας από σοβαρό έως πολύ σοβαρό εμπλουτισμό στα εδάφη της. Εξαίρεση αποτελούν οι περιοχές Αμαλή και Τσίγκος στις οποίες βρέθηκε ελάχιστος εδαφικός εμπλουτισμός από τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια. Στην Χίο και στην Θεσσαλία, όπως παρατηρήθηκε και με τις τιμές του EF με την βιβλιογραφική μέθοδο, όλες οι περιοχές δειγματοληψίας χαρακτηρίζονται από ελάχιστο έως μικρό εμπλουτισμό.

Συγκρίνοντας την βιβλιογραφική μέθοδο και την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου για τον υπολογισμό του Geo-accumulation Index και του Enrichment Factor παρατηρούμε πως και με τις δύο μεθοδολογίες ο χαρακτηρισμός των εδαφών είναι παρόμοιος και οι διαφορές στα αποτελέσματα δεν είναι μεγάλες. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί πως σύμφωνα με την βιβλιογραφική μέθοδο, και για τους δύο δείκτες, φαίνεται να γίνεται μια υπερεκτίμηση της ρύπανσης από τα ραδιονουκλεΐδια σε σχέση με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου. Πιο συγκεκριμένα, αρκετές περιοχές δειγματοληψίας χαρακτηρίστηκαν από μεγαλύτερη ρύπανση ή εμπλουτισμό

χρησιμοποιώντας την βιβλιογραφική μέθοδο αντί για την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου.

Στην συνέχεια, έγινε χαρακτηρισμός των εδαφών στις τρεις περιοχές μελέτης σύμφωνα με τον Pollution Index. Αναλυτικότερα, στην Λέσβο αρκετές περιοχές δειγματοληψίας χαρακτηρίστηκαν από “Middle Pollution” και “High Pollution” όπως φαίνεται στον **Πίνακα 45** γεγονός που δείχνει ότι η Λέσβος έχει αρκετά ρυπασμένα εδάφη από τα ραδιονουκλεΐδια. Πιο συγκεκριμένα, στις περιοχές: Μέσα, Πέτσοφας, Σκαλοχώρι, Αρίσβη, Άντισσα, Δάφια, Σίγρι, Ταβάρι, Σκάλα Πολυχνίτου και Άργεννος τα εδάφη χαρακτηρίζονται από μέτρια έως υψηλή ρύπανση. Μάλιστα, στην Μέσα και στον Τριγώνα παρατηρείται υψηλή και μέτρια ρύπανση αντίστοιχα και για το Καΐσιο. Όσον αφορά στην Χίο, σύμφωνα με τον PI παρουσιάζει από μέτρια έως υψηλή ρύπανση στις περισσότερες περιοχές της. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές: Νάγος, Αυγώνυμα, Βέσσα, Μεστά και Κάτω Φανά παρουσιάζουν υψηλή ρύπανση από τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια. Αντιθέτως οι περιοχές Πελλιναίο, Παρπαριά και Γρίδια παρουσιάζουν μικρότερη ρύπανση. Τέλος, στην Θεσσαλία παρατηρήθηκε μικρότερη ρύπανση εδαφών σε σχέση με την Λέσβο και την Χίο όπως φαίνεται στον **Πίνακα 47**. Οι περισσότερες περιοχές δειγματοληψίας της Θεσσαλίας χαρακτηρίζονται από “Low Pollution”. Οι περιοχές που φαίνεται να έχουν την μεγαλύτερη εδαφική ρύπανση είναι τα Τρίκαλλα, η Πηγή, τα Τέμπη και οι Σοφάδες για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Geo-accumulation Index, του Enrichment Factor και του Pollution Index της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τις τιμές που προκύπτουν για τους παραπάνω δείκτες σε παγκόσμιες μελέτες προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Αρχικά, για τον I_{geo} , παρατηρούμε πως σύμφωνα με τον **Πίνακα 48** για όλα τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια οι τιμές του δείκτη για την Λέσβο, την Χίο και την Θεσσαλία είναι πολύ κοντά στις τιμές για τον I_{geo} στις μελέτες που έχουν γίνει στην Μαλαισία και στην Ινδία. Αξίζει να σημειωθεί πως οι τιμές του I_{geo} για το Καΐσιο υπολογίστηκαν αρκετά μικρότερες στα εδάφη της Ελλάδας σε σχέση με τις παγκόσμιες τιμές του δείκτη. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει πως τα εδάφη της Ελλάδας δεν έχουν ρυπανθεί σε μεγάλο βαθμό από τα πυρηνικά ατυχήματα που έχουν γίνει στον κόσμο. Αντιθέτως, παρατηρούμε πως οι τιμές του I_{geo} για το Κάλιο βρέθηκαν μεγαλύτερες και στις τρεις περιοχές μελέτης στην Ελλάδα, συγκριτικά με τις περιοχές της Μαλαισίας. Επιπλέον, για τον EF, παρατηρούμε πως σύμφωνα με τον **Πίνακα 49** για όλα τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια οι τιμές του δείκτη για την Λέσβο είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις παγκόσμιες τιμές. Αυτό φανερώνει πως τα εδάφη της Λέσβου, εξαιτίας της γεωλογίας του νησιού, είναι πολύ εμπλουτισμένα από τα ραδιονουκλεΐδια. Όσον αφορά στην Χίο και στην Θεσσαλία, οι τιμές του Enrichment factor όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 49** είναι παρόμοιες με τις παγκόσμιες τιμές. Ωστόσο, σε σχέση με τις μελέτες που έλαβαν χώρα στις περιοχές: Perak και Manjung της Μαλαισίας οι τιμές του Enrichment factor βρέθηκαν μικρότερες για την Χίο και την Θεσσαλία. Ακόμη, για τον PI παρατηρούμε πως στην Λέσβο οι τιμές του δείκτη είναι αρκετά μεγαλύτερες για τα: ^{232}Th , ^{238}U και ^{40}K σε σχέση με τις τιμές του PI των μελετών που έλαβαν χώρα στην Μαλαισία, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 50**. Όσον αφορά στην Χίο, παρατηρούμε πως οι τιμές του Pollution Index για το ^{232}Th και το ^{40}K βρέθηκαν αρκετά μεγαλύτερες από αυτές για την Μαλαισία. Ωστόσο, για το ^{238}U η τιμή του PI στην Χίο είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για τις μελέτες της Μαλαισίας.

Τέλος, σύμφωνα με τον **Πίνακα 50** παρατηρούμε πως για την Θεσσαλία οι τιμές του PI και για τα τρία ραδιονουκλεΐδια βρέθηκαν πολύ κοντά στις παγκόσμιες τιμές.

Γενικά, οι ενεργότητες των ραδιονουκλεϊδίων σχετίζονται άμεσα με τους γεωλογικούς σχηματισμούς της εκάστοτε περιοχής. Ηφαιστειογενή πετρώματα και εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε ανθρακικές ενώσεις παρουσιάζουν μεγάλο εμπλουτισμό σε ραδιονουκλεΐδια. Συνεπώς, το αποτέλεσμα που προκύπτει από την ανάλυση των περιβαλλοντικών δεικτών είναι λογικό. Πιο συγκεκριμένα, η Λέσβος στην οποία οι περισσότερες περιοχές δειγματοληψίας ήταν ηφαιστειογενή πετρώματα, παρουσίασε τον μεγαλύτερο εδαφικό εμπλουτισμό σε ραδιονουκλεΐδια, ενώ η Θεσσαλία η οποία αποτελείτε κατά κύριο λόγο από σχιστολιθικά εδάφη παρουσίασε τον μικρότερο εδαφικό εμπλουτισμό.

Επιπλέον, για τις τρεις περιοχές μελέτης υπολογίστηκαν κάποιοι παράμετροι ασφαλείας ραδιενέργειας. Αυτές οι παράμετροι, είναι ο External Hazard Index, ο Radium equivalent activity, η δόση και η δραστική δόση. Επίσης, υπολογίστηκαν η δόση Καισίου και η δραστική δόση Καισίου. Για τον External Hazard Index και για τον Radium equivalent activity η Λέσβος παρουσίασε την μεγαλύτερη μέση τιμή, ακολουθεί η Χίος, ενώ την μικρότερη μέση τιμή παρουσίασε η Θεσσαλία. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί, πως για όλες τις περιοχές δειγματοληψίας και στις τρεις περιοχές μελέτης οι παραπάνω δείκτες υπολογίστηκαν εντός των αποδεκτών ορίων με εξαίρεση την περιοχή της Αρίσβης και του Άργεννου στην Λέσβο οι οποίες είχαν τιμές μεγαλύτερες από 1 και 370(Bq/kg) για τους H_{EX} και Ra_{eq} αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, η Λέσβος παρουσίασε την μεγαλύτερη μέση τιμή δόσης και δραστικής δόσης, ακολουθεί η Χίος, ενώ την μικρότερη μέση τιμή δόση και δραστικής δόσης παρουσίασε η Θεσσαλία. Τέλος, όσον αφορά στην δόση Καισίου και στην δραστική δόση Καισίου οι μικρότερες μέσες τιμές βρέθηκαν για την περιοχή της Χίου, ενώ οι μεγαλύτερες μέσες τιμές βρέθηκαν στην Θεσσαλία. Παρατηρούμε λοιπόν, πως ενώ για τις παραμέτρους ασφαλείας ραδιενέργειας που αφορούν τα φυσικά ραδιονουκλεΐδια η Θεσσαλία παρουσίασε τις μικρότερες τιμές, για την δόση Καισίου και την δραστική Καισίου παρουσίασε τις μεγαλύτερες τιμές. Για αυτόν τον λόγο, είναι σημαντικό να μελετάτε ξεχωριστά η συμπεριφορά του Καισίου καθώς ανήκει στα τεχνητά ραδιονουκλεΐδια και η παρουσία του στα εδάφη μιας περιοχής οφείλεται σε διαφορετικές πηγές από τα υπόλοιπα ραδιονουκλεΐδια. Σύμφωνα με τις τιμές των δύο παραμέτρων που αφορούν το Κάισιο, και στις τρεις εξεταζόμενες περιοχές, ο κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία που προκύπτει από την παρουσία του Καισίου είναι αμελητέος.

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση εφαρμόζοντας Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA) και υπολογίζοντας τους Pearson's correlation coefficients. Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με σκοπό την εύρεση της συσχέτισης μεταξύ των υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της PCA για την Λέσβο και την Χίο βρέθηκε πως υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ των ραδιονουκλεϊδίων: ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{232}Th . Αντιθέτως, βρέθηκε πως μεταξύ του ^{40}K και του ^{137}Cs και των υπολοίπων ραδιονουκλεϊδίων υπάρχει αρνητική συσχέτιση. Όσον αφορά στα αποτελέσματα της PCA για την Θεσσαλία, βρέθηκε πως υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ των ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K , ενώ αρνητική μεταξύ του ^{137}Cs και των προαναφερθέντων ραδιονουκλεϊδίων.

Οι τιμές των Pearson's correlation coefficients επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών σε μεγάλο βαθμό. Πιο συγκεκριμένα, για την Λέσβο βρέθηκε πως τα ραδιονουκλεΐδια: ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K παρουσιάζουν από ισχυρή έως πολύ ισχυρή συσχέτιση, ενώ το ^{137}Cs με τα υπόλοιπα ραδιονουκλεΐδια δεν παρουσιάζει καμία συσχέτιση. Για την Χίο, οι τιμές των Pearson's correlation coefficients φανερώνουν πως τα ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K παρουσιάζουν από ισχυρή έως πολύ ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τους. Εξαιρέση αποτελούν το ^{238}U , το οποίο παρουσιάζει μέτρια συσχέτιση με το ^{226}Ra , και το ^{40}K το οποίο παρουσιάζει μέτρια συσχέτιση με τα ^{226}Ra και ^{238}U . Αντιθέτως, το ^{137}Cs με όλα τα υπόλοιπα ραδιονουκλεΐδια δεν παρουσιάζει καμία συσχέτιση. Τέλος, για την Θεσσαλία βρέθηκε πως τα: ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K παρουσιάζουν από ισχυρή έως πολύ ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τους, ενώ μεταξύ του ^{137}Cs και των υπολοίπων ραδιονουκλεϊδίων δεν υπάρχει καμία συσχέτιση.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο από την PCA, όσο και από τις τιμές των Pearson's correlation coefficients είναι λογικά. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K που ανήκουν στα φυσικά ραδιονουκλεΐδια ενώ δεν υπάρχει καμία συσχέτιση μεταξύ του ^{137}Cs που ανήκει στα τεχνητά ραδιονουκλεΐδια και των υπολοίπων φυσικών ραδιονουκλεϊδίων. Αυτό σημαίνει, πως οι πηγές προέλευσης των ^{226}Ra , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th και ^{40}K και είναι παρόμοιες σε αντίθεση με τις πηγές προέλευσης του ^{137}Cs που οφείλονται εξ ολοκλήρου στην ανθρωπογενή δραστηριότητα. Επιπλέον, η ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των φυσικών ραδιονουκλεϊδίων φανερώνει πως η συμπεριφορά τους στην φύση αλλά και η κατανομή τους στα εδάφη είναι παρόμοια.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως παρόλο που το Κάλιο παρουσίασε στις περισσότερες περιπτώσεις θετική συσχέτιση με τα υπόλοιπα φυσικά ραδιονουκλεΐδια· το Ράδιο, το Ουράνιο και το Θόριο παρουσίασαν ισχυρότερη συσχέτιση μεταξύ τους συγκριτικά με το Κάλιο. Αυτό οφείλεται στην αφθονία του Καλίου στην φύση το οποίο έχει περισσότερες πηγές προέλευσης καθώς και στο γεγονός πως το Κάλιο εμφανίζεται μεμονωμένα στην φύση σε αντίθεση με τα υπόλοιπα φυσικά ραδιονουκλεΐδια τα οποία είναι μέλη ραδιενεργών σειρών διάσπασης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μελετήθηκε η χωρική κατανομή των ραδιονουκλεϊδίων δημιουργώντας τους απαραίτητους χάρτες χωρικής κατανομής με την μέθοδο των σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων.

Για την περιοχή της Λέσβου, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 20-24** μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας του Ράδιου (^{226}Ra , ^{228}Ra), του Ουράνιου (^{238}U) και του Θορίου (^{228}Th , ^{232}Th) παρουσιάζονται στο Βόρειο και στο κεντρικό μέρος του νησιού ενώ οι μικρότερες παρουσιάζονται στο Νοτιοανατολικό μέρος. Επίσης, σύμφωνα με την **Εικόνα 25** οι μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας του Καλίου (^{40}K) παρουσιάζονται στο Βόρειο και στο κεντρικό μέρος του νησιού. Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται μεγάλη ενεργότητα στο Νότιο μέρος του νησιού γύρω από την περιοχή του Τριγώνα. Τέλος, σύμφωνα με την **Εικόνα 26** οι μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας του Καισίου (^{137}Cs) παρουσιάζονται στο κεντρικό μέρος της Λέσβου, γύρω από την περιοχή της Μέσας, και στο Νοτιοανατολικό μέρος του νησιού. Οι μικρότερες τιμές ενεργότητας Καισίου βρίσκονται στο Δυτικό και στο Βόρειο μέρος του νησιού.

Για την περιοχή της Χίου, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 27 και 29** οι μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας του Ράδιου (^{226}Ra , ^{228}Ra) παρουσιάζονται στο Βορειοδυτικό, στο κεντρικό και στο Νοτιοδυτικό μέρος του νησιού, ενώ σύμφωνα με την **Εικόνα 28** οι μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας του Ουράνιου (^{238}U) παρουσιάζονται στο Βορειοδυτικό και στο κεντρικό μέρος. Επιπλέον, σύμφωνα με τις **Εικόνες 30 και 31** οι μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας του Θορίου (^{228}Th , ^{232}Th) παρουσιάζονται στο Βορειοδυτικό μέρος της Χίου, γύρω από την περιοχή της Παρπαριάς και στο Νοτιοδυτικό μέρος της Χίου, γύρω από την περιοχή των Κάτω Φανών. Ακόμη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 32** οι μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας του Καλίου (^{40}K) βρίσκονται στο Βόρειο μέρος του νησιού, κοντά στην περιοχή του Πελλιναίου, ενώ οι μικρότερες στο Νοτιοανατολικό. Τέλος, σύμφωνα με την **Εικόνα 33** οι μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας του Καισίου (^{137}Cs) παρουσιάζονται στο κεντρικό μέρος της Χίου, γύρω από τα Αυγώνυμα.

Για την περιοχή της Θεσσαλίας, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 34-39** μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας του Ράδιου (^{226}Ra , ^{228}Ra), του Ουράνιου (^{238}U), του Θορίου (^{228}Th , ^{232}Th) και του Καλίου (^{40}K) παρουσιάζονται στο Βορειοανατολικό μέρος της Θεσσαλίας, γύρω από τις περιοχές των Τεμπών και της Όσσας, και στο κεντρικό μέρος της Θεσσαλίας γύρω από την περιοχή του Θαυμακού. Αντιθέτως, οι μικρότερες τιμές ενεργότητας για τα προαναφερθέντα ραδιονουκλείδια παρουσιάζονται στο Βορειοδυτικό τμήμα της Θεσσαλίας, γύρω από το Περτούλι, και στο κεντρικό μέρος της Θεσσαλίας, γύρω από την περιοχή της Μεσσοράχης. Τέλος, σύμφωνα με την **Εικόνα 40** οι μεγαλύτερες τιμές ενεργότητας του Καισίου (^{137}Cs) παρουσιάζονται στο Δυτικό μέρος της Θεσσαλίας κοντά στην περιοχή της Πηγής και των Τρικάλλων.

6. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς δείκτες που υπολογίστηκαν, η Λέσβος παρουσιάζει την μεγαλύτερη ρύπανση εδαφών συγκριτικά με την Χίο και την Θεσσαλία για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια. Σύμφωνα με τον EF στα περισσότερα σημεία δειγματοληψίας της υπάρχει σοβαρός εδαφικός εμπλουτισμός, ενώ σύμφωνα με τον PI οι περιοχές της χαρακτηρίζονται από μέτρια έως υψηλή ρύπανση. Τις μικρότερες τιμές των περιβαλλοντικών δεικτών παρουσίασε η Θεσσαλία, ενώ οι Χίος παρουσίασε υψηλότερες τιμές από την Θεσσαλία, αλλά σαφώς μικρότερες από την Λέσβο.

Συγκρίνοντας τους περιβαλλοντικούς δείκτες μεταξύ τους βλέπουμε πως σύμφωνα με τον I_{geo} δεν υπάρχει σημαντικό πρόβλημα ρύπανσης από τα ραδιονουκλεΐδια, ενώ σύμφωνα με τον EF φαίνεται να υπάρχει σοβαρός εμπλουτισμός στην Λέσβο, όχι όμως στις περισσότερες περιοχές της Χίου και της Θεσσαλίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ο Pollution Index φαίνεται να υπερεκτιμά το μέγεθος της ρύπανσης των εδαφών. Πιο συγκεκριμένα, ενώ σύμφωνα με τον I_{geo} και τον EF τα εδάφη στην Χίο και την Θεσσαλία δεν παρουσιάζουν σημαντική ρύπανση, σύμφωνα με τον PI αρκετές περιοχές χαρακτηρίζονται από υψηλή ρύπανση εδαφών.

Σύμφωνα με τις παραμέτρους ασφαλείας ραδιενέργειας που υπολογίστηκαν οι κάτοικοι της Λέσβου φαίνεται να διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο έκθεσης σε ραδιενέργεια, συγκριτικά με τους κατοίκους της Χίου και της Θεσσαλίας. Πιο συγκεκριμένα, στην Λέσβο βρέθηκαν οι υψηλότερες τιμές για τον External Hazard Index, για τον Radium equivalent activity, την δόση και την δραστική δόση. Για τις δύο πρώτες παραμέτρους, η μέση τιμή στην Λέσβο, υπολογίστηκε εντός των αποδεκτών βιβλιογραφικών ορίων. Ωστόσο, οι τιμές της δόσης και της δραστικής δόσης, υπολογίστηκαν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες παγκόσμιες μέσες τιμές. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί πως οι τιμές της δόσης και της δραστικής δόσης και για την Χίο παρουσίασαν μεγαλύτερη τιμή από τις αντίστοιχες παγκόσμιες μέσες τιμές. Στην Θεσσαλία, οι τιμές για τις προαναφερθέντες παραμέτρους είχαν πολύ χαμηλή τιμή συγκριτικά με την Λέσβο και την Χίο αλλά και με άλλες παγκόσμιες βιβλιογραφικές τιμές. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα, πως οι κάτοικοι της Θεσσαλίας διατρέχουν τον μικρότερο κίνδυνο έκθεσης σε ραδιενέργεια. Από την άλλη πλευρά, στην Θεσσαλία υπολογίστηκαν οι μεγαλύτερες τιμές δόσης Καισίου και δραστικής δόσης Καισίου. Ως συμπέρασμα προκύπτει, πως και για τις τρεις εξεταζόμενες περιοχές ο κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία τόσο από τα φυσικά ραδιονουκλεΐδια όσο και από το Καίσιο είναι μικρός.

Από την στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, συμπεραίνουμε πως το Ράδιο, το Ουράνιο, το Θόριο και το Κάλιο που ανήκουν στα φυσικά ραδιονουκλεΐδια συσχετίζονται, ενώ το Καίσιο το οποίο ανήκει στα τεχνητά δεν συσχετίζεται με τα υπόλοιπα. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται σαφές πως τα φυσικά ραδιονουκλεΐδια έχουν κοινές πρωτογενείς πηγές και η ταυτόχρονη παρουσία τους στα εδάφη είναι λογική. Το ίδιο συμβαίνει και με την συμπεριφορά τους στην φύση. Αντιθέτως, το τεχνητό Καίσιο δεν έχει την ίδια εδαφική κατανομή και συμπεριφορά, ενώ ταυτόχρονα οι πηγές από τις οποίες προέρχεται είναι τελείως διαφορετικές από τα φυσικά ραδιονουκλεΐδια.

7. Βιβλιογραφία

- Abdullah, A., Hamzah, Z., Saat, A., & Wood, A. K. (2016). Vertical and horizontal distribution of radionuclides (^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K) in sediment from Manjung coastal water area Perak, Malaysia. *AIP Conference Proceedings*, 1704. <https://doi.org/10.1063/1.4940107>
- Abdullahi, S., Ismail, A. F., & Samat, S. (2019). Determination of indoor doses and excess lifetime cancer risks caused by building materials containing natural radionuclides in Malaysia. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(1), 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.09.017>
- Al-Hamarneh, I. F., & Awadallah, M. I. (2009). Soil radioactivity levels and radiation hazard assessment in the highlands of northern Jordan. *Radiation Measurements*, 44(1), 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.11.005>
- Antoniadis, V., Golia, E. E., Liu, Y. T., Wang, S. L., Shaheen, S. M., & Rinklebe, J. (2019). Soil and maize contamination by trace elements and associated health risk assessment in the industrial area of Volos, Greece. *Environment International*, 124(December 2018), 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.053>
- Bailey, T., & Gatrell, A. (1995). *Interactive Spatial Data Analysis*.
- Bierman, P., Lewis, M., Ostendorf, B., & Tanner, J. (2011). A review of methods for analysing spatial and temporal patterns in coastal Water quality. *Ecological Indicators*, 11(1), 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.11.001>
- Ćujić, M., Dragović, S., Đorđević, M., Dragović, R., Gajić, B., & Miljanić, Š. (2015). Radionuclides in the soil around the largest coal-fired power plant in Serbia: radiological hazard, relationship with soil characteristics and spatial distribution. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(13), 10317–10330. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3888-2>
- Durusoy, A., & Yildirim, M. (2017). Determination of radioactivity concentrations in soil samples and dose assessment for Rize Province, Turkey. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10(4), 348–352. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2017.09.005>
- Elias, Hamzah, M. S., Rahman, S. A., Siong, W. B., & Salim, N. A. A. (2012). Assessment of Sediment Quality Collected from Tunku Abdul Rahman Park, Sabah. *Jurnal Sains Nuklear Malaysia*, 24(1), 59–70.
- ERDA. (1975). *Environmental Monitoring At Major U.S. Energy Research and Development Administration Contractor Sites*.
- Fyfe, J. C., Boer, G. J., & Flato, G. M. (1999). The Arctic and Antarctic Oscillations and their projected changes under global warming. *Geophysical Research Letters*, 26(11), 1601–1604. <https://doi.org/10.1029/1999GL900317>
- Galanda, D., Rajec, P., Mátel, L., Roszkopfová, O., & Dulanská, S. (2009). Separation techniques for quantification of radionuclides in environmental samples. *TheScientificWorldJournal*, 9, 1206–1214. <https://doi.org/10.1100/tsw.2009.124>
- Khalafallah, A. A., Salem, E., Abd, M., & Wahab, E. (2019). Contamination and Hazard Indices of Heavy Metals and Natural Radionuclides Activity in Mangrove and Seagrass Habitats , Red Sea Coast , Egypt. 502–523.

- Kovler, K., Haquin, G., Manasherov, V., Ne'Eman, E., & Lavi, N. (2002). Natural radionuclides in building materials available in Israel. *Building and Environment*, 37(5), 531–537. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00048-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00048-8)
- Kritidis, P., & Florou, H. (1995). Environmental study of radioactive caesium in Greek lake fish after the chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 28(3), 285–293. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(95\)97300-2](https://doi.org/10.1016/0265-931X(95)97300-2)
- Krivoruchko, K. (2011). *Spatial Statistical Data Analysis for GIS Users*.
- Kumamoto, Y., Aoyama, M., Hamajima, Y., Nishino, S., Murata, A., & Kikuchi, T. (2019). Radiocesium in the western subarctic area of the North Pacific ocean, Bering Sea, and Arctic Ocean in 2015 and 2017. *Polar Science*, 21, 228–232. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.08.007>
- Kumar, A., Joshi, V. M., Mishra, M. K., Karpe, R., Rout, S., Narayanan, U., Tripathi, R. M., Singh, J., Kumar, S., Hegde, A. G., & Kushwaha, H. S. (2012). Distribution, enrichment and principal component analysis for possible sources of naturally occurring and anthropogenic radionuclides in the agricultural soil of Punjab State, India. *Radiation Protection Dosimetry*, 150(1), 71–81. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr366>
- Longley, P., & Goodchild, M. (2005). *Geographic Information Systems and Science*.
- Monged, M. H. E., Hassan, H. B., & El-Sayed, S. A. (2020). Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Natural Radionuclides and Trace Elements in Agricultural Soil of Northeastern Nile Valley, Egypt. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(7). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04678-9>
- Nenadović, S. S., Nenadović, M. T., Vukanac, I. S., Omerašević, M. O., & Kljajević, L. M. (2011). Radiological hazards of ¹³⁷Cs in cultivated and undisturbed areas. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 26(2), 115–118. <https://doi.org/10.2298/NTRP1102115N>
- Papaefthymiou, H., & Gouseti, O. (2008). Natural radioactivity and associated radiation hazards in building materials used in Peloponnese, Greece. *Radiation Measurements*, 43(8), 1453–1457. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.03.032>
- Reid, M. K., & Spencer, K. L. (2009). Use of principal components analysis (PCA) on estuarine sediment datasets: The effect of data pre-treatment. *Environmental Pollution*, 157(8–9), 2275–2281. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.03.033>
- Sapiro, J. (2002). *Radiation Protection*.
- Sloof, J. E., & Wolterbeek, B. T. (1992). Lichens as biomonitors for radiocaesium following the chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 16(3), 229–242. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(92\)90002-B](https://doi.org/10.1016/0265-931X(92)90002-B)
- Sluiter, R. (2009). *Interpolation methods for climate data*.
- Stevanović, V., Gulan, L., Milenković, B., Valjarević, A., Zeremski, T., & Penjišević, I. (2018). Environmental risk assessment of radioactivity and heavy metals in soil of Toplica region, South Serbia. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(5), 2101–2118. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0085-0>
- Todorović, D. J., & Janković, M. M. (2011). Natural radioactivity of materials used in industry and construction in Serbia. *Journal of Environmental Science and*

- Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 46(10), 1147–1153. <https://doi.org/10.1080/10934529.2011.590733>
- Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M., Uematsu, M., Misumi, K., Maeda, Y., Yoshida, Y., & Hayami, H. (2013). One-year, regional-scale simulation of ¹³⁷Cs radioactivity in the ocean following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Biogeosciences*, 10(8), 5601–5617. <https://doi.org/10.5194/bg-10-5601-2013>
- Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of some major elements of the Earth's crust. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 72(February), 175–192.
- Tzoraki, O., Zkeri, E., Lasithiotakis, M., & Sinioros, P. (2019). Trace metals' contamination in water and soils in the vicinity of a small–medium waste electrical and electronic equipment recycling plant. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, August 2018, 1–17. <https://doi.org/10.1002/ep.13343>
- UNSCEAR. (2000). *Sources and effects of ionizing radiation*.
- Unwin, D. (1981). *Introductory spatial analysis*.
- Yakovlev, E. Y., Zykova, E. N., Zikov, S. B., Malkov, A. V., & Bazhenov, A. V. (2020). Heavy metals and radionuclides distribution and environmental risk assessment in soils of the Severodvinsk industrial district, NW Russia. *Environmental Earth Sciences*, 79(10). <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08967-8>
- Zainal, F., Hamzah, Z., Saat, A., Wood, K., & Alias, M. (2016). Study on vertical distribution of radionuclides (⁴⁰K, Th and U) in soil collected from Manjung district. *AIP Conference Proceedings*, 1704. <https://doi.org/10.1063/1.4940106>
- Αναγνωστοπούλου, Ε. (2013). *Πλημμυρική επικινδυνότητα στη Δυτική Θεσσαλία*.
- Ανεσιάδου, Α. (2014). *Συγκεντρώσεις Pb και U σε δείγματα χώματος από την Αλγερία*.
- Αντωνόπουλος-Ντόμης, Μ. (2004). *Ραδιενέργεια σε απλά ελληνικά*.
- Γιαννάκου, Ά. (n.d.). *ΠΥΡΗΝΙΚΟ ΑΤΥΧΗΜΑ FUKUSHIMA ΚΑΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑ*.
- Γκρέκα, Α. (2010). *ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΟΛΥΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΤΕΝΟΥ ΜΥΤΙΛΗΝΗΣ*.
- Γναρδέλλης, Χ. (2003). *Εφαρμοσμένη Στατιστική*.
- Δεδούσης, Σ., Ζαμάνη, Μ., & Σαμψωνίδης, Δ. (n.d.). *Σημειώσεις Πυρηνικής Φυσικής Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*.
- Θωμαΐδου, Ε. (2009). *Η γεωλογική δομή της νήσου Λέσβου*.
- Καλογήρου, Σ. (2015). *Χωρική Ανάλυση. Μεθοδολογία και εφαρμογές με τη γλώσσα R*.
- Τσάμος, Π. (2015). *Εποχιακή διακύμανση ραδιονουκλιδίων και βαρέων μετάλλων σε εδάφη, ύδατα και λίμνες της λιγνιτοφόρου λεκάνης Πτολεμαΐδας*.

- Τσαούση, Α. (2016). *Πολυμεταβλητή ανάλυση χρονοσειρών ατμοσφαιρικών ρύπων και χαρτογραφική απεικόνιση της διασποράς τους.*
- Τσούτσια, Α. (2012). *Περιβαλλοντική μελέτη των επιφανειακών ιζημάτων πυθμένα, της ευρύτερης περιοχής του κεντρικού λιμένα της νήσου Χίου.*

8. Παράρτημα

Πίνακας 6: Μετρήσεις ενεργοτήτων των υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδίων για την Λέσβο

| | Ra-226 | | U-238 | | Ra-228 | | Th-228 | | Th-232 | | K-40 | | Cs-137 | |
|------------------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|
| | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± |
| Αμαλή | 18,2451 | 6,3638 | 13,708 | 3,1695 | 10,1153 | 1,0068 | 11,4329 | 0,7114 | 10,9941 | 0,581 | 141,5609 | 11,6199 | 47,5704 | 2,7472 |
| Βαρεία | 22,8967 | 5,5901 | 8,8482 | 1,7763 | 21,3983 | 3,2864 | 18,8767 | 1,9905 | 19,5535 | 1,7026 | <16,2 | | 3,3059 | 0,6349 |
| Μυτιλήνη | 63,6072 | 13,8556 | 29,292 | 5,5499 | 40,2045 | 6,5064 | 39,2389 | 4,2831 | 39,5308 | 3,5775 | <37,9 | | 17,1393 | 3,0312 |
| Καμμένο Δάσος | 38,9406 | 10,5589 | 18,031 | 4,3375 | 20,2501 | 3,0847 | 15,3678 | 1,7403 | 16,5465 | 1,5157 | 138,2244 | 23,2574 | 38,465 | 5,5878 |
| Μέσα | 64,7429 | 12,9394 | 32,508 | 5,7443 | 44,2648 | 6,097 | 41,8313 | 3,9563 | 42,5523 | 3,3188 | 424,2089 | 66,5615 | 190,9143 | 26,9981 |
| Πέτσοφας | 111,0976 | 14,7691 | 62,4893 | 7,3015 | 99,7821 | 9,3783 | 94,0271 | 5,9734 | 95,688 | 5,0382 | 609,4399 | 71,8323 | 6,0631 | 0,7826 |
| Σκαλοχώρι | 116,4026 | 16,4648 | 57,625 | 7,4571 | 92,5194 | 9,7941 | 91,6538 | 6,4302 | 91,9145 | 5,3752 | 756,4353 | 97,6722 | 1,9605 | 0,3704 |
| Αρίσβη | 202,4343 | 51,2363 | 109,38 | 27,1512 | 123,5063 | 28,4829 | 117,6858 | 16,7894 | 119,1867 | 14,4637 | 1158,018 | 291,8644 | 5,3095 | 1,437 |
| Αντισσα | 39,1895 | 7,4926 | 19,588 | 3,2221 | 39,563 | 5,3104 | 33,8469 | 3,0612 | 35,2726 | 2,6521 | 580,4233 | 86,6569 | <0,604 | |
| Δάφια | 117,4044 | 10,3924 | 80 | 5,7737 | 96,1774 | 5,1474 | 90,8621 | 3,7188 | 92,685 | 3,0144 | 650,444 | 49,1731 | 4,309 | 0,5048 |
| Σίγρι | 51,6887 | 8,9196 | 30,4161 | 4,5535 | 47,2167 | 6,1273 | 44,7353 | 3,7625 | 45,4148 | 3,2063 | 613,3031 | 93,5082 | <0,386 | |
| Ταβάρι | 35,3591 | 10,6219 | 22,655 | 6,0668 | 29,9159 | 7,0081 | 30,352 | 4,558 | 30,2224 | 3,821 | 436,3818 | 108,6474 | <0,548 | |
| Τριγώνας | 70,9531 | 16,6846 | 38,791 | 7,8587 | 65,1719 | 10,1974 | 62,3404 | 6,4209 | 63,1443 | 5,4335 | 1110,509 | 183,6228 | 64,6389 | 10,5556 |
| Τσίγκος | 10,3654 | 4,8985 | 8,468 | 2,4668 | 6,3187 | 1,4611 | 4,4866 | 0,8072 | 4,9558 | 0,7065 | 74,3681 | 16,4227 | 38,169 | 6,7137 |
| Σκάλα Πολυχνίτου | 58,9713 | 6,7221 | 32,115 | 3,2989 | 76,3803 | 4,5681 | 69,842 | 3,1594 | 71,9576 | 2,5985 | <30,9 | | 2,5471 | 0,3681 |
| Αγιάσος | 46,7846 | 10,775 | 27,028 | 5,7682 | 62,059 | 10,5292 | 60,7774 | 6,6138 | 61,14 | 5,6006 | 628,2519 | 119,8505 | 18,2003 | 3,3835 |
| Αργεννος | 184,6188 | 25,2683 | 84,9516 | 10,5135 | 153,3292 | 16,681 | 142,6703 | 10,1037 | 145,5312 | 8,642 | 1199,262 | 158,9003 | 7,0868 | 0,9874 |
| Παπάδος | 26,1327 | 6,3319 | 16,274 | 3,0187 | 19,2249 | 1,6711 | 17,8754 | 1,174 | 18,3213 | 0,9607 | 278,2409 | 24,852 | 3,8336 | 0,4646 |

Πίνακας 7: Μετρήσεις των ενεργοτήτων των υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδίων για την Χίο

| | Ra-226 | | U-238 | | Ra-228 | | Th-228 | | Th-232 | | K-40 | | Cs-137 | |
|-----------|----------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|
| | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) |
| Ναγός | 43,0812 | 7,6287 | 22,358 | 3,28 | 30,3853 | 3,5486 | 26,8839 | 2,2295 | 27,8749 | 1,8878 | 592,9674 | 78,7272 | 11,2645 | 1,5031 |
| Πελλιναίο | 62,6852 | 10,3985 | 30,471 | 4,5498 | 36,8281 | 4,5491 | 36,9989 | 3,0992 | 36,9448 | 2,5613 | 956,2805 | 125,3181 | <0,2167 | |
| Παρπαριά | 65,6467 | 12,82 | 31,693 | 5,6455 | 41,7447 | 6,2957 | 43,4197 | 4,287 | 42,8891 | 3,5435 | 848,1016 | 134,9485 | 5,2621 | 0,981 |
| Αυγώνυμα | 75,5211 | 12,8378 | 30,497 | 5,1636 | 31,7532 | 3,5758 | 27,9798 | 2,2727 | 29,0656 | 1,9181 | 439,3291 | 54,1102 | 41,3189 | 4,7333 |
| Βέσσα | 38,2713 | 12,1872 | 35,0546 | 8,8713 | 29,0079 | 4,8784 | 26,5632 | 3,1023 | 27,2672 | 2,6178 | 361,7729 | 64,1842 | 5,0795 | 1,0748 |
| Μεστά | 69,6096 | 10,8706 | 28,466 | 4,327 | 43,26 | 4,7795 | 37,8565 | 2,8826 | 39,2977 | 2,4684 | 665,1556 | 87,3154 | 0,8592 | 0,2195 |
| Κάτω Φανά | 104,3178 | 16,767 | 29,356 | 4,9897 | 49,4673 | 6,2448 | 41,392 | 3,5376 | 43,3539 | 3,078 | 526,9298 | 77,9526 | <0,636 | |
| Γρίδια | 27,2899 | 6,6868 | 13,849 | 2,9618 | 9,4911 | 1,784 | 8,938 | 1,1543 | 9,1012 | 0,9691 | 174,1693 | 31,4075 | 5,2389 | 1,0214 |

Πίνακας 8: Μετρήσεις των ενεργοτήτων των υπό μελέτη ραδιονουκλεϊδίων για την Θεσσαλία

| | Ra-226 | | U-238 | | Ra-228 | | Th-228 | | Th-232 | | K-40 | | Cs-137 | |
|------------------------------|---------|------|---------|-----|---------|-----|---------|---------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|
| | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) | ± | (Bq/kg) |
| Νεράιδα | 42,9 | 9,1 | 26,2 | 5,1 | 22,4 | 2,1 | 17,2 | 1,8 | 19,7 | 1,1 | 407,5 | 36,9 | 14,7 | 1,4 |
| Αγιόκαμπος | 20,8 | 5 | 12,1 | 2,8 | 12,5 | 1,3 | 11,1 | 1,1 | 12 | 0,7 | 309,3 | 35,3 | 7,1 | 0,8 |
| Τρίκαλλα | 35,2 | 8,7 | 13,6 | 3,6 | 22 | 3,9 | 20,5 | 3,3 | 21,3 | 2,1 | 415,8 | 78,4 | 20,5 | 3,7 |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | 50,7 | 7,9 | 31,5 | 4,3 | 27,8 | 3 | 24,3 | 2,6 | 25,9 | 1,7 | 456,5 | 57,6 | 0,6 | 0,2 |
| Όσσα | 58,2 | 15 | 40,7 | 9,1 | 43,8 | 9,1 | 36,5 | 6,2 | 39,2 | 4,4 | 700,7 | 155,7 | <0,8 | 0,8 |
| Καλλιφώνι | 35,6 | 8,6 | 19 | 4,1 | 16,9 | 2,9 | 13,1 | 2,2 | 14,8 | 1,5 | 430,9 | 76,4 | 32,1 | 5,4 |
| Ανάβρα | 12,7 | 4,9 | 8,8 | 2,9 | 7,6 | 0,7 | 7,2 | 0,7 | 6,9 | 0,4 | 89,2 | 6,7 | 58,1 | 3,2 |
| Θαυμακός | 45,5 | 7,7 | 30,2 | 4,7 | 28,6 | 2,5 | 21,7 | 1,9 | 24,6 | 1,3 | 427,1 | 42,9 | 17,8 | 1,7 |
| Μεσορράχη | 36,2 | 9,1 | 18,8 | 4,4 | 17,1 | 3,5 | 14 | 2,5 | 15,2 | 1,7 | 386 | 82,9 | 32,7 | 6,7 |
| Βόλος | 18,6 | 6,7 | 11 | 3,8 | 8,6 | 1,9 | 7,2 | 1,4 | 7,7 | 0,9 | 108,5 | 23,4 | 1,6 | 0,4 |
| Περτούλι | 26 | 7 | 10,3 | 3,6 | 7,4 | 1,3 | 6,2 | 1,1 | 6,6 | 0,7 | 106,4 | 17 | 8,4 | 1,3 |
| Δομοκός | 42,2 | 4,8 | 26,4 | 2,5 | 28,4 | 1,8 | 24,6 | 1,6 | 26,5 | 1 | 486,7 | 39,7 | 71,8 | 5,1 |
| Πηγή | 41,8 | 7,1 | 31,4 | 4 | 29,6 | 1,7 | 24,9 | 1,6 | 27,6 | 1 | 552 | 35,5 | 142,2 | 8,4 |
| Λίμνη Πλαστήρα | 27,1 | 5,4 | 23,8 | 3,2 | 26,8 | 1,5 | 23,8 | 1,4 | 25,6 | 0,9 | 651,2 | 43,6 | 1,4 | 0,2 |
| Τέμπη | 43,8 | 11,8 | 38,9 | 9,3 | 40,7 | 7,7 | 39,8 | 5,9 | 40,9 | 4,1 | 603,7 | 120 | 2,1 | 0,5 |
| Τσαγκαράδα | 22,6 | 5,6 | 20,1 | 3,6 | 12,4 | 1,2 | 11,1 | 1,1 | 11,9 | 0,7 | 308,4 | 27,9 | <0,5 | 0,5 |
| Σοφάδες | 46,1 | 8,4 | 25,6 | 4,7 | 23,8 | 2 | 21,7 | 1,9 | 23 | 1,2 | 437,1 | 41,4 | 9,9 | 1 |
| Κιλελλέρ | 41,1 | 7,5 | 25,9 | 4,2 | 26,7 | 2 | 24,8 | 1,9 | 26 | 1,2 | 489 | 41,4 | 43,2 | 3,4 |
| Αγιά | 22 | 6,2 | 17,1 | 4,2 | 17,1 | 1,9 | 13,7 | 1,5 | 14,5 | 1 | 264,3 | 31,1 | 36,1 | 4 |

Πίνακες Αποτελεσμάτων

Λέσβος

Πίνακας 9: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Λέσβο

| Igeo | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Αμαλή | -0,528 | -0,699 | -0,859 | -0,806 | -0,823 | -0,940 | -0,213 |
| Βαρεία | 0,138 | -0,321 | -0,056 | -0,111 | -0,095 | -1,376 | -1,371 |
| Μυτιλήνη | 0,582 | 0,199 | 0,218 | 0,207 | 0,210 | -1,006 | -0,656 |
| Καμμένο Δάσος | -0,199 | -0,580 | -0,557 | -0,677 | -0,645 | -0,950 | -0,305 |
| Μέσα | 0,590 | 0,244 | 0,259 | 0,235 | 0,242 | -0,445 | 0,390 |
| Πετσοφας | 0,824 | 0,528 | 0,612 | 0,587 | 0,594 | 0,042 | -1,108 |
| Σκαλοχώρι | 0,845 | 0,493 | 0,580 | 0,575 | 0,577 | 0,200 | -1,598 |
| Αρίσβη | 1,085 | 0,771 | 0,705 | 0,684 | 0,690 | 0,294 | -1,165 |
| Αντισσα | 0,372 | 0,024 | 0,211 | 0,143 | 0,161 | 0,479 | -2,109 |
| Δάφια | 0,848 | 0,635 | 0,596 | 0,572 | 0,580 | 0,179 | -1,256 |
| Σίγρι | 0,492 | 0,215 | 0,287 | 0,264 | 0,271 | 0,228 | -2,304 |
| Ταβάρι | 0,327 | 0,087 | 0,089 | 0,096 | 0,094 | 0,203 | -2,152 |
| Τριγώνας | 0,061 | -0,247 | -0,050 | -0,069 | -0,063 | -0,045 | -0,080 |
| Τσίγκος | -0,774 | -0,908 | -1,063 | -1,212 | -1,169 | -1,220 | -0,309 |
| Σκάλα Πολυχνίτου | -0,019 | -0,329 | 0,019 | -0,020 | -0,007 | -1,095 | -1,484 |
| Αγιάσος | -0,120 | -0,404 | -0,071 | -0,080 | -0,077 | 0,213 | -0,630 |
| Αργεννος | 1,045 | 0,661 | 0,799 | 0,768 | 0,776 | 0,494 | -1,040 |
| Παπάδος | -0,372 | -0,624 | -0,580 | -0,612 | -0,601 | -0,647 | -1,307 |
| Min | -0,774 | -0,908 | -1,063 | -1,212 | -1,169 | -1,376 | -2,304 |
| Max | 1,085 | 0,771 | 0,799 | 0,768 | 0,776 | 0,494 | 0,390 |
| Average | 0,289 | -0,014 | 0,063 | 0,030 | 0,040 | -0,300 | -1,039 |

Πίνακας 10: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Λέσβο

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|---------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Αμαλή | 1,367 | 0,923 | 0,639 | 0,722 | 0,694 | 0,530 | 2,826 |
| Βαρειά | 11,633 | 4,041 | 7,431 | 6,555 | 6,790 | 0,356 | 0,360 |
| Μυτιλήνη | 32,317 | 13,376 | 13,962 | 13,626 | 13,728 | 0,833 | 1,866 |
| Καμμένο Δάσος | 2,918 | 1,214 | 1,279 | 0,971 | 1,045 | 0,518 | 2,285 |
| Μέσα | 32,894 | 14,845 | 15,372 | 14,527 | 14,777 | 9,328 | 20,785 |
| Πετσοφας | 56,445 | 28,536 | 34,651 | 32,652 | 33,229 | 13,401 | 0,660 |
| Σκαλοχώρι | 59,141 | 26,314 | 32,129 | 31,828 | 31,919 | 16,633 | 0,213 |
| Αρίσβη | 102,851 | 49,948 | 42,889 | 40,868 | 41,389 | 25,464 | 0,578 |
| Αντισσα | 19,911 | 8,945 | 13,739 | 11,754 | 12,249 | 12,763 | 0,066 |
| Δάφια | 59,650 | 36,532 | 33,399 | 31,553 | 32,186 | 14,303 | 0,469 |
| Σίγρι | 26,262 | 13,889 | 16,397 | 15,535 | 15,771 | 13,486 | 0,042 |
| Ταβάρι | 17,965 | 10,345 | 10,389 | 10,540 | 10,495 | 9,596 | 0,060 |
| Τριγώνας | 5,316 | 2,612 | 4,116 | 3,938 | 3,988 | 4,158 | 3,840 |
| Τσίγκος | 0,777 | 0,570 | 0,399 | 0,283 | 0,313 | 0,278 | 2,268 |
| Σκάλα Πολυχνίτου | 4,419 | 2,163 | 4,824 | 4,411 | 4,545 | 0,116 | 0,277 |
| Αγιάσος | 3,506 | 1,820 | 3,920 | 3,839 | 3,862 | 2,352 | 1,081 |
| Άργεννος | 93,799 | 38,793 | 53,246 | 49,544 | 50,538 | 26,371 | 0,772 |
| Παπάδος | 1,958 | 1,096 | 1,214 | 1,129 | 1,157 | 1,042 | 0,228 |
| Min | 0,777 | 0,570 | 0,399 | 0,283 | 0,313 | 0,116 | 0,042 |
| Max | 102,851 | 49,948 | 53,246 | 49,544 | 50,538 | 26,371 | 20,785 |
| Average | 29,618 | 14,220 | 16,111 | 15,238 | 15,482 | 8,418 | 2,149 |

Πίνακας 11: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Λέσβο με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| Igeo | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Αμαλή | -0,508 | -0,331 | -0,768 | -0,647 | -0,682 | -0,789 |
| Βαρείά | -0,409 | -0,521 | -0,443 | -0,430 | -0,432 | -1,730 |
| Μυτιλήνη | 0,034 | -0,001 | -0,169 | -0,112 | -0,127 | -1,361 |
| Καμμένο Δάσος | -0,179 | -0,212 | -0,467 | -0,519 | -0,505 | -0,799 |
| Μέσα | 0,042 | 0,044 | -0,127 | -0,084 | -0,095 | -0,312 |
| Πετσοφας | 0,276 | 0,328 | 0,226 | 0,268 | 0,257 | -0,155 |
| Σκαλοχώρι | 0,297 | 0,293 | 0,193 | 0,257 | 0,240 | -0,061 |
| Αρίσβη | 0,537 | 0,571 | 0,318 | 0,365 | 0,353 | 0,124 |
| Άντισσα | -0,176 | -0,176 | -0,176 | -0,176 | -0,176 | -0,176 |
| Δάφια | 0,300 | 0,435 | 0,210 | 0,253 | 0,243 | -0,127 |
| Σίγρι | -0,056 | 0,015 | -0,099 | -0,055 | -0,066 | -0,152 |
| Ταβάρι | -0,221 | -0,113 | -0,297 | -0,223 | -0,243 | -0,300 |
| Τριγώνας | 0,082 | 0,121 | 0,041 | 0,089 | 0,077 | 0,106 |
| Τσίγκος | -0,754 | -0,540 | -0,973 | -1,054 | -1,028 | -1,068 |
| Σκάλα Πολυχνίτου | 0,001 | 0,039 | 0,110 | 0,139 | 0,134 | -1,450 |
| Αγιάσος | -0,099 | -0,036 | 0,019 | 0,078 | 0,063 | -0,142 |
| Άργεννος | 0,497 | 0,461 | 0,412 | 0,449 | 0,439 | 0,139 |
| Παπάδος | -0,352 | -0,257 | -0,490 | -0,453 | -0,461 | -0,495 |
| Min | -0,754 | -0,540 | -0,973 | -1,054 | -1,028 | -1,730 |
| Max | 0,537 | 0,571 | 0,412 | 0,449 | 0,439 | 0,139 |
| Average | -0,038 | 0,007 | -0,138 | -0,103 | -0,112 | -0,486 |

Πίνακας 12: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Λέσβο με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Αμαλή | 1,433 | 2,154 | 0,787 | 1,039 | 0,959 | 0,751 |
| Βαρειά | 3,295 | 2,547 | 3,050 | 3,145 | 3,126 | 0,157 |
| Μυτιλήνη | 9,153 | 8,433 | 5,731 | 6,538 | 6,320 | 0,368 |
| Καμμένο Δάσος | 3,058 | 2,833 | 1,575 | 1,397 | 1,444 | 0,733 |
| Μέσα | 9,317 | 9,359 | 6,310 | 6,970 | 6,804 | 4,122 |
| Πετσοφας | 15,988 | 17,991 | 14,224 | 15,667 | 15,299 | 5,922 |
| Σκαλοχώρι | 16,751 | 16,591 | 13,188 | 15,271 | 14,696 | 7,350 |
| Αρίσβη | 29,131 | 31,492 | 17,605 | 19,609 | 19,056 | 11,252 |
| Αντισσα | 5,640 | 5,640 | 5,640 | 5,640 | 5,640 | 5,640 |
| Δάφια | 16,895 | 23,033 | 13,710 | 15,139 | 14,819 | 6,320 |
| Σίγρι | 7,438 | 8,757 | 6,731 | 7,454 | 7,261 | 5,959 |
| Ταβάρι | 5,088 | 6,523 | 4,264 | 5,057 | 4,832 | 4,240 |
| Τριγώνας | 5,572 | 6,094 | 5,069 | 5,668 | 5,509 | 5,888 |
| Τσίγκος | 0,814 | 1,330 | 0,491 | 0,408 | 0,432 | 0,394 |
| Σκάλα Πολυχνίτου | 8,486 | 9,246 | 10,888 | 11,637 | 11,505 | 0,300 |
| Αγιάσος | 3,674 | 4,246 | 4,827 | 5,526 | 5,334 | 3,331 |
| Αργεννος | 26,568 | 24,458 | 21,857 | 23,772 | 23,268 | 11,652 |
| Παπάδος | 2,052 | 2,557 | 1,495 | 1,625 | 1,598 | 1,475 |
| Min | 0,814 | 1,330 | 0,491 | 0,408 | 0,432 | 0,157 |
| Max | 29,131 | 31,492 | 21,857 | 23,772 | 23,268 | 11,652 |
| Average | 9,464 | 10,182 | 7,636 | 8,420 | 8,217 | 4,214 |

Πίνακας 13: Τιμές των Hex , Ra_{eq} , D , De , $D(cs)$, $De(cs)$ για την Λέσβο

| | Hex | Ra_{eq} (Bq/kg) | D (nGy/h) | De (μ Sv/y) | D_{Cs} (nGy/h) | $D_{Cs(e)}$ (μ Sv/y) |
|------------------|-------|-------------------|-------------|--------------------|------------------|---------------------------|
| Αμαλή | 0,121 | 44,867 | 20,973 | 25,721 | 1,427 | 1,750 |
| Βαρεία | 0,141 | 52,106 | 23,064 | 28,286 | 0,099 | 0,122 |
| Μυτιλήνη | 0,332 | 123,055 | 54,844 | 67,260 | 0,514 | 0,631 |
| Καμμένο Δάσος | 0,198 | 73,245 | 33,749 | 41,389 | 1,154 | 1,415 |
| Μέσα | 0,427 | 158,257 | 73,302 | 89,898 | 5,727 | 7,024 |
| Πετσοφας | 0,796 | 294,858 | 134,536 | 164,995 | 0,182 | 0,223 |
| Σκαλοχώρι | 0,827 | 306,086 | 140,838 | 172,723 | 0,059 | 0,072 |
| Αρίσβη | 1,248 | 462,039 | 213,803 | 262,208 | 0,159 | 0,195 |
| Αντισσα | 0,363 | 134,322 | 63,614 | 78,016 | 0,018 | 0,022 |
| Δάφια | 0,810 | 300,028 | 137,346 | 168,441 | 0,129 | 0,159 |
| Σίγρι | 0,443 | 163,856 | 76,885 | 94,292 | 0,012 | 0,014 |
| Ταβάρι | 0,303 | 112,179 | 52,787 | 64,738 | 0,016 | 0,020 |
| Τριγώνας | 0,666 | 246,759 | 117,228 | 143,768 | 1,939 | 2,378 |
| Τσίγκος | 0,063 | 23,179 | 10,883 | 13,347 | 1,145 | 1,404 |
| Σκάλα Πολυχνίτου | 0,444 | 164,250 | 71,996 | 88,295 | 0,076 | 0,094 |
| Αγιάσος | 0,493 | 182,590 | 84,741 | 103,927 | 0,546 | 0,670 |
| Άργεννος | 1,310 | 485,072 | 223,204 | 273,737 | 0,213 | 0,261 |
| Παπάδος | 0,199 | 73,757 | 34,742 | 42,608 | 0,115 | 0,141 |
| Min | 0,063 | 23,179 | 10,883 | 13,347 | 0,012 | 0,014 |
| Max | 1,310 | 485,072 | 223,204 | 273,737 | 5,727 | 7,024 |
| Average | 0,510 | 188,917 | 87,141 | 106,869 | 0,752 | 0,922 |

Πίνακας 14: Τιμές του PI για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια για την Λέσβο

| PI | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|------------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Αμαλή | 0,444 | 0,300 | 0,208 | 0,235 | 0,226 | 0,172 | 0,925 |
| Βαρειά | 2,063 | 0,716 | 1,318 | 1,162 | 1,204 | 0,063 | 0,064 |
| Μυτιλήνη | 5,730 | 2,372 | 2,476 | 2,416 | 2,434 | 0,148 | 0,333 |
| Καμμένο Δάσος | 0,948 | 0,395 | 0,416 | 0,315 | 0,340 | 0,168 | 0,748 |
| Μέσα | 5,833 | 2,632 | 2,726 | 2,576 | 2,620 | 1,654 | 3,714 |
| Πετσοφας | 10,009 | 5,060 | 6,144 | 5,790 | 5,892 | 2,376 | 0,118 |
| Σκαλοχώρι | 10,487 | 4,666 | 5,697 | 5,644 | 5,660 | 2,949 | 0,038 |
| Αρίσβη | 18,237 | 8,857 | 7,605 | 7,247 | 7,339 | 4,515 | 0,103 |
| Άντισσα | 3,531 | 1,586 | 2,436 | 2,084 | 2,172 | 2,263 | 0,012 |
| Δάφια | 10,577 | 6,478 | 5,922 | 5,595 | 5,707 | 2,536 | 0,084 |
| Σίγρι | 4,657 | 2,463 | 2,907 | 2,755 | 2,796 | 2,391 | 0,008 |
| Ταβάρι | 3,186 | 1,834 | 1,842 | 1,869 | 1,861 | 1,701 | 0,011 |
| Τριγώνας | 1,728 | 0,849 | 1,338 | 1,280 | 1,296 | 1,351 | 1,258 |
| Τσίγκος | 0,252 | 0,185 | 0,130 | 0,092 | 0,102 | 0,090 | 0,743 |
| Σκάλα Πολυχνίτου | 5,313 | 2,600 | 4,703 | 4,301 | 4,431 | 0,120 | 0,050 |
| Αγιάσος | 1,139 | 0,591 | 1,274 | 1,247 | 1,255 | 0,764 | 0,354 |
| Άργεννος | 16,632 | 6,879 | 9,441 | 8,785 | 8,961 | 4,676 | 0,138 |
| Παπάδος | 0,636 | 0,356 | 0,395 | 0,367 | 0,376 | 0,339 | 0,075 |
| Min | 0,252 | 0,185 | 0,130 | 0,092 | 0,102 | 0,063 | 0,008 |
| Max | 18,237 | 8,857 | 9,441 | 8,785 | 8,961 | 4,676 | 3,714 |
| Average | 5,633 | 2,712 | 3,165 | 2,987 | 3,037 | 1,571 | 0,488 |

Χίος

Πίνακας 15: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Χίο

| Igeo | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ναγός | 0,070 | -0,261 | 0,468 | 0,414 | 0,430 | 0,676 | -0,839 |
| Πελλιναίο | 0,008 | -0,352 | -0,298 | -0,296 | -0,296 | -0,110 | -2,555 |
| Παρπαριά | 0,028 | -0,335 | -0,243 | -0,226 | -0,231 | -0,162 | -1,169 |
| Αυγώνυμα | 0,314 | -0,126 | 0,487 | 0,432 | 0,448 | 0,545 | -0,274 |
| Βέσσα | 0,019 | -0,065 | 0,447 | 0,409 | 0,421 | 0,461 | -1,185 |
| Μεστά | 0,279 | -0,156 | 0,621 | 0,563 | 0,579 | 0,726 | -1,956 |
| Κάτω Φανά | 0,455 | -0,142 | 0,679 | 0,602 | 0,622 | 0,624 | -2,087 |
| Γρίδια | -0,128 | -0,469 | -0,038 | -0,064 | -0,056 | 0,144 | -1,171 |
| Min | -0,128 | -0,469 | -0,298 | -0,296 | -0,296 | -0,162 | -2,555 |
| Max | 0,455 | -0,065 | 0,679 | 0,602 | 0,622 | 0,726 | -0,274 |
| Average | 0,131 | -0,238 | 0,265 | 0,229 | 0,240 | 0,363 | -1,404 |

Πίνακας 16: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Χίο

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|----------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Ναγός | 0,437 | 0,204 | 1,091 | 0,965 | 1,001 | 1,761 | 0,054 |
| Πελλιναίο | 4,697 | 2,052 | 2,326 | 2,337 | 2,334 | 3,580 | 0,013 |
| Παρπαριά | 4,919 | 2,134 | 2,637 | 2,743 | 2,709 | 3,175 | 0,313 |
| Αυγώνυμα | 0,766 | 0,278 | 1,140 | 1,004 | 1,043 | 1,305 | 0,198 |
| Βέσσα | 0,388 | 0,320 | 1,041 | 0,953 | 0,979 | 1,074 | 0,024 |
| Μεστά | 0,706 | 0,260 | 1,553 | 1,359 | 1,411 | 1,975 | 0,004 |
| Κάτω Φανά | 1,058 | 0,268 | 1,776 | 1,486 | 1,556 | 1,565 | 0,003 |
| Γρίδια | 0,277 | 0,126 | 0,341 | 0,321 | 0,327 | 0,517 | 0,025 |
| Min | 0,277 | 0,126 | 0,341 | 0,321 | 0,327 | 0,517 | 0,003 |
| Max | 4,919 | 2,134 | 2,637 | 2,743 | 2,709 | 3,580 | 0,313 |
| Average | 1,656 | 0,705 | 1,488 | 1,396 | 1,420 | 1,869 | 0,079 |

Πίνακας 17: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Χίο με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| Igeo | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ναγός | -0,339 | -0,311 | -0,260 | -0,315 | -0,298 | -0,384 |
| Πελλιναίο | -0,176 | -0,176 | -0,176 | -0,176 | -0,176 | -0,176 |
| Παρπαριά | -0,156 | -0,159 | -0,122 | -0,107 | -0,111 | -0,228 |
| Αυγώνυμα | -0,095 | -0,176 | -0,240 | -0,297 | -0,280 | -0,514 |
| Βέσσα | -0,390 | -0,115 | -0,280 | -0,320 | -0,308 | -0,598 |
| Μεστά | -0,131 | -0,206 | -0,106 | -0,166 | -0,149 | -0,334 |
| Κάτω Φανά | 0,045 | -0,192 | -0,048 | -0,127 | -0,107 | -0,435 |
| Γρίδια | -0,537 | -0,519 | -0,765 | -0,793 | -0,785 | -0,916 |
| Min | -0,537 | -0,519 | -0,765 | -0,793 | -0,785 | -0,916 |
| Max | 0,045 | -0,115 | -0,048 | -0,107 | -0,107 | -0,176 |
| Average | -0,222 | -0,232 | -0,250 | -0,288 | -0,277 | -0,448 |

Πίνακας 18: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Χίο με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 |
|-----------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Ναγός | 0,170 | 0,182 | 0,204 | 0,180 | 0,187 | 0,154 |
| Πελλιναίο | 3,077 | 3,077 | 3,077 | 3,077 | 3,077 | 3,077 |
| Παρπαριά | 3,223 | 3,201 | 3,488 | 3,611 | 3,572 | 2,729 |
| Αυγώνυμα | 0,298 | 0,248 | 0,214 | 0,187 | 0,195 | 0,114 |
| Βέσσα | 0,151 | 0,285 | 0,195 | 0,178 | 0,183 | 0,094 |
| Μεστά | 0,275 | 0,231 | 0,291 | 0,253 | 0,264 | 0,172 |
| Κάτω Φανά | 0,412 | 0,239 | 0,333 | 0,277 | 0,291 | 0,137 |
| Γρίδια | 0,108 | 0,113 | 0,064 | 0,060 | 0,061 | 0,045 |
| Min | 0,108 | 0,113 | 0,064 | 0,060 | 0,061 | 0,045 |
| Max | 3,223 | 3,201 | 3,488 | 3,611 | 3,572 | 3,077 |
| Average | 0,964 | 0,947 | 0,983 | 0,978 | 0,979 | 0,815 |

Πίνακας 19: Τιμές των Hex , R_{aeq} , D , De , $D(cs)$, $De(cs)$ για την Χίο

| | Hex | R_{aeq} (Bq/kg) | D (nGy/h) | De (μ Sv/y) | D_{Cs} (nGy/h) | $D_{Cs(e)}$ (μ Sv/y) |
|----------------|-------|-------------------|-------------|--------------------|------------------|---------------------------|
| Ναγός | 0,347 | 128,601 | 61,467 | 75,383 | 0,338 | 0,414 |
| Πελλιναίο | 0,511 | 189,150 | 91,152 | 111,789 | 0,007 | 0,008 |
| Παρπαριά | 0,519 | 192,282 | 91,600 | 112,338 | 0,158 | 0,194 |
| Αυγώνυμα | 0,408 | 150,913 | 70,766 | 86,788 | 1,240 | 1,520 |
| Βέσσα | 0,284 | 105,120 | 49,237 | 60,384 | 0,152 | 0,187 |
| Μεστά | 0,478 | 177,022 | 83,632 | 102,567 | 0,026 | 0,032 |
| Κάτω Φανά | 0,559 | 206,887 | 96,354 | 118,168 | 0,019 | 0,023 |
| Γρίδια | 0,145 | 53,716 | 25,368 | 31,111 | 0,157 | 0,193 |
| Min | 0,145 | 53,716 | 25,368 | 31,111 | 0,007 | 0,008 |
| Max | 0,559 | 206,887 | 96,354 | 118,168 | 1,240 | 1,520 |
| Average | 0,406 | 150,461 | 71,197 | 87,316 | 0,262 | 0,321 |

Πίνακας 20: Τιμές του PI για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Χίο

| PI | $Ra-226$ | $U-238$ | $Ra-228$ | $Th-228$ | $Th-232$ | $K-40$ | $Cs-137$ |
|----------------|----------|---------|----------|----------|----------|--------|----------|
| Ναγός | 1,764 | 0,823 | 4,402 | 3,895 | 4,039 | 7,107 | 0,219 |
| Πελλιναίο | 1,526 | 0,667 | 0,756 | 0,759 | 0,758 | 1,163 | 0,004 |
| Παρπαριά | 1,598 | 0,694 | 0,857 | 0,891 | 0,880 | 1,032 | 0,102 |
| Αυγώνυμα | 3,093 | 1,122 | 4,601 | 4,054 | 4,211 | 5,266 | 0,804 |
| Βέσσα | 1,567 | 1,290 | 4,203 | 3,849 | 3,951 | 4,336 | 0,099 |
| Μεστά | 2,851 | 1,048 | 6,268 | 5,485 | 5,694 | 7,973 | 0,017 |
| Κάτω Φανά | 4,272 | 1,080 | 7,167 | 5,997 | 6,281 | 6,316 | 0,012 |
| Γρίδια | 1,118 | 0,510 | 1,375 | 1,295 | 1,319 | 2,088 | 0,102 |
| Min | 1,118 | 0,510 | 0,756 | 0,759 | 0,758 | 1,032 | 0,004 |
| Max | 4,272 | 1,290 | 7,167 | 5,997 | 6,281 | 7,973 | 0,804 |
| Average | 2,224 | 0,904 | 3,704 | 3,278 | 3,392 | 4,410 | 0,170 |

Θεσσαλία

Πίνακας 21: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Θεσσαλία

| Igeo | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Νεράιδα | -0,157 | -0,418 | -0,514 | -0,628 | -0,569 | -0,481 | -0,723 |
| Αγιόκαμπος | -0,472 | -0,753 | -0,767 | -0,818 | -0,785 | -0,601 | -1,039 |
| Τρίκαλλα | -0,017 | -0,477 | 0,327 | 0,297 | 0,313 | 0,521 | -0,579 |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | -0,085 | -0,338 | -0,420 | -0,478 | -0,450 | -0,431 | -2,112 |
| Όσσα | -0,025 | -0,226 | -0,222 | -0,302 | -0,271 | -0,245 | -1,987 |
| Καλλιφώνι | -0,012 | -0,331 | 0,213 | 0,102 | 0,155 | 0,537 | -0,384 |
| Ανάβρα | -0,686 | -0,891 | -0,983 | -1,006 | -1,025 | -1,141 | -0,126 |
| Θαυμακός | -0,132 | -0,356 | -0,407 | -0,527 | -0,473 | -0,460 | -0,640 |
| Μεσορράχη | -0,231 | -0,562 | -0,631 | -0,718 | -0,682 | -0,504 | -0,376 |
| Βόλος | -0,294 | -0,569 | -0,081 | -0,158 | -0,129 | -0,062 | -1,686 |
| Περτούλι | -0,375 | -0,823 | -0,995 | -1,071 | -1,044 | -1,064 | -0,966 |
| Δομοκός | -0,164 | -0,414 | -0,410 | -0,473 | -0,441 | -0,404 | -0,034 |
| Πηγή | 0,057 | -0,113 | 0,456 | 0,381 | 0,426 | 0,645 | 0,262 |
| Λίμνη Πλαστήρα | -0,357 | -0,459 | -0,436 | -0,487 | -0,456 | -0,277 | -1,744 |
| Τέμπη | 0,078 | -0,020 | 0,595 | 0,585 | 0,597 | 0,683 | -1,568 |
| Τσαγκαράδα | -0,436 | -0,533 | -0,770 | -0,818 | -0,788 | -0,602 | -2,191 |
| Σοφάδες | 0,100 | -0,202 | 0,362 | 0,321 | 0,347 | 0,543 | -0,895 |
| Κιλελλέρ | -0,176 | -0,423 | -0,437 | -0,469 | -0,449 | -0,402 | -0,255 |
| Αγιά | -0,447 | -0,603 | -0,631 | -0,727 | -0,702 | -0,669 | -0,333 |
| Min | -0,686 | -0,891 | -0,995 | -1,071 | -1,044 | -1,141 | -2,191 |
| Max | 0,100 | -0,020 | 0,595 | 0,585 | 0,597 | 0,683 | 0,262 |
| Average | -0,202 | -0,448 | -0,303 | -0,368 | -0,338 | -0,232 | -0,915 |

Πίνακας 22: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Θεσσαλία

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Νεράιδα | 1,566 | 0,859 | 0,689 | 0,529 | 0,606 | 0,743 | 0,425 |
| Αγιόκαμπος | 0,759 | 0,397 | 0,385 | 0,342 | 0,369 | 0,564 | 0,205 |
| Τρίκαλλα | 0,174 | 0,060 | 0,385 | 0,358 | 0,372 | 0,601 | 0,048 |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | 1,850 | 1,033 | 0,855 | 0,748 | 0,797 | 0,833 | 0,017 |
| Όσσα | 2,124 | 1,335 | 1,348 | 1,123 | 1,206 | 1,278 | 0,023 |
| Καλλιφώνι | 0,176 | 0,084 | 0,295 | 0,229 | 0,259 | 0,623 | 0,075 |
| Ανάβρα | 0,464 | 0,289 | 0,234 | 0,222 | 0,212 | 0,163 | 1,681 |
| Θαυμακός | 1,661 | 0,991 | 0,880 | 0,668 | 0,757 | 0,779 | 0,515 |
| Μεσορράχη | 1,321 | 0,617 | 0,526 | 0,431 | 0,468 | 0,704 | 0,946 |
| Βόλος | 0,092 | 0,049 | 0,150 | 0,126 | 0,135 | 0,157 | 0,004 |
| Περτούλι | 0,949 | 0,338 | 0,228 | 0,191 | 0,203 | 0,194 | 0,243 |
| Δομοκός | 1,540 | 0,866 | 0,874 | 0,757 | 0,815 | 0,888 | 2,078 |
| Πηγή | 0,207 | 0,139 | 0,518 | 0,435 | 0,483 | 0,798 | 0,331 |
| Λίμνη Πλαστήρα | 0,989 | 0,781 | 0,825 | 0,732 | 0,788 | 1,188 | 0,041 |
| Τέμπη | 0,216 | 0,173 | 0,712 | 0,696 | 0,715 | 0,873 | 0,005 |
| Τσαγκαράδα | 0,825 | 0,659 | 0,382 | 0,342 | 0,366 | 0,562 | 0,014 |
| Σοφάδες | 0,228 | 0,114 | 0,416 | 0,379 | 0,402 | 0,632 | 0,023 |
| Κιλελλέρ | 1,500 | 0,850 | 0,821 | 0,763 | 0,800 | 0,892 | 1,250 |
| Αγιά | 0,803 | 0,561 | 0,526 | 0,422 | 0,446 | 0,482 | 1,045 |
| Min | 0,092 | 0,049 | 0,150 | 0,126 | 0,135 | 0,157 | 0,004 |
| Max | 2,124 | 1,335 | 1,348 | 1,123 | 1,206 | 1,278 | 2,078 |
| Average | 0,918 | 0,537 | 0,581 | 0,500 | 0,537 | 0,682 | 0,472 |

Πίνακας 23: Τιμές του Igeo για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Θεσσαλία με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| Igeo | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Νεράιδα | -0,249 | -0,256 | -0,270 | -0,326 | -0,295 | -0,225 |
| Αγιοκάμπος | -0,623 | -0,703 | -0,721 | -0,693 | -0,690 | -0,531 |
| Τρίκαλλα | -0,335 | -0,541 | -0,278 | -0,250 | -0,261 | -0,217 |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | -0,176 | -0,176 | -0,176 | -0,353 | -0,356 | -0,176 |
| Όσσα | -0,176 | -0,176 | -0,176 | -0,176 | -0,176 | -0,176 |
| Καλλιφώνι | -0,330 | -0,396 | -0,392 | -0,444 | -0,419 | -0,201 |
| Ανάβρα | -0,777 | -0,730 | -0,739 | -0,704 | -0,751 | -0,885 |
| Θαυμακός | -0,223 | -0,194 | -0,164 | -0,225 | -0,198 | -0,205 |
| Μεσορράχη | -0,382 | -0,512 | -0,585 | -0,592 | -0,588 | -0,435 |
| Βόλος | -0,672 | -0,744 | -0,883 | -0,881 | -0,883 | -0,986 |
| Περτούλι | -0,466 | -0,662 | -0,751 | -0,769 | -0,770 | -0,809 |
| Δομοκός | -0,256 | -0,253 | -0,167 | -0,171 | -0,166 | -0,148 |
| Πηγή | -0,260 | -0,177 | -0,149 | -0,165 | -0,148 | -0,094 |
| Λίμνη Πλαστήρα | -0,448 | -0,298 | -0,192 | -0,185 | -0,181 | -0,022 |
| Τέμπη | -0,300 | -0,196 | -0,208 | -0,139 | -0,158 | -0,241 |
| Τσαγκαράδα | -0,587 | -0,482 | -0,724 | -0,693 | -0,694 | -0,533 |
| Σοφάδες | -0,217 | -0,266 | -0,244 | -0,225 | -0,228 | -0,195 |
| Κιλελλέρ | -0,327 | -0,372 | -0,391 | -0,344 | -0,354 | -0,332 |
| Αγιά | -0,599 | -0,553 | -0,585 | -0,602 | -0,608 | -0,600 |
| Min | -0,777 | -0,744 | -0,883 | -0,881 | -0,883 | -0,986 |
| Max | -0,176 | -0,176 | -0,149 | -0,139 | -0,148 | -0,022 |
| Average | -0,390 | -0,405 | -0,410 | -0,418 | -0,417 | -0,369 |

Πίνακας 24: Τιμές του EF για τα υπό μελέτη ραδιονουκλείδια για την Θεσσαλία με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 |
|------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Νεράιδα | 1,268 | 1,247 | 1,208 | 1,061 | 1,140 | 1,338 |
| Αγίοκαμπος | 0,536 | 0,446 | 0,428 | 0,456 | 0,459 | 0,662 |
| Τρίκαλλα | 0,084 | 0,052 | 0,096 | 0,102 | 0,099 | 0,110 |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | 1,499 | 1,499 | 1,499 | 1,499 | 1,499 | 1,499 |
| Όσσα | 1,721 | 1,499 | 1,499 | 1,499 | 1,499 | 1,499 |
| Καλλιφώνι | 0,085 | 0,073 | 0,073 | 0,065 | 0,069 | 0,114 |
| Ανάβρα | 0,375 | 0,419 | 0,410 | 0,444 | 0,399 | 0,293 |
| Θαυμακός | 1,345 | 1,437 | 1,542 | 1,339 | 1,424 | 1,402 |
| Μεσορράχη | 1,070 | 0,692 | 0,585 | 0,575 | 0,581 | 0,826 |
| Βόλος | 0,044 | 0,033 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,019 |
| Περτούλι | 0,769 | 0,490 | 0,399 | 0,382 | 0,382 | 0,349 |
| Δομοκός | 1,248 | 1,256 | 1,531 | 1,517 | 1,534 | 1,598 |
| Πηγή | 0,099 | 0,120 | 0,128 | 0,124 | 0,129 | 0,146 |
| Λίμνη Πλαστήρα | 0,801 | 1,133 | 1,445 | 1,468 | 1,482 | 2,138 |
| Τέμπη | 0,104 | 0,115 | 0,112 | 0,132 | 0,126 | 0,104 |
| Τσαγκαράδα | 0,668 | 0,740 | 0,424 | 0,456 | 0,455 | 0,660 |
| Σοφάδες | 0,110 | 0,098 | 0,103 | 0,108 | 0,107 | 0,116 |
| Κιλελλέρ | 1,215 | 0,954 | 0,914 | 1,018 | 0,994 | 1,046 |
| Αγιά | 0,650 | 0,630 | 0,585 | 0,563 | 0,554 | 0,565 |
| Min | 0,044 | 0,033 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,019 |
| Max | 1,721 | 1,499 | 1,542 | 1,517 | 1,534 | 2,138 |
| Average | 0,721 | 0,681 | 0,685 | 0,675 | 0,682 | 0,762 |

Πίνακας 25: Τιμές των Hex , R_{aeq} , D , De , $D(cs)$, $De(cs)$ για την Θεσσαλία

| | Hex | R_{aeq} (Bq/kg) | D (nGy/h) | De (μ Sv/y) | D_{cs} (nGy/h) | $D_{Cs(e)}$ (μ Sv/y) |
|------------------------|-------|-------------------|-------------|--------------------|------------------|---------------------------|
| Νεράιδα | 0,277 | 102,449 | 48,711 | 59,740 | 0,441 | 0,541 |
| Αγιόκαμπος | 0,167 | 61,776 | 29,755 | 36,492 | 0,213 | 0,261 |
| Τρίκαλλα | 0,264 | 97,676 | 46,466 | 56,986 | 0,615 | 0,754 |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | 0,332 | 122,888 | 58,103 | 71,258 | 0,018 | 0,022 |
| Όσσα | 0,454 | 168,210 | 79,784 | 97,848 | 0,024 | 0,029 |
| Καλλιφώνι | 0,243 | 89,943 | 43,355 | 53,170 | 0,963 | 1,181 |
| Ανάβρα | 0,080 | 29,435 | 13,755 | 16,869 | 1,743 | 2,138 |
| Θαυμακός | 0,307 | 113,565 | 53,689 | 65,845 | 0,534 | 0,655 |
| Μεσορράχη | 0,237 | 87,658 | 42,001 | 51,511 | 0,981 | 1,203 |
| Βόλος | 0,103 | 37,966 | 17,768 | 21,791 | 0,048 | 0,059 |
| Περτούλι | 0,118 | 43,631 | 20,435 | 25,062 | 0,252 | 0,309 |
| Δομοκός | 0,318 | 117,571 | 55,798 | 68,430 | 2,154 | 2,642 |
| Πηγή | 0,334 | 123,772 | 59,000 | 72,358 | 4,266 | 5,232 |
| Λίμνη Πλαστήρα | 0,307 | 113,850 | 55,138 | 67,621 | 0,042 | 0,052 |
| Τέμπη | 0,402 | 148,772 | 70,113 | 85,987 | 0,063 | 0,077 |
| Τσαγκαράδα | 0,171 | 63,364 | 30,489 | 37,392 | 0,015 | 0,018 |
| Σοφάδες | 0,304 | 112,647 | 53,417 | 65,511 | 0,297 | 0,364 |
| Κιλελλέρ | 0,313 | 115,933 | 55,084 | 67,554 | 1,296 | 1,589 |
| Αγιά | 0,170 | 63,086 | 29,943 | 36,722 | 1,083 | 1,328 |
| Min | 0,080 | 29,435 | 13,755 | 16,869 | 0,015 | 0,018 |
| Max | 0,454 | 168,210 | 79,784 | 97,848 | 4,266 | 5,232 |
| Average | 0,258 | 95,484 | 45,411 | 55,692 | 0,792 | 0,971 |

Πίνακας 26: Τιμές του PI για τα υπό μελέτη ραδιονουκλεΐδια για την Θεσσαλία

| PI | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Νεράιδα | 1,045 | 0,573 | 0,460 | 0,353 | 0,404 | 0,496 | 0,286 |
| Αγιόκαμπος | 0,506 | 0,265 | 0,257 | 0,228 | 0,246 | 0,376 | 0,138 |
| Τρίκαλλα | 1,441 | 0,501 | 3,187 | 2,970 | 3,086 | 4,984 | 0,399 |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | 1,234 | 0,689 | 0,571 | 0,499 | 0,532 | 0,555 | 0,012 |
| Όσσα | 1,417 | 0,891 | 0,899 | 0,749 | 0,805 | 0,852 | 0,016 |
| Καλλιφώνι | 1,458 | 0,699 | 2,449 | 1,898 | 2,144 | 5,165 | 0,625 |
| Ανάβρα | 0,309 | 0,193 | 0,156 | 0,148 | 0,142 | 0,109 | 1,130 |
| Θαυμακός | 1,108 | 0,661 | 0,587 | 0,445 | 0,505 | 0,520 | 0,346 |
| Μεσορράχη | 0,881 | 0,411 | 0,351 | 0,287 | 0,312 | 0,470 | 0,636 |
| Βόλος | 0,762 | 0,405 | 1,246 | 1,043 | 1,116 | 1,300 | 0,031 |
| Περτούλι | 0,633 | 0,225 | 0,152 | 0,127 | 0,135 | 0,129 | 0,163 |
| Δομοκός | 1,028 | 0,578 | 0,583 | 0,505 | 0,544 | 0,592 | 1,397 |
| Πηγή | 1,712 | 1,156 | 4,289 | 3,608 | 3,999 | 6,616 | 2,767 |
| Λίμνη Πλαστήρα | 0,660 | 0,521 | 0,550 | 0,489 | 0,525 | 0,792 | 0,027 |
| Τέμπη | 1,794 | 1,432 | 5,897 | 5,766 | 5,926 | 7,236 | 0,041 |
| Τσαγκαράδα | 0,550 | 0,440 | 0,255 | 0,228 | 0,244 | 0,375 | 0,010 |
| Σοφάδες | 1,888 | 0,942 | 3,448 | 3,144 | 3,332 | 5,239 | 0,193 |
| Κιλελλέρ | 1,001 | 0,567 | 0,548 | 0,509 | 0,534 | 0,595 | 0,840 |
| Αγιά | 0,536 | 0,374 | 0,351 | 0,281 | 0,298 | 0,322 | 0,702 |
| Min | 0,309 | 0,193 | 0,152 | 0,127 | 0,135 | 0,109 | 0,010 |
| Max | 1,888 | 1,432 | 5,897 | 5,766 | 5,926 | 7,236 | 2,767 |
| Average | 1,051 | 0,606 | 1,381 | 1,225 | 1,307 | 1,933 | 0,514 |

Πίνακες εδαφικών ειδών

Πίνακας 27: Χαρακτηρισμός του είδους των εδαφικών δειγμάτων στην Λέσβο και οι αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές των ραδιονουκλεϊδίων και του σιδήρου σύμφωνα με τον Turekian (1961)

| | Είδος εδάφους | Ra-226 | U-238 | Th-232 | K-40 | Cs-137 | Fe |
|-----------------------------|--------------------------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|-----------|
| Αμαλή | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Βαρειά | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Μυτιλήνη | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Καμμένο Δάσος | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Μέσα | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Πετσοφας | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Σκαλοχώρι | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Αρίσβη | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Αντισσα | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Δάφια | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Σίγρι | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Ταβάρι | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Τριγώνας | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Τσίγκος | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Σκάλα Πολυχνίτου | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Αγιάσος | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Άργεννος | Basaltic | 1 | 1 | 4 | 8300 | 1,1 | 86500 |
| Παπάδος | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |

Πίνακας 28: Χαρακτηρισμός του είδους των εδαφικών δειγμάτων στην Χίο και οι αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές των ραδιονουκλεϊδίων και του σιδήρου σύμφωνα με τον Turekian (1961)

| | Είδος εδάφους | Ra-226 | U-238 | Th-232 | K-40 | Cs-137 | Fe |
|----------------------|--------------------------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|-----------|
| Ναγός | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Πελλιναίο | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Παρπαριά | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Αυγώνυμα | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Βέσσα | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Μεστά | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Κάτω Φανά | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Γρίδια | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |

Πίνακας 29: Χαρακτηρισμός του είδους των εδαφικών δειγμάτων στην Χίο και οι αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές των ραδιονουκλεϊδίων και του σιδήρου σύμφωνα με τον Turekian (1961)

| | Είδος εδάφους | Ra-226 | U-238 | Th-232 | K-40 | Cs-137 | Fe |
|---------------------------------------|--------------------------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|-----------|
| Νεράιδα | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Αγιόκαμπος | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Τρίκαλλα | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Όσσα | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Καλλιφώνι | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Ανάβρα | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Θαυμακός | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Μεσορράχη | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Βόλος | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Περτούλι | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Δομοκός | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Πηγή | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Λίμνη Πλαστήρα | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Τέμπη | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Τσαγκαράδα | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Σοφάδες | Sedimentary Carbon | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2700 | 0,5 | 3800 |
| Κιλελλέρ | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |
| Αγιά | Shales | 3,7 | 3,7 | 12 | 26600 | 5 | 47200 |

Πίνακας 30: Χαρακτηρισμός εδαφών σύμφωνα με την τιμή του I_{geo}

| I_{geo} | Description of soil (contaminated) |
|-----------|------------------------------------|
| <0 | Uncontaminated |
| 0-1 | Uncontaminated to moderately |
| 1-2 | Moderately |
| 2-3 | Moderately to strong |
| 3-4 | Strongly |
| 4-5 | Strongly to extremely |
| >5 | Extremely |

Πίνακας 31: Χαρακτηρισμός εδαφών σύμφωνα με την τιμή του EF

| EF | Description of soil (enrichment) |
|-------|----------------------------------|
| <2 | Minor |
| 2-5 | Moderate |
| 5-20 | Severe |
| 20-40 | Very severe |
| >40 | Extremely severe |

Πίνακας 32: Χαρακτηρισμός εδαφών σύμφωνα με την τιμή του PI

| PI | Pollution of soil |
|----------|-------------------|
| ≤ 1 | Low pollution |
| 1-3 | Middle pollution |
| ≥ 3 | High pollution |

Πίνακας 33: Χαρακτηρισμός εδαφών της Λέσβου, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo

| <i>Igeo</i> | <i>Ra-226</i> | <i>U-238</i> | <i>Ra-228</i> | <i>Th-228</i> | <i>Th-232</i> | <i>K-40</i> | <i>Cs-137</i> |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Αμαλή | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Βαρειά | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Μυτιλήνη | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Καμμένο Δάσος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Μέσα | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately |
| Πετσοφας | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Σκαλοχώρι | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Αρίσβη | Moderately contaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Άντισσα | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Δάφια | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Σίγρι | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Ταβάρι | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Τριγώνας | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Τσίγκος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Σκάλα Πολυχνίτου | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Αγιάσος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Άργεννος | Moderately contaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Παπάδος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |

Πίνακας 34: Χαρακτηρισμός εδαφών της Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo

| Igeo | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|
| Ναγός | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Πελλιναίο | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Παρπαριά | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Αυγώνυμα | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Βέσσα | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Μεστά | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Κάτω Φανά | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Γρίδια | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |

Πίνακας 35: Χαρακτηρισμός εδαφών της Θεσσαλίας, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo

| Igeo | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Νεράιδα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Αγιοκάμπος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Τρίκαλλα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Όσσα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Καλλιφώνι | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Ανάβρα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Θαυμακός | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Μεσορράχη | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Βόλος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Περτούλι | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Δομοκός | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Πηγή | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately |
| Λίμνη Πλαστήρα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Τέμπη | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Τσαγκαράδα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Σοφάδες | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Κιλελλέρ | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Αγιά | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |

Πίνακας 36: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Λέσβου, σύμφωνα με τον δείκτη EF

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Αμαλή | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Βαρειά | Severe Enrichment | Moderate Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Μυτιλήνη | Very severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Καμμένο Δάσος | Moderate Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Moderate Enrichment |
| Μέσα | Very severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Very severe Enrichment |
| Πετσοφας | Extreme Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Severe Enrichment | Minor Enrichment |
| Σκαλοχώρι | Extreme Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Severe Enrichment | Minor Enrichment |
| Αρίσβη | Extreme Enrichment | Extreme Enrichment | Extreme Enrichment | Extreme Enrichment | Extreme Enrichment | Very severe Enrichment | Minor Enrichment |
| Αντισσα | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Minor Enrichment |
| Δάφια | Extreme Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Severe Enrichment | Minor Enrichment |
| Σίγρι | Very severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Minor Enrichment |
| Ταβάρι | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Minor Enrichment |
| Τριγώνας | Severe Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment |
| Τσίγκος | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Moderate Enrichment |
| Σκάλα Πολυχνίτου | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Αγιάσος | Moderate Enrichment | Minor Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Minor Enrichment |
| Αργεννος | Extreme Enrichment | Very severe Enrichment | Extreme Enrichment | Extreme Enrichment | Extreme Enrichment | Very severe Enrichment | Minor Enrichment |
| Παπάδος | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |

Πίνακας 37: Χαρακτηρισμός εδαφών Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του EF

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| Ναγός | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Πελλιναίο | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Minor Enrichment |
| Παρπαριά | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Minor Enrichment |
| Αυγώνυμα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Βέσσα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Μεστά | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Κάτω Φανά | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Γρίδια | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |

Πίνακας 38: Χαρακτηρισμός εδαφών Θεσσαλίας, σύμφωνα με τις τιμές του EF

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| Νεράιδα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Αγιοκάμπος | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Τρίκαλλα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Όσσα | Moderate Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Καλλιφώνι | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Ανάβρα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Θαυμακός | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Μεσορράχη | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Βόλος | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Περτούλι | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Δομοκός | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Moderate Enrichment |
| Πηγή | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Λίμνη Πλαστήρα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Τέμπη | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Τσαγκαράδα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Σοφάδες | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Κιλελλέρ | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Αγιά | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |

Πίνακας 39: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Λέσβου, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| <i>Igeo</i> | <i>Ra-226</i> | <i>U-238</i> | <i>Ra-228</i> | <i>Th-228</i> | <i>Th-232</i> | <i>K-40</i> |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Αμαλή | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Βαρειά | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Μυτιλήνη | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Καμμένο Δάσος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Μέσα | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Πετσοφας | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Σκαλοχώρι | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Αρίσβη | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately |
| Αντισσα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Δάφια | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Σίγρι | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Ταβάρι | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Τριγώνας | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately |
| Τσίγκος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Σκάλα Πολυχνίου | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Αγιάσος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated |
| Άργεννος | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated-moderately |
| Παπάδος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |

Πίνακας 40: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| Igeo | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 |
|------------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ναγός | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Πελλιναίο | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Παρπαριά | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Αυγώνυμα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Βέσσα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Μεστά | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Κάτω Φανά | Uncontaminated-moderately | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Γρίδια | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |

Πίνακας 41: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Θεσσαλίας, σύμφωνα με τις τιμές του Igeo με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| <i>Igeo</i> | <i>Ra-226</i> | <i>U-238</i> | <i>Ra-228</i> | <i>Th-228</i> | <i>Th-232</i> | <i>K-40</i> |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Νεράιδα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Αγίοκαμπος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Τρίκαλλα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Όσσα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Καλλιφώνι | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Ανάβρα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Θαυμακός | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Μεσορράχη | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Βόλος | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Περτούλι | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Δομοκός | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Πηγή | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Λίμνη Πλαστήρα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Τέμπη | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Τσαγκαράδα | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Σοφάδες | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Κιλελλέρ | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |
| Αγιά | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated | Uncontaminated |

Πίνακας 42: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Λέσβου, σύμφωνα με τις τιμές του EF με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|
| Αμαλή | Minor Enrichment | Moderate Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Βαρειά | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Minor Enrichment |
| Μυτιλήνη | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Minor Enrichment |
| Καμμένο Δάσος | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Μέσα | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Moderate Enrichment |
| Πετσοφας | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment |
| Σκαλοχώρι | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment |
| Αρίσβη | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment |
| Αντισσα | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment |
| Δάφια | Severe Enrichment | Very severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment |
| Σίγρι | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment |
| Ταβάρι | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment |
| Τριγώνας | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment |
| Τσίγκος | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Σκάλα Πολυχνίτου | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Severe Enrichment | Minor Enrichment |
| Αγιάσος | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment |
| Αργεννος | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Very severe Enrichment | Severe Enrichment |
| Παπάδος | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |

Πίνακας 43: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του EF με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Ναγός | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Πελλιναίο | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment |
| Παρπαριά | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment | Moderate Enrichment |
| Αυγώνυμα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Βέσσα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Μεστά | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Κάτω Φανά | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Γρίδια | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |

Πίνακας 44: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του EF με την μέθοδο του απομακρυσμένου σημείου

| EF | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 |
|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| Νεράιδα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Αγιόκαμπος | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Τρίκαλλα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Όσσα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Καλλιφώνι | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Ανάβρα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Θαυμακός | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Μεσορράχη | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Βόλος | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Περτούλι | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Δομοκός | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Πηγή | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Λίμνη Πλαστήρα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Moderate Enrichment |
| Τέμπη | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Τσαγκαράδα | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Σοφάδες | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Κιλελλέρ | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |
| Αγιά | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment | Minor Enrichment |

Πίνακας 45: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Λέσβου, σύμφωνα με τις τιμές του *PI*

| <i>PI</i> | <i>Ra-226</i> | <i>U-238</i> | <i>Ra-228</i> | <i>Th-228</i> | <i>Th-232</i> | <i>K-40</i> | <i>Cs-137</i> |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Αμαλή | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Βαρειά | Middle Pollution | Low Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Μυτιλήνη | High Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Καμμένο Δάσος | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Μέσα | High Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | High Pollution |
| Πετσοφας | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Middle Pollution | Low Pollution |
| Σκαλοχώρι | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Middle Pollution | Low Pollution |
| Αρίσβη | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Αντισσα | High Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Low Pollution |
| Δάφια | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Middle Pollution | Low Pollution |
| Σίγρι | High Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Low Pollution |
| Ταβάρι | High Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Low Pollution |
| Τριγώνας | Middle Pollution | Low Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution |
| Τσίγκος | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Σκάλα Πολυχνίτου | High Pollution | Middle Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Αγιάσος | Middle Pollution | Low Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Άργεννος | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Παπάδος | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |

Πίνακας 46: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Χίου, σύμφωνα με τις τιμές του *PI*

| <i>PI</i> | <i>Ra-226</i> | <i>U-238</i> | <i>Ra-228</i> | <i>Th-228</i> | <i>Th-232</i> | <i>K-40</i> | <i>Cs-137</i> |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|
| Ναγός | Middle Pollution | Low Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Πελλιναίο | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Middle Pollution | Low Pollution |
| Παρπαριά | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Middle Pollution | Low Pollution |
| Αυγώνυμα | High Pollution | Middle Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Βέσσα | Middle Pollution | Middle Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Μεστά | High Pollution | Middle Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Κάτω Φανά | High Pollution | Middle Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Γρίδια | Middle Pollution | Low Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Low Pollution |

Πίνακας 47: Χαρακτηρισμός των εδαφών της Θεσσαλίας, σύμφωνα με τις τιμές του PI

| PI | Ra-226 | U-238 | Ra-228 | Th-228 | Th-232 | K-40 | Cs-137 |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Νεράιδα | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Αγιοκάμπος | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Τρίκαλλα | Middle Pollution | Low Pollution | High Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Φράγμα λίμνης Πλαστήρα | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Όσσα | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Καλλιφώνι | Middle Pollution | Low Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Ανάβρα | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Middle Pollution |
| Θαυμακός | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Μεσορράχη | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Βόλος | Low Pollution | Low Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Middle Pollution | Low Pollution |
| Περτούλι | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Δομοκός | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Middle Pollution |
| Πηγή | Middle Pollution | Middle Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Middle Pollution |
| Λίμνη Πλαστήρα | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Τέμπη | Middle Pollution | Middle Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Τσαγκαράδα | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Σοφάδες | Middle Pollution | Low Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | High Pollution | Low Pollution |
| Κιλελλέρ | Middle Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |
| Αγιά | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution | Low Pollution |

Πίνακας 48: Μέσες τιμές του δείκτη I_{geo} της παρούσας εργασίας και άλλων παγκόσμιων ερευνών

| Author | Location | Geo-accumulation Index (I_{geo}) | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------|------------|------------|---------------|---------------|------------|
| | | ^{226}Ra | ^{238}U | ^{228}Ra | ^{228}Th | ^{232}Th | ^{40}K | ^{137}Cs |
| Παρούσα μελέτη | Lesvos (Greece) | 0,289 | -0,014 | 0,063 | 0,030 | 0,040 | -0,300 | -1,039 |
| Παρούσα μελέτη | Lesvos (Greece) | -0,038 | 0,007 | -0,138 | -0,103 | -0,112 | -0,486 | |
| Παρούσα μελέτη | Chios (Greece) | 0,131 | -0,238 | 0,265 | 0,229 | 0,240 | 0,363 | -1,404 |
| Παρούσα μελέτη | Chios (Greece) | -0,222 | -0,232 | -0,250 | -0,288 | -0,277 | -0,448 | |
| Παρούσα μελέτη | Thessaly (Greece) | -0,202 | -0,448 | -0,303 | -0,368 | -0,338 | -0,232 | -0,915 |
| Παρούσα μελέτη | Thessaly (Greece) | -0,390 | -0,405 | -0,410 | -0,418 | -0,417 | -0,369 | |
| (Abdullah et al., 2016) | Perak, (Malaysia) | | -0,53-(-0,004) | | | -1,06-(-0,19) | -1,91-(-0,77) | |
| (Zainal et al., 2016) | Manjung, (Malaysia) | | -0,56-0,87 | | | -0,59-0,38 | -2,18-(-0,50) | |
| (Kumar et al., 2012) | Punjab State (India) | -0,326 | -0,087 | 0,725 | | -0,087 | -0,067 | -0,210 |
| (Elias et al., 2012) | Sabah, (Malaysia) | | -0,56-(1,56) | | | -1,02-(-0,38) | -1,68-(-0,68) | -0,78-0,18 |

Πίνακας 49: Μέσες τιμές του δείκτη EF της παρούσας εργασίας και άλλων παγκόσμιων ερευνών

| Author | Location | Enrichment Factor (EF) | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| | | ^{226}Ra | ^{238}U | ^{228}Ra | ^{228}Th | ^{232}Th | ^{40}K | ^{137}Cs |
| Παρούσα μελέτη | Lesvos (Greece) | 29,618 | 14,220 | 16,111 | 15,238 | 15,482 | 8,418 | 2,149 |
| Παρούσα μελέτη | Lesvos (Greece) | 9,464 | 10,182 | 7,636 | 8,420 | 8,217 | 4,214 | |
| Παρούσα μελέτη | Chios (Greece) | 1,656 | 0,705 | 1,488 | 1,396 | 1,420 | 1,869 | 0,079 |
| Παρούσα μελέτη | Chios (Greece) | 0,964 | 0,947 | 0,983 | 0,978 | 0,979 | 0,815 | |
| Παρούσα μελέτη | Thessaly (Greece) | 0,918 | 0,537 | 0,581 | 0,500 | 0,537 | 0,682 | 0,472 |
| Παρούσα μελέτη | Thessaly (Greece) | 0,721 | 0,681 | 0,685 | 0,675 | 0,682 | 0,762 | |
| (Monged et al., 2020) | Nile Valey (Egypt) | | 0,543 | | | 0,524 | | |
| (Abdullah et al., 2016) | Perak, (Malaysia) | | 3,25-4,47 | | | 2,93-4,80 | 2,53-2,83 | |
| (Zainal et al., 2016) | Manjung, (Malaysia) | | 1,39-14,34 | | | 1,37-9,30 | 0,27-3,22 | |
| (Kumar et al., 2012) | Punjab State (India) | 0,48 | 0,55 | 0,21 | | 0,51 | 0,48 | 0,37 |
| (Elias et al., 2012) | Sabah, (Malaysia) | | 0,97-3,76 | | | 0,93-1,09 | 0,62-0,85 | 1,23-1,45 |

Πίνακας 50: Μέσες τιμές του δείκτη PI της παρούσας εργασίας και άλλων παγκόσμιων ερευνών

| Author | Location | Pollution Index (PI) | | |
|-------------------------|-------------------|----------------------|------------------|-----------------|
| | | ^{232}Th | ^{238}U | ^{40}K |
| Παρούσα μελέτη | Lesvos (Greece) | 3,037 | 2,712 | 1,571 |
| Παρούσα μελέτη | Chios (Greece) | 3,392 | 0,904 | 4,410 |
| Παρούσα μελέτη | Thessaly (Greece) | 1,307 | 0,606 | 1,933 |
| (Abdullah et al., 2016) | Perak, Malaysia | 1,15-1,84 | 1,04-1,82 | 0,40-0,88 |
| (Zainal et al., 2016) | Manjung, Malaysia | 1,00-1,95 | 1,02-2,75 | 0,17-1,06 |