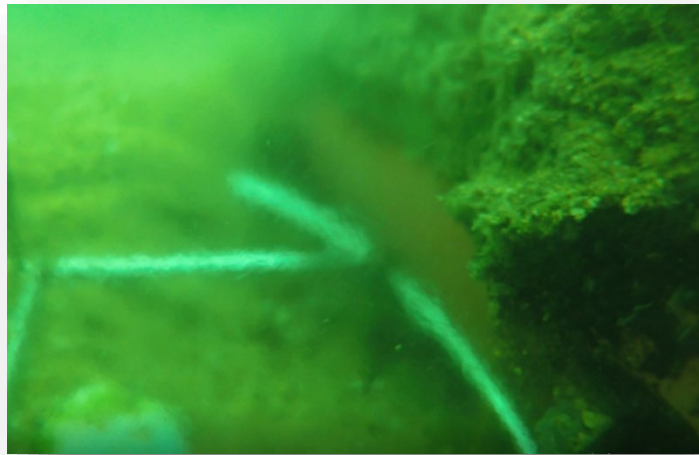




## ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΙΖΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΡΑΤΗΡΑ ΘΕΡΜΗΣ ΠΗΓΗΣ ΣΤΟΝ ΚΟΛΠΟ ΤΗΣ ΓΕΡΑΣ



**Mulita Zonja**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ακαδημαϊκός Επιβλέπων  
Κρασακοπούλου Ευαγγελία

Ερευνητικός Επιβλέπων  
Τσαμπάρης Χρήστος

Μυτιλήνη, Φεβρουάριος 2020

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Αποφοίτου του Π.Μ.Σ. «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Παράκτιων Περιοχών»**

**Zonja, Mulita**

**ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:**

**ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΙΖΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΡΑΤΗΡΑ ΘΕΡΜΗΣ ΠΗΓΗΣ ΣΤΟΝ  
ΚΟΛΠΟ ΤΗΣ ΓΕΡΑΣ**

**Τριμελής Επιτροπή Επίβλεψης και Κρίσης της Εργασίας**

**Υπογραφές**

**Κρασακοπούλου Ευαγγελία**

**Ακαδημαϊκός Επιβλέπων**

**Τσαμπάρης Χρήστος**

**Ερευνητικός Επιβλέπων**

**Χασιώτης Θωμάς**

**Αναπληρωτής Καθηγητής Τ.Ω.Θ.Β.Ε**



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας του Τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλασσίων Βιοεπιστημών (Τ.Ω.Θ.Β.Ε) της σχολής Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αιγαίου με το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε). Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολλά άτομα τα οποία συνέβαλλαν στη διεκπεραίωση της εργασίας αυτής.

Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την ακαδημαϊκή επιβλέπουσα κα Κρασακοπούλου Ευαγγελία, αναπληρώτρια καθηγήτρια του Τ.Ω.Θ.Β.Ε και τον ερευνητικό επιβλέπων κ. Τσαμπάρη Χρήστο, ερευνητή του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής, καθώς η ολοκλήρωσή της οφείλεται στην καθοδήγηση, τη βοήθεια και την υπομονή που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια.

Στη συνέχεια θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Δρ. Παππά Φιλοθέη και στον ερευνητή του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε κ. Πατήρη Διονύση, για τον σημαντικό χρόνο που διέθεσαν, τη διαρκή στήριξη και υπομονή τους. Όπως επίσης τους ευχαριστώ και για όλες τις επισημάνσεις και χρήσιμες συμβουλές τους συζητώντας και διορθώνοντας τα κακώς κείμενα όλο αυτό το διάστημα.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλη την ομάδα περιβαλλοντικής ραδιενέργειας κατά το διάστημα φιλοξενίας μου στο ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε με σκοπό την εκπόνηση της εργαστηριακής μου έρευνας. Επιπλέον την κα Σταυρακάκη Ιωάννα του Εργαστηρίου Ιζηματολογίας και τον κ. Παπαγεωργίου Άλκη του εργαστηρίου φασματοσκοπίας ακτίνων Χ για την βοήθειά τους στην παρασκευή και μέτρηση των δειγμάτων, αντιστοίχως. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κάλφα Κ. για την χορήγηση του προγράμματος ανάλυσης SPECTRW. Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας πολύτιμη βοήθεια, για την οποία τους ευχαριστώ ιδιαίτερα, μου προσέφεραν οι φίλοι μου και οι δύτες Χατζηπαυλής Αντώνης και Τσαλαπάτης Αλέξανδρος, οι οποίοι με την καθοδήγηση του ερευνητή του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε κ. Πατήρη Διονύση μαζί με τον οποίον καταδύθηκαν, συλλέξαν τα δείγματα στα οποία βασίζεται η παρούσα μελέτη. Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Τ.Ω.Θ.Β.Ε της σχολής Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αιγαίου για την παραχώρηση του Ερευνητικού/Εκπαιδευτικού σκάφους Αμφιτρίτης, όπως επίσης και τον κυβερνήτη του Ε/Σ Αμφιτρίτης ο οποίος μας μετέφερε στο σημείο δειγματοληψίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στους φίλους, ορισμένοι εκ των οποίων και συμφοιτητές ταυτόχρονα, Μανωλάκη Στεφανία-Μαριέβα, Δημητρίου Νίκο, Σαϊτάνη Σπύρο, Κυριακούδη Δέσπω, Μαράντου Μαρία και Γκιργκέτσο Αλέξανδρο για την αμέριστη στήριξη και βοήθειά τους προκειμένου να ολοκληρωθούν με επιτυχία αυτές οι σπουδές.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς και στις αδελφές μου που βρίσκονταν σε κάθε βήμα δίπλα μου, προσφέροντάς μου αστείρευτη ηθική υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια.



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν αρχικά η μελέτη των ραδιολογικών και μεταλλικών παραμέτρων της θερμής πηγής στην ηφαιστειογενή περιοχή του κόλπου της Γέρας, όπου έχει διαπιστωθεί από προηγούμενες μελέτες ότι τεκτονικές ασυνέχειες κάτω από τον πυθμένα αποτελούν οδούς επιλεκτικής διαφυγής ρευστών. Επιπλέον η έρευνα είχε ως στόχο τον υπολογισμό του ρυθμού ιζηματογένεσης/εναπόθεσης με τη χρήση του φυσικού ραδιονουκλιδίου  $^{210}\text{Pb}$  και του τεχνητού  $^{137}\text{Cs}$ , την εύρεση της ποσότητας του οργανικού άνθρακα στα υπό εξέταση ιζήματα του κόλπου της Γέρας, και τέλος τη σύγκριση των συγκεντρώσεων των μετάλλων (κύρια στοιχεία) και των ραδιενεργών του περιβάλλοντος της υδροθερμικής πηγής απ' όπου λήφθηκαν δείγματα με εκείνο του υποβάθρου.

Ένα από τα κίνητρα που οδήγησαν στη συγκεκριμένη μελέτη ήταν αρχικά το να εκτιμηθεί ο ραδιολογικός κίνδυνος της υδροθερμικής πηγής στον κόλπο της Γέρας, η οποία φάνηκε να έχει την περισσότερη κινητικότητα. Επίσης το να χαρακτηριστούν τα ιζήματα ανάλογα με τη ραδιενέργεια, τα μέταλλα και τον οργανικό άνθρακα που αυτά εμπεριείχαν, και να μελετηθούν οι μεταβολές των συγκεντρώσεων τόσο στο πέρασμα του χρόνου, όσο και στον χώρο (εντός- εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου), δηλαδή η χωροχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων, αποτέλεσαν δυο ακόμα κίνητρα τα οποία συνέβαλλαν στη μελέτη αυτή. Οι μετρήσεις των εκάστοτε παραμέτρων έλαβαν χώρα με εργαστηριακές μεθόδους φασματοσκοπίας ακτίνων-γ, υγρής οξειδωσης και XRF ανάλογα με τα ζητούμενα κάθε φορά.

Αυτό που έδειξαν τα αποτελέσματα ως γενική εικόνα είναι ότι ο ραδιολογικός κίνδυνος για τους ανθρώπους και τους οργανισμούς που κατοικούν στην περιοχή είναι αμελητέος. Παράλληλα παρατηρήθηκε μη σημαντική επιβάρυνση από ανθρωπογενείς δραστηριότητες στον κόλπο της Γέρας όσον αφορά τα μέταλλα (κύρια στοιχεία) και τον οργανικό άνθρακα καθώς μάλιστα ο δεύτερος παρουσιάζει μικρές μεταβολές στη συγκέντρωσή του με το πέρασμα των ετών. Τέλος ο ρυθμός ιζηματογένεσης υπολογίζεται στα  $\sim 0.47 \text{ cm/year}$ , τιμή η οποία οφείλεται στην υψηλή δραστηριότητα της περιοχής μελέτης λόγω των αναβλύσεων και της μικρής σχετικά απόστασης από την παράκτια περιοχή.

## Abstract

The aim of this study was initially to study the radiological and metallic parameters of the hydrothermal vent in the volcanic area of the Gulf of Gera, where previous studies found that tectonic discontinuities below the bottom are routes of selective fluid leak. In addition, the aim of the study was to calculate the sedimentation rate by using the natural radionuclide  $^{210}\text{Pb}$  and artificial  $^{137}\text{Cs}$ , to be found the amount of organic carbon in the under consideration sediments in the Gulf of Gera and finally the comparison of the concentrations of metals (main elements) and radioactive elements in the environment of the hydrothermal source, of which have been taken samples, to that of the background.

The first motivation of conducting this research was to estimate the radiological peril of the hydrothermal vent in the Gulf of Gera, which appeared to have the highest mobility. The second one was the characterization of sediments depending on the radioactivity, the metals and the organic carbon they contained and ultimately to be found the changes in the concentrations both over time and in space (inside-outside the crater and off the gulf), namely the spatiotemporal change of concentrations. The measurements of parameters conducted with laboratory methods of spectroscopy of rays -  $\gamma$ , wet oxidation and XRF depending on the requirements each time.

The results proved that the radiological risk to humans and organisms living in the area is negligible. It was also observed that there is no significant burden from anthropogenic activities in the Gulf of Gera as regards the metals (main elements) and the organic carbon, since the latter presents insignificant changes in its concentration over the years. Finally, the sedimentation rate is estimated at  $\sim 0.47$  cm / year mainly due to the high activity of the studied area because of the fluids emissions and the relatively short distance from the coast.





## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	iii
Abstract .....	iv
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	1
1.1 Στοιχεία πυρηνικής φυσικής .....	1
1.1.1. Ορισμένες ιδιότητες των πυρήνων .....	2
1.1.2. Ενέργεια σύνδεσης.....	6
1.1.3. Ραδιενέργεια .....	7
1.2 Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος.....	12
1.2.1 Φυσική ραδιενέργεια .....	12
1.2.2 Τεχνητή ραδιενέργεια .....	14
1.3 Μελέτη Καισίου (Cs).....	15
1.4 Μελέτη Μολύβδου (Pb) .....	17
Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία .....	22
2.1 Περιοχή Μελέτης.....	22
2.1.1. Γεωλογία.....	23
2.1.2. Μορφολογία – Ιζηματολογία .....	24
2.1.3 Υδρογραφικά χαρακτηριστικά και υδροδυναμικό καθεστώς.....	25
2.1.4 Χημική σύσταση και ρύπανση του κόλπου της Γέρας .....	27
2.2 Δειγματοληψία - Μεθοδολογία .....	27
2.3 Μακροσκοπική περιγραφή .....	31
2.4 Κοκκομετρική Ανάλυση Ιζημάτων: Μέθοδος Ξηρού Κοσκινίσματος.....	35
2.5 Προσδιορισμός οργανικού άνθρακα (TOC).....	36
2.6 Η μέθοδος φθορισμού ακτίνων-Χ (XRF).....	39
2.6.1 Μέθοδος LOI.....	44
2.7 Επεξεργασία δειγμάτων για μέτρηση ραδιενέργειας.....	45
2.8 Μετρητικό Σύστημα.....	48
2.9 Βαθμονόμηση του ανιχνευτή HPGe .....	50
2.9.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση .....	51
2.9.2 Βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας .....	51
2.9.3 Βαθμονόμηση της απόδοσης του ανιχνευτή HPGe .....	52
2.10 Βαθμονόμηση συστήματος XRF .....	53
2.11 Ρυθμός ιζηματογένεσης .....	54
2.11.1 Ραδιοχρονολόγηση με $^{210}\text{Pb}$ .....	54

2.11.2 Ραδιοχρονολόγηση με $^{137}\text{Cs}$ .....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αποτελέσματα.....	57
3.1 Ανάλυση φασμάτων ακτινοβολίας ακτίνων-γ.....	57
3.2 Υπολογισμός ρυθμού ιζηματογένεσης.....	60
3.2.1 Υπολογισμός του ρυθμού ιζηματογένεσης με τη μέθοδο του $^{210}\text{Pb}$ .....	60
3.2.2 Ποσοτική προσέγγιση του ρυθμού ιζηματογένεσης με βάση το $^{137}\text{Cs}$ .....	62
3.3 Αποτελέσματα του πυρήνα ιζήματος.....	63
3.3.1 Αποτελέσματα κοκκομετρίας στον πυρήνα ιζήματος.....	63
3.3.2 Αποτελέσματα προσδιορισμού του οργανικού άνθρακα στον πυρήνα ιζήματος .....	64
3.3.3 Συγκεντρώσεις κύριων στοιχείων στον πυρήνα ιζήματος .....	65
3.3.4 Συγκεντρώσεις ραδιενέργειας στον πυρήνα ιζήματος .....	69
3.4 Αποτελέσματα των επιφανειακών ιζημάτων .....	71
3.4.1 Αποτελέσματα κοκκομετρίας επιφανειακών ιζημάτων.....	71
3.4.2 Αποτελέσματα προσδιορισμού οργανικού άνθρακα στα επιφανειακά δείγματα.....	72
3.4.3 Συγκεντρώσεις κύριων στοιχείων στα επιφανειακά ιζήματα .....	74
3.4.4 Συγκεντρώσεις ραδιενέργειας στα επιφανειακά ιζήματα .....	77
3.5 Σύγκριση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας με άλλες μελέτες.....	81
3.6 Σύγκριση των συγκεντρώσεων ορισμένων κύριων στοιχείων με άλλες μελέτες .....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συζήτηση και Συμπεράσματα .....	85
4.1 Συμπεράσματα .....	85
4.2 Μελλοντικές ενέργειες.....	87
5. Βιβλιογραφία.....	89
<b>Παράρτημα</b> .....	<b>96</b>



## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1 Στοιχεία πυρηνικής φυσικής

Η πυρηνική φυσική αποτελεί έναν κλάδο της φυσικής ο οποίος ασχολείται με μη αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι σωματίδια, εφόσον είναι εκατομμύρια φορές μικρότερα από αυτό. Ο κλάδος αυτός έχει ως αντικείμενο μελέτης φαινόμενα τα οποία σχετίζονται με τον πυρήνα του ατόμου, τα στοιχειώδη σωματίδια από τα οποία αυτός αποτελείται όπως και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών. Ο τομέας της Πυρηνικής Φυσικής παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον τόσο για τις εφαρμογές της όσο και για την επίδραση στο περιβάλλον. Μία αξιόλογη εφαρμογή της Πυρηνικής Φυσικής, είναι η χρήση ραδιονουκλιδίων (φυσικών ή τεχνητών) για τη μελέτη του περιβάλλοντος (π.χ. ωκεανογραφικά και γεωλογικά φαινόμενα). Επιπλέον στον κλάδο αυτό, η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της έρευνας είναι αναγκαίο να στηριχθεί στην ακριβή γνώση όλων των διαστάσεων του θέματος, προκειμένου να υπάρξει βελτίωση της ποιότητας ζωής μας, εφόσον είναι γνωστές σε όλους μας τόσο οι ευεργετικές αλλά και καταστροφικές επιπτώσεις των εφαρμογών της Πυρηνικής Φυσικής. Στις μέρες μας σε κάθε κλάδο της επιστήμης αλλά και γενικότερα σε πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες συναντώνται εφαρμογές της πυρηνικής φυσικής, τέτοια παραδείγματα είναι η γεωργία, η παραγωγή ενέργειας, η ιατρική διάγνωση, κατασκευή όπλων μαζικής καταστροφής κ.α..

Ο Becquerel το 1896, σημείο αναφοράς στον τομέα της πυρηνικής φυσικής, ανακάλυψε πρώτος την ραδιενέργεια σε ενώσεις ουρανίου, και μελετήθηκε περαιτέρω από τους Marie Curie και Pierre Curie, ακολουθώντας πλήθος δραστηριοτήτων για τον χαρακτηρισμό και την κατανόηση της φύσης της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ραδιενεργούς πυρήνες. Ο Rutherford ήταν εκείνος ο οποίος ανακάλυψε την έννοια της ημιζωής στη ραδιενέργεια, κατάφερε να αποδείξει ότι η ραδιενέργεια ενέχει την πυρηνική μεταστοιχείωση ενός χημικού στοιχείου σε άλλο, και επίσης απέδειξε ότι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ήταν τριών τύπων, τους οποίους και ονομάτισε ακτίνες άλφα (-α), βήτα (-β) και γάμμα (-γ).

Πλήθος ερευνών, πειραμάτων και γεγονότων ακολούθησαν και συνέβαλαν στην ανάπτυξη της πυρηνικής φυσικής από πολλούς ερευνητές όπως ήταν: ο Thomson το 1897 με την ανακάλυψη του ηλεκτρονίου και το 1904 πρότεινε το πρώτο μοντέλο του ατόμου (μοντέλο του σταφιδόψωμου), οι Cockroft και Walton το 1930 (παρατήρηση των πυρηνικών αντιδράσεων μέσω τεχνητά επιταχυνόμενων σωματιδίων, ο Chadwick το 1932 (ανακάλυψη του νετρονίου), οι Joliot και Irene Curie το 1933 (ανακάλυψη της τεχνητής ραδιενέργειας), οι Hahn και Strassmann το 1938 (ανακάλυψη της πυρηνικής σχάσης), ο Fermi και οι συνεργάτες του το 1942 (ανάπτυξη του πρώτου αντιδραστήρα ελεγχόμενης σχάσης και παρήγαγε την πρώτη ανθρωπογενή αλυσιδωτή πυρηνική αντίδραση) και πολλοί ακόμα ερευνητές οι οποίοι συνεισφέραν στον κλάδο της πυρηνικής φυσικής.

### 1.1.1. Ορισμένες ιδιότητες των πυρήνων

Ο πυρήνας καταλαμβάνει πολύ μικρή περιοχή στο κέντρο του ατόμου στην οποία περιλαμβάνεται το μεγαλύτερο μέρος του συνόλου της μάζας του ατόμου και αποτελείται από τα νουκλεόνια, δηλαδή τα πρωτόνια (θετικά φορτισμένα) και τα νετρόνια (ηλεκτρικά ουδέτερα). Προκειμένου να αναλύσουμε ορισμένες από τις ιδιότητες του πυρήνα στο παρόν κεφάλαιο, παραδείγματος χάρη το μέγεθός και η μάζα του, θα χρειαστεί πρώτα να γίνει αναφορά σε κάποιους όρους όπως:

Ο αριθμός των νετρονίων 'N', ο οποίος αναφέρεται στα νετρόνια του πυρήνα του ατόμου.

Ο μαζικός αριθμός (ή αριθμός νουκλεονίων) 'A', ο οποίος αναφέρεται στο σύνολο των πρωτονίων και των νετρονίων τα οποία βρίσκονται στον πυρήνα του ατόμου ενός στοιχείου.

Ο ατομικός αριθμός 'Z', ο οποίος αναφέρεται στον αριθμό των πρωτονίων τα οποία βρίσκονται στον πυρήνα ενός ατόμου.

Ισότοπα ορίζονται τα άτομα του ίδιου χημικού στοιχείου, των οποίων οι πυρήνες έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό ενώ ο αριθμός των νετρονίων τους διαφέρει, κάτι το οποίο συνεπάγεται με διαφορετικό μαζικό αριθμό μεταξύ αυτών. Τα ισότοπα δεν παρουσιάζονται στη φύση με την ίδια αφθονία, μπορεί να διαφέρει σημαντικά, ενώ μερικά είναι δυνατόν να παραχθούν στο εργαστήριο με πυρηνικές αντιδράσεις χωρίς να εμφανίζονται στη φύση.

Προκειμένου να γίνεται κατανοητός ο αριθμός των νετρονίων και των πρωτονίων του πυρήνα χρησιμοποιείται το σύμβολο  $ZAX$  όπου το A και Z είναι ο μαζικός και ο ατομικός αντίστοιχα και το X αναπαριστά το χημικό σύμβολο του στοιχείου. Λόγω του ότι οι πυρήνες των ατόμων του ίδιου χημικού στοιχείου έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό 'Z', όπως προαναφέρθηκε, ορισμένες φορές παραλείπεται ο δείκτης αυτός εφόσον μπορεί να προσδιοριστεί από το χημικό σύμβολο.

#### **A. Φορτίο και μάζα**

Ο πυρήνας του κάθε ατόμου βρίσκεται στο κέντρο και αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια. Παρ' όλο που τα πρωτόνια και τα νετρόνια έχουν σχεδόν ίσες μάζες, τα πρωτόνια είναι θετικά φορτισμένα ενώ τα νετρόνια δεν φέρουν ηλεκτρικό φορτίο, είναι δηλαδή ηλεκτρικά ουδέτερα. Επομένως ο πυρήνας έχει θετικό φορτίο ενώ τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από αυτόν και φέρουν αρνητικό φορτίο, έχοντας όλα ανά μεταξύ τους, όπως και τα πρωτόνια, την ίδια μάζα και το ίδιο φορτίο, γεγονός που τα καθιστά όμοια. Τα πιο μικρά φορτία που έχουν παρατηρηθεί στη φύση είναι αυτά του πρωτονίου και του ηλεκτρονίου, τα οποία έχουν ίσο και αντίθετο αριθμό φορτίου, με θετικό αυτό του πρωτονίου και αρνητικό του ηλεκτρονίου, δηλαδή έχουν την ίδια απόλυτη τιμή που είναι ίση με  $1,6 \cdot 10^{-19}C$ . Ως ηλεκτρικά ουδέτερα χαρακτηρίζονται τα άτομα διότι ο αριθμός των πρωτονίων είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων του, επομένως το ολικό του φορτίο είναι ίσο με το μηδέν. Μόλις όμως το άτομο ξεκινήσει να αποβάλλει ηλεκτρόνια, ονομάζεται ιόν και παύει να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο.

Ένας ακριβής τρόπος μέτρησης των πυρηνικών μαζών είναι με την βοήθεια του φασματογράφου μάζας και με την ανάλυση των πυρηνικών αντιδράσεων. Οι φασματογράφοι είναι κατάλληλα οπτικά συστήματα τα οποία

πραγματοποιούν γρήγορα, αξιόπιστα και αυτόματα την ανάλυση του φάσματος του φωτός αφού αλληλεπιδράσει με την ύλη.

Προκειμένου να μετρηθεί η μάζα του πυρήνα χρησιμοποιείται η μονάδα μέτρησης ατομικής μάζας (atomic mass unit) ή αλλιώς amu ή αλλιώς u, όπου  $1u = 1 \text{ amu} = 1.660559 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

Η ατομική μονάδα μάζας (amu) έχει ως ορισμό το 1/12 της μάζας του ατόμου του άνθρακα  $^{12}\text{C}$ . Οπότε με τον τρόπο αυτόν η μάζα του ισότοπου του άνθρακα,  $^{12}\text{C}$  ισούται με 12 u (ή amu) ακριβώς, και το ισότοπο εκείνο του άνθρακα έχει 6 πρωτόνια και 6 νετρόνια (συν έξι ηλεκτρόνια) στον πυρήνα του και ζυγίζει  $1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ . Για αυτό και  $1 u = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . Περίπου 1 u είναι η μάζα τόσο του πρωτονίου όσο και του νετρονίου, ενώ εκείνη του ηλεκτρονίου είναι κατά πολύ μικρότερη τους (περίπου 1836 και 1838 φορές μικρότερη από αυτή των πρωτονίων και των νετρονίων αντίστοιχα). Πιο συγκεκριμένα: m πρωτονίου = 1.00727647 u, m νετρονίου = 1.008664898 u και m = 0,00054858 u. Η μάζα λοιπόν ενός ουδέτερου ατόμου ή ενός πυρήνα ισούται περίπου με την τιμή του μαζικού αριθμού 'A', εκφρασμένη σε u.

Σύμφωνα με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας, η ποσότητα μιας μάζας m είναι ισοδύναμη με κάποια αντίστοιχη ποσότητα ενέργειας E, σύμφωνα με την σχέση

$$E = m \cdot c^2 \quad (1.1)$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, η οποία ισούται με  $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

Από τη σχέση (1) γίνεται κατανοητό ότι μια μορφή ενέργειας είναι και η μάζα και ότι αυτή αντιστοιχεί σε τεράστιο ποσό ενέργειας.

Οπότε ένα σωματίδιο μάζας m έχει ενέργεια  $E = m \cdot c^2$  ανεξάρτητα από το αν το σωματίδιο έχει ταχύτητα ή όχι, με την ενέργεια αυτή να ονομάζεται ενέργεια ηρεμίας του σωματιδίου. Η σχέση αυτή αντιπροσωπεύει την ενέργεια που θα παραχθεί, στην περίπτωση που ένα σωματίδιο μάζας m μετατραπεί σε ενέργεια, ή διαφορετικά την ενέργεια που θα χρειαστεί ώστε να δημιουργηθεί ένα σωματίδιο μάζας m.

Συχνά στην Πυρηνική Φυσική οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της μάζας είναι (Ενέργεια)/ $c^2$ .

Επιλύοντας την εξίσωση (1.1) για το πρωτόνιο, έχουμε ότι:

$$E = m \cdot c^2 = (1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) \cdot (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,50 \cdot 10^{-10} (\text{kg} \cdot \text{m}^2) / \text{s}^2 = 1,50 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 9,38 \cdot 10 \text{ eV} = 938 \text{ MeV}$$

Με την ίδια διαδικασία για τις μάζες του ηλεκτρονίου και του νετρονίου, βρίσκουμε ότι η ενέργεια ηρεμίας ενός ηλεκτρονίου είναι 0.511 MeV και του νετρονίου 939.6 MeV.

Εδώ για καλύτερη κατανόηση να σημειωθεί ότι

$$\text{Μάζα } 1u = 1.66059 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931.478 \text{ MeV} / c^2 \text{ ενέργειας.}$$

## **B. Το μέγεθος των πυρήνων**

Ο Rutherford ήταν εκείνος ο οποίος εισήγαγε τον όρο 'πυρήνας ατόμου'. Μέσω πειραμάτων σκέδασης, σωματιδίων -α σε στόχο λεπτού μεταλλικού φύλλου, που πραγματοποίησε ο Rutherford, ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά η ύπαρξη και η τάξη μεγέθους των πυρήνων. Στα πειράματα αυτά μια δέσμη σωματιδίων -α, δηλαδή θετικά

φορτισμένοι πυρήνες ατόμων ηλίου οι οποίοι ανιχνεύονται με την βοήθεια φθορίζουσας οθόνης, προσπίπτει πάνω σε ένα πολύ λεπτό κομμάτι μεταλλικού ελάσματος, π.χ. αργύρου, χρυσού ή χαλκού. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό σωματιδίων –α διαπερνούν και κινούνται διαμέσου του ελάσματος, ορισμένα αποκλίνουν από την ευθύγραμμη πορεία τους, εξ' αιτίας του θετικού φορτίου των πυρήνων του μετάλλου και των προσπιπτόντων σωματιδίων (ομοειδή φορτία), λόγω της απωστικής δύναμης Coulomb μεταξύ αυτών, και τέλος κάποια ελάχιστα μόνο σωματίδια –α απωθούνται προς τα πίσω σε γωνία 180° από την αρχική κατεύθυνση κίνησης. Τα τελευταία ήταν και εκείνα που κινούνταν κατευθείαν πάνω σε έναν πυρήνα στο κέντρο του ατόμου. Ο Rutherford για να εξηγήσει τα αποτελέσματα των πειραμάτων του δέχτηκε ότι στο κέντρο του ατόμου βρίσκεται ένας πυρήνας ο οποίος καταλαμβάνει πολύ μικρό ποσοστό του ατόμου, ενώ τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται γύρω από αυτόν δεν προκαλούν καμία απόκλιση στα σωματίδια –α διότι αυτά κινούνται πολύ γρήγορα και είναι βαρύτερα από τα ηλεκτρόνια .

Ο Rutherford προκειμένου να υπολογίσει την ελάχιστη απόσταση  $d$  που μπορούν να έχουν το σωματίδιο –α και ο πυρήνας του στόχου, όταν το πρώτο προσεγγίζει μετωπικά τον πυρήνα, προτού αυτό αντιστρέψει την πορεία του λόγω της απωστικής δύναμης Coulomb, εφάρμοσε την αρχή της διατήρησης της ενέργειας. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, η κινητική ενέργεια του σωματιδίου –α πρέπει να μετατραπεί πλήρως σε δυναμική ενέργεια, τη στιγμή εκείνη που το σωματίδιο σταματάει στιγμιαία στο σημείο της πλησιέστερης προσέγγισης, σε τέτοια μετωπική πρόσκρουση. Οπότε στην περίπτωση που εξισωθούν η αρχική κινητική ενέργεια του σωματιδίου –α με την ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος, δηλαδή το σωματίδιο –α συν τον πυρήνα-στόχο προκύπτει η σχέση:

$$\Delta K + \Delta U = 0 \quad (1.2)$$

$$\text{Η οποία ισούται με: } \left(0 - \frac{1}{2} m * u^2\right) + \left(k_e \frac{q_1 * q_2}{d} - 0\right) = 0 \quad (1.3)$$

Όπου  $m$  η μάζα του σωματιδίου –α,  $d$  ένα ανώτατο όριο για το μέγεθος του πυρήνα και  $u$  η αρχική ταχύτητα. Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς  $d$  προκύπτει:

$$d = 2k_e \frac{q_1 * q_2}{m * u^2} = 2k_e \frac{(2e) * (Ze)}{m * u^2} = 4k_e \frac{Ze^2}{m * u^2} \quad (1.4)$$

Όπου εδώ  $Z$  είναι ο ατομικός αριθμός του πυρήνα στόχου.

Ο Rutherford βρήκε ότι το ανώτατο όριο για το μέγεθος του πυρήνα όταν το έλασμα αποτελούνταν από χρυσό ή αλλιώς η ακτίνα του πυρήνα, είναι  $d = 3.2 * 10^{-14}$  m, δηλαδή τα σωματίδια α προσέγγιζαν τους πυρήνες μέχρι την απόσταση αυτή, ενώ στην περίπτωση των ατόμων αργύρου το  $d$  έπαιρνε την τιμή  $2 * 10^{-14}$  m. Παράλληλα συμπεράνε έτσι ότι η μικρή σφαίρα στην οποία είναι συγκεντρωμένο το θετικό φορτίο ενός ατόμου, και την ονομάτισε ως 'πυρήνα' ο ίδιος, δεν ξεπερνά σε μέγεθος τα  $10^{-14}$  m.

Μια μονάδα μέτρησης η οποία χρησιμοποιείται για μικρές αποστάσεις όπως είναι αυτές του πυρήνα είναι τα φεμτόμετρα (fm) ή αλλιώς φέρμι, όπου ισχύει ότι  $1 \text{ fm} = 10^{-15}$  m.

Έπειτα από πλήθος πειραμάτων, από την εποχή των πειραμάτων σκέδασης του Rutherford, άλλα συμπεράσματα για τους πυρήνες είναι ότι οι περισσότεροι από αυτούς είναι περίπου σφαιρικοί, ενώ ο μέσος όρος της ακτίνας τους δίνεται από την σχέση:

$$r = a * A^{\frac{1}{3}} \quad (1.5)$$

Όπου  $A$  είναι ο μαζικός αριθμός και  $a$  είναι μια σταθερά που ισούται με  $a=1.2 * 10^{-15}$  m.

Όσον αφορά τον όγκο του πυρήνα, θεωρείται ευθέως ανάλογος του συνολικού αριθμού νουκλεονίων ( $A$ ), με τον πυρήνα να θεωρείται σφαιρικός. Από αυτό προκύπτει ότι η πυκνότητα όλων των πυρήνων είναι σχεδόν η ίδια. Προκειμένου να σχηματιστεί ο πυρήνας ενός ατόμου, τα νουκλεόνια που ενώνονται συμπεριφέρονται σαν πυκνά συσσωρευμένες σφαίρες.

### Γ. Πυρηνική σταθερότητα

Όπως προαναφέρθηκε, ο πυρήνας αποτελείται από πλήθος πρωτονίων και νετρονίων τα οποία είναι πολύ πυκνά συσσωρευμένα αναμεταξύ τους. Είναι γνωστό ότι μεταξύ των σωματιδίων που φέρουν ομώνυμα φορτία, όπως είναι εδώ τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια, ασκούνται, ειδικά σε τόσο κοντινές αποστάσεις, πολύ ισχυρές απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις Coulomb, οι οποίες λογικό θα ήταν να προκαλούν διάλυση του πυρήνα σε συνδυασμό με την αδιάκοπη κίνηση των νουκλεονίων του πυρήνα. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει και η σταθερότητα του πυρήνα εξασφαλίζεται λόγω της ύπαρξης ισχυρής πυρηνικής δύναμης, η οποία είναι ελκτική δύναμη μεταξύ των νουκλεονίων του πυρήνα πολύ μικρής εμβέλειας ( $< 4$  fm). Στην συγκεκριμένη περίπτωση του πυρήνα, ενώ τα πρωτόνια απωθούνται μεταξύ τους εξ' αιτίας των απωστικών δυνάμεων Coulomb, την ίδια στιγμή έλκονται μέσω της πυρηνικής δύναμης. Το γεγονός ότι ο πυρήνας δεν διαλύεται μας δείχνει ότι η πυρηνική ελκτική δύναμη είναι περισσότερο ισχυρή σε σχέση με την απωστική δύναμη Coulomb όσον αφορά τις πολύ μικρές αποστάσεις στο εσωτερικό του πυρήνα. Η πυρηνική δύναμη πέρα από το ότι δεν επιδρά στα σωματίδια ηλεκτρονίων, δεν εξαρτάται από το είδος του φορτίου, αλλά είναι η ίδια σε όλα τα ζεύγη, όπως πρωτονίου - νετρονίου, νετρονίου – νετρονίου ή και πρωτονίου – πρωτονίου, ενώ παίρνει την τιμή μηδέν όταν οι αποστάσεις μεταξύ των σωματιδίων του πυρήνα ξεπεράσουν συγκεκριμένη τιμή (μερικά μόλις fermi).

Η πυρηνική σταθερότητα σχετίζεται σημαντικά και με το βάρος του πυρήνα. Ένας ελαφρύς πυρήνας είναι περισσότερο σταθερός στην περίπτωση που ο αριθμός των πρωτονίων ισούται με τον αριθμό των νετρονίων του, δηλαδή όταν  $N = Z$ , για παράδειγμα ο πυρήνας του ηλίου είναι πολύ σταθερός εφόσον έχει τον ίδιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων ( $Z=N=2$ ). Από την άλλη ένας βαρύς πυρήνας είναι περισσότερο σταθερός στην περίπτωση που ο αριθμός των πρωτονίων είναι μικρότερος από τον αριθμό των νετρονίων του, δηλαδή όταν  $Z < N$ , γεγονός το οποίο γίνεται εύκολα κατανοητό αν παρατηρήσουμε ότι η ένταση της απωστικής δύναμης Coulomb μεταξύ των πρωτονίων, η οποία τείνει να διασπάσει τον πυρήνα, αυξάνει όσο αυξάνονται τα πρωτόνια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάθε φορά να απαιτείται μεγαλύτερο πλήθος νετρονίων προκειμένου να διατηρηθεί ο πυρήνας σταθερός εφόσον αυτά επηρεάζονται από την ελκτική πυρηνική δύναμη μόνο. Κάτι τέτοιο ισχύει μόνο στις περιπτώσεις όπου τα πρωτόνια δεν ξεπερνούν τα 82, από 'κει και έπειτα η ακόμα και παραπάνω να είναι τα



νετρόνια, δεν είναι εφικτό να αντισταθμίσουν τις απωστικές δυνάμεις Coulomb μεταξύ των πρωτονίων, οπότε κανένας από τους πυρήνες των στοιχείων που διαθέτουν περισσότερα από 82 πρωτόνια ( $Z > 82$ ) δεν είναι σταθερός.

Οι περισσότεροι από τους σταθερούς πυρήνες φαίνεται να έχουν τις τιμές του  $A$  άρτιες και όλοι, εκτός από 8, έχουν και τους δυο αριθμούς  $Z$  και  $N$  άρτιους. Ενδιαφέρον έχουν και οι 'μαγικοί αριθμοί', αν και λίγοι, που εμφανίζονται στην Πυρηνική Φυσική και αναφέρονται είτε στον αριθμό των πρωτονίων είτε στον νετρονίων παρουσιάζοντας μια σειρά ξεχωριστών ιδιοτήτων στους αντίστοιχους πυρήνες, όπως παραδείγματος χάριν η μεγάλη σταθερότητα. Οι 'μαγικοί' αυτοί αριθμοί είναι:  $Z$  ή  $N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ .

### 1.1.2. Ενέργεια σύνδεσης

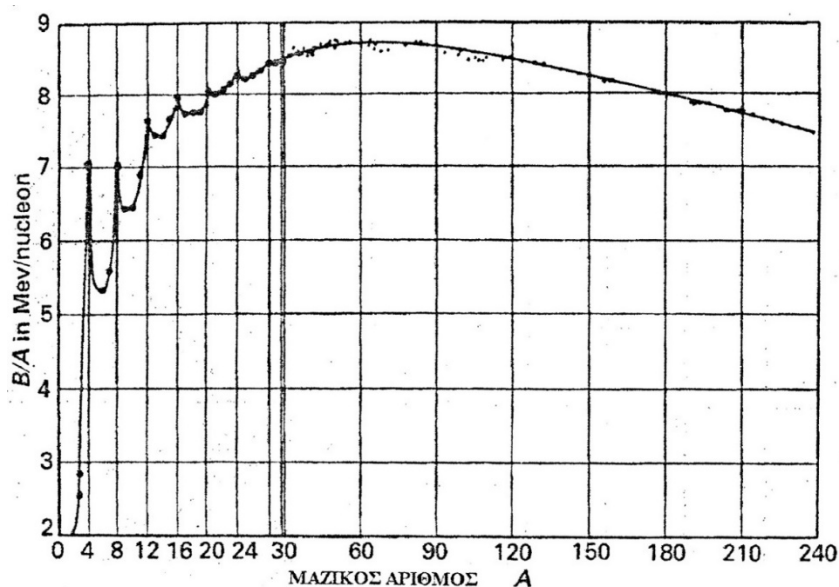
Η ενέργεια η οποία απαιτείται προκειμένου να αποσυνδεθεί το δέσμιο σύστημα του πυρήνα που αποτελείται από πρωτόνια ( $Z$ ) και νετρόνια ( $N$ ), ονομάζεται ενέργεια σύνδεσης και θα πρέπει να είναι θετική ώστε να υπάρξει δέσμιο σύστημα. Σύμφωνα με την σχέση μάζας-ενέργειας του Einstein όπου η ενέργεια ισούται με  $E = m \cdot c^2$  και έχοντας παραλείψει την ενέργεια σύνδεσης των ατομικών ηλεκτρονίων, η ενέργεια σύνδεσης  $B(Z,N)$  ισούται με (Cottingham & Greenwood, 1992):

$$B(Z, N) = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M(\text{πυρ})(Z, N)) \cdot c^2 \quad (1.6)$$

Όπου  $m_p$ ,  $m_n$  είναι οι μάζες του πρωτονίου και νετρονίου αντίστοιχα και  $M(\text{πυρ})(Z,N)$  η μάζα του πυρήνα.

Όταν η ενέργεια σύνδεσης είναι μεγάλη, τότε η σταθερότητα του πυρήνα είναι υψηλή, ενώ αντίθετα μικρή ενέργεια σύνδεσης δηλώνει και χαμηλή σταθερότητα, συνεπώς μέτρο πυρηνικής σταθερότητας αποτελεί η ενέργεια σύνδεσης.

Ορισμένοι πυρήνες φαίνεται να έχουν μεγάλη ενέργεια σύνδεσης και έντονη σταθερότητα ανά νουκλεόνιο. Αυτοί οι πυρήνες φέρουν τιμές ατομικού αριθμού  $Z$  ή αριθμού νετρονίων  $N$  ίσες με 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, αριθμοί οι οποίοι αποκαλούνται μαγικοί και έγινε αναφορά σε αυτούς στη θεωρία του υποκεφαλαίου της πυρηνικής σταθερότητας.



Εικόνα 1.1: Η μεταβολή της μέσης ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο ( $B(Z,N)/A$ ) για τους σταθερούς πυρήνες συναρτήσει του μαζικού αριθμού  $A$  (Γαζής, 2002).

Η Εικόνα 1.1 αναπαρίσταται η μεταβολή της μέσης ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο ( $B/A$ ) για σταθερούς πυρήνες συναρτήσει του μαζικού αριθμού ( $A$ ). Από την Εικόνα παρατηρείται ότι η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο αυξάνει ταυτόχρονα με την αύξηση του ατομικού αριθμού, έως ότου μία μέγιστη τιμή στα  $\sim 8.7$  MeV για  $A \sim 60$ . Έπειτα φαίνεται μια ομαλή μείωση στην ενέργεια σύνδεσης έως την τιμή των 7.5 MeV περίπου που αφορά στους βαρύτερους πυρήνες, γεγονός το οποίο πιθανόν να οφείλεται στη χαμηλή εμβέλεια πυρηνικής δύναμης (μόλις κάποια fermi). Σε έναν πυρήνα, το καθένα νουκλεόνιο δεν μπορεί να αλληλεπιδρά ταυτόχρονα με όλα τα υπόλοιπα, αλλά μόνο με τα γειτονικά νουκλεόνια που βρίσκονται στην εμβέλεια της πυρηνικής δύναμης. Η κατάσταση αυτή του περιορισμού των αλληλεπιδράσεων χαρακτηρίζεται ως κορεσμός των πυρηνικών δυνάμεων (Ασημακόπουλος, 2005). Έχοντας λοιπόν λάβει υπόψιν την πυρηνική μόνο δύναμη, γίνεται αντιληπτό ότι για μεγάλους μαζικούς αριθμούς, η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο τείνει στο να λάβει μία σταθερή τιμή. Η απωστική ηλεκτρική δύναμη (δύναμη Coulomb) έχει πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια μεταξύ των πρωτονίων του πυρήνα και η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ανά πρωτόνιο αυξάνεται σταθερά με την αύξηση του ατομικού αριθμού ( $Z$ ) (Lilley, 2001).

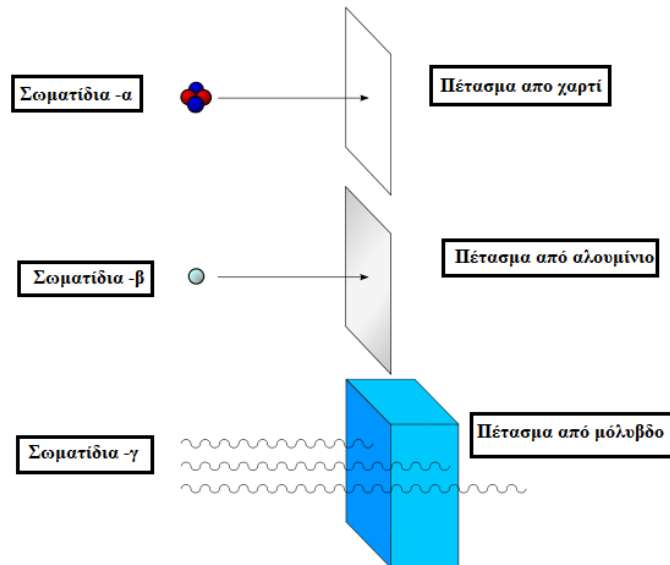
Από την Εικόνα 1.1 οι κορυφές σταθερότητας που διακρίνονται είναι εκείνες για  $A = 4, 8, 12, 16, 20$  και  $24$  που αντιστοιχούν στους πυρήνες  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{20}\text{Ne}$  και  ${}^{24}\text{Mg}$ . Παράλληλα παρατηρείται το γεγονός ότι η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο εμφανίζει έντονη διακύμανση σε καθέναν από τους σταθερούς γειτονικούς πυρήνες, με εμφανή την εξομάλυνσή της όταν ο αριθμός νουκλεονίων γίνει μεγαλύτερος των 30 ( $A > 30$ ).

### 1.1.3. Ραδιενέργεια

Αυτός ο οποίος παρατήρησε για πρώτη φορά το φαινόμενο της ραδιενέργειας, ήταν ο Γάλλος φυσικός Antoine Henri Becquerel το 1896, όταν αντιλήφθηκε την συνεχή εκπομπή ακτινοβολίας από ένωση ουρανίου (θειϊκό κάλιο-ουρανίλιο), όμοιας με τις ακτίνες Χ, η οποία επιδρά σε φωτογραφική πλάκα, ακόμα και στην περίπτωση που η πλάκα είναι καλυμμένη ώστε να μην δέχεται φως. Οι ακτίνες αυτές αρχικά έλαβαν το όνομα "ακτίνες ουρανίου" ή "ακτίνες Μπεκερέλ" ενώ εκπέμπονται και από άλλες ενώσεις ουρανίου. Έπειτα από την ανακάλυψη αυτή η οποία άλλαζε τα έως τότε δεδομένα και αντιλήψεις στη Φυσική, με την αυθόρμητη εκπομπή ενέργειας χωρίς εξωτερικό αίτιο, ξεκίνησε μια νέα προσπάθεια η οποία είχε ως σκοπό την κατανόηση και τον χαρακτηρισμό της ακτινοβολίας η οποία εκπέμπεται από ραδιενεργούς πυρήνες. Η διεργασία αυτή της αυθόρμητης εκπομπής ακτινοβολίας (σωματιδίων) από τις ενώσεις ουρανίου, ύστερα από λίγο καιρό ονομάστηκε ραδιενέργεια. Η ραδιενέργεια λοιπόν είναι ένα πυρηνικό φαινόμενο το οποίο δεν επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία, η πίεση και άλλα.

Έπειτα από την ανακάλυψη του Becquerel, το ζεύγος Curie ξεκίνησε να ασχολείται με την ακτινοβολία των διαφόρων αλάτων και ορυκτών του ουρανίου σε σχέση με τον ιονισμό που αυτή προκαλεί. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν είναι ότι η ένταση της ακτινοβολίας είναι ανάλογη της ποσότητας του ουρανίου, ενώ φαίνεται να παραμένει ανεξάρτητη από το είδος της ένωσης, την επίδραση του φωτός και την θερμότητα. Η ανακάλυψη της ραδιενέργειας τριών νέων στοιχείων το έτος 1898, (θόριο, πολώνιο και ράδιο) πραγματοποιήθηκε λόγω της

παρατήρησής τους ότι ορισμένα ορυκτά του ουρανού παρουσιάζουν πολλές φορές ένταση ακτινοβολίας μεγαλύτερη από το καθαρό μεταλλικό ουράνιο.



**Εικόνα 1.2:** Η διαπερατότητα των ραδιενεργών ακτίνων  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$ , με τα σωματίδια  $\alpha$  να μη διαπερνούν το πέτασμα από χαρτί, τα σωματίδια  $\beta$  να μη διαπερνούν το πέτασμα από αλουμίνιο και τα σωματίδια  $\gamma$  να μη διαπερνούν το πέτασμα από μόλυβδο έως κάποιο συγκεκριμένο πάχος.

Ο Rutherford ήταν εκείνος ο οποίος επιχείρησε να συστηματοποιήσει τα είδη της ακτινοβολίας, αποδεικνύοντας ότι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ήταν τριών τύπων, τους οποίους και ονόμασε ακτίνες  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$ , θέτοντας συγχρόνως τη βάση της ονοματολογίας τους. Επιπλέον έπειτα από σειρά πειραμάτων σκέδασης με σωματίδια άλφα, σε συνεργασία με τους μαθητές του Geiger και Marsden, διατύπωσε την θεωρία πως η μάζα ήταν συγκεντρωμένη στο κέντρο του ατόμου σαν μια σημειακή μάζα με σημειακό φορτίο, καθώς ονόματισε την συγκεκριμένη περιοχή ως "πυρήνα ατόμου", όπου εκεί η συγκέντρωση θετικού φορτίου είναι υψηλή ενώ περιέχεται και το μεγαλύτερο μέρος της ατομικής μάζας, ενώ απέδειξαν και ότι η ραδιενέργεια ήταν αποτέλεσμα της διάσπασης ή αποσύνθεσης των ασταθών πυρήνων. Σύμφωνα με τον Rutherford υπάρχουν τρία είδη ακτίνων οι οποίες ταξινομούνται σύμφωνα με τη φύση του ηλεκτρικού φορτίου που φέρουν, την ικανότητά τους να ιονίζουν τον αέρα και να διεισδύουν στην ύλη. Η διάκριση αυτή γίνεται ως εξής:

Ακτίνες  $\alpha$ : είναι πυρήνες ηλίου, δηλαδή αποτελούνται από θετικά φορτισμένα σωματίδια, τα οποία κινούνται με μεγάλη ταχύτητα και υφίστανται μικρή απόκλιση στο ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.

Ακτίνες  $\beta$ : είναι ηλεκτρόνια, δηλαδή αποτελούνται από αρνητικά σωματίδια, τα οποία υφίστανται ισχυρή απόκλιση στα πεδία.

Ακτίνες  $\gamma$ : είναι υψηλής ενέργειας φωτόνια, δηλαδή δεν φέρουν φορτίο και δεν δείχνουν απόκλιση σε πεδία.

Οι διαφορές όσον αφορά την ικανότητά τους να διεισδύουν στην ύλη έχει να κάνει με το ότι τα σωματίδια των ακτίνων  $\alpha$  μπορούν μόλις να διαπεράσουν ένα φύλλο χαρτί, των ακτίνων  $\beta$  είναι ικανά να διαπεράσουν μερικά χιλιοστά αλουμινίου ενώ των ακτίνων  $\gamma$  μπορούν να διαπεράσουν κάποια εκατοστά μόλυβδου.

### Ραδιενέργεια και νόμοι διαδοχικής αποδιέγερσης

Στη φύση είναι γνωστό ότι υπάρχουν πέρα από τις σταθερές πυρηνικές καταστάσεις και οι ασταθείς, οι οποίες μέσω των αποδιεγέρσεων των ασταθών πυρήνων σε σταθερότερες πυρηνικές καταστάσεις απελευθερώνουν αυθόρμητα ενέργεια ενώ ένα πυρηνικό σύστημα μεταπίπτει σε ένα θυγατρικό πυρηνικό σύστημα μικρότερης ενέργειας. Οι ασταθείς πυρήνες, όπως προαναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 1.1.1. Γ, έχουν περισσότερα από 82 πρωτόνια ( $Z > 82$ ), δηλαδή είναι εφικτό να διασπαστούν αυθόρμητα (ραδιονουκλίδια) λόγω του ότι οι ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των πυρήνων δεν είναι τόσο ισχυρές εξ' αιτίας της μεγάλης απόστασης μεταξύ αυτών. Οι συγκεκριμένοι πυρήνες χαρακτηρίζονται ως ραδιενεργοί, ενώ ο ρυθμός αποδιέγερσης για ένα σύνολο πυρήνων εκφράζεται από κάποια ποσότητα περίσσειας ενέργειας που εκλύεται στο περιβάλλον από το σύστημα με μορφή ακτινοβολίας, σωματιδιακής ή ηλεκτρομαγνητικής φύσης, η οποία χαρακτηρίζεται ως ενεργότητα (ή ραδιενέργεια) και συμβολίζεται με  $A$ , σύμφωνα με την εκάστοτε φυσική διαδικασία αποδιέγερσης καθορίζεται και το είδος της ραδιενεργούς ακτινοβολίας. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ραδιενεργού διάσπασης (αποδιέγερσης) που συχνά ανταγωνίζονται ή συμβαίνουν διαδοχικά. Οι πιο συνηθισμένοι αναφέρονται ως  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$ -αποδιέγερση που υποδηλώνουν την εκπομπή της αντίστοιχης ακτινοβολίας.

Το να μεταπέσει ένας πυρήνας, σε χρονικό διάστημα  $dt$ , σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα του εκάστοτε στοιχείου. Ένας κοινός νόμος, που περιλαμβάνει όλα τα είδη πυρήνων και ραδιενεργών διασπάσεων, ο οποίος αφορά τον υπολογισμό του ρυθμού διάσπασης των ραδιενεργών πυρήνων, αναφέρει ότι η πιθανότητα να διασπαστεί ένας πυρήνας ενός στοιχείου στη μονάδα του χρόνου είναι ανεξάρτητη από το χρόνο και σταθερή (σταθερά διάσπασης ή αποδιέγερσης ( $\lambda$ )). Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα να αποδιεγερθεί ένας ραδιενεργός πυρήνας στη μονάδα του χρόνου είναι συγκεκριμένη. Το να γίνει ακριβής πρόβλεψη της χρονικής στιγμής που θα αποδιεγερθεί ένας συγκεκριμένος πυρήνας δεν είναι εφικτό εξ' αιτίας της στατιστικής φύσης του φαινομένου, αλλά μπορεί για ένα σύνολο όμοιων πυρήνων να προσδιοριστεί ο ρυθμός αποδιέγερσης στη μονάδα του χρόνου (Ασημακόπουλος, 2005).

Ο ρυθμός αποδιέγερσης του ραδιονουκλιδίου ανά μονάδα χρόνου (ενεργότητα) μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda * N \quad (1.7)$$

Το ότι υπάρχει αρνητικό πρόσημο, δηλώνει την μείωση του αριθμού των πυρήνων του συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου ( $N$ ) με την πάροδο του χρόνου.

Έπειτα από την αποδιέγερση, η κατανομή του πληθυσμού των πυρήνων ενός ραδιονουκλιδίου, αν τη χρονική στιγμή  $t=0$  έχουμε  $N_0$  αδιάσπαστους πυρήνες και ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση, προκύπτει η εκθετική μορφή της συνάρτησης:

$$N = N_0 * e^{-\lambda t} \quad \text{"Νόμος Αποδιέγερσης"} \quad (1.8)$$

Όπου,

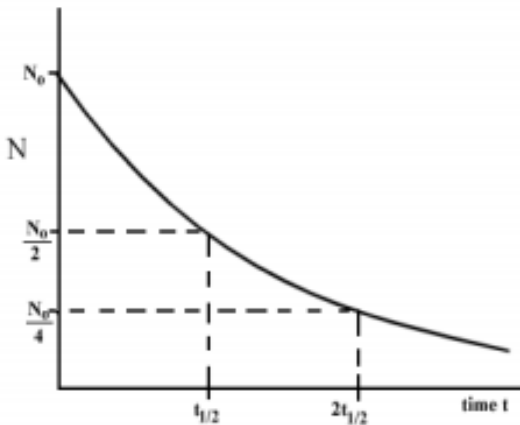
$N$ : Ο ολικός αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων που είναι παρόντες (δηλαδή των πυρήνων που δεν έχουν ακόμη διασπαστεί),

$N_0$ : Ο αριθμός των αδιάσπαστων αρχικών πυρήνων του συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου,

$\lambda$ : η σταθερά αποδιέγερσης η οποία υπολογίζεται από τον χρόνο ημιζωής  $T_{1/2}$  (ο χρόνος που χρειάζεται προκειμένου να διασπαστούν (αποδιεγερθούν) οι μισοί, από ένα δεδομένο πλήθος, ραδιενεργοί πυρήνες ( $N_0$ ) ( $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ )) και

$t$ : Ο χρόνος που έχει παρέλθει

Ο νόμος της εκθετικής διάσπασης, απεικονίζεται στην Εικόνα 1.2 όπου φαίνεται, όπως και στην σχέση (1.8), η εκθετική μείωση των  $N$  αδιάσπαστων πυρήνων ως προς το χρόνο ( $t$ ).



Εικόνα 1.3: Διάγραμμα του νόμου εκθετικής διάσπασης ραδιενεργών πυρήνων. (Ασημακόπουλος, 2005)

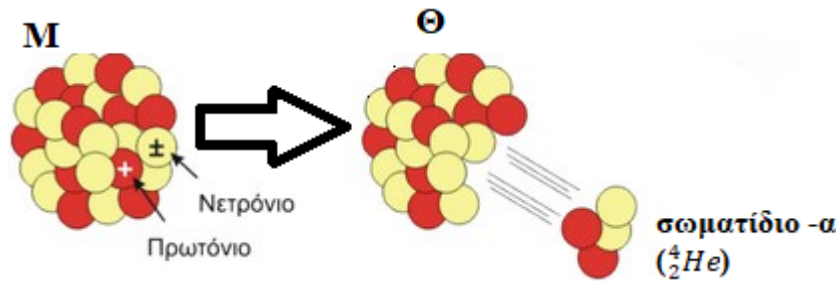
Στο διάγραμμα αυτό στον κατακόρυφο άξονα φαίνεται ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων που είναι παρόντες τη χρονική στιγμή  $t$ , ενώ στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται ο χρόνος  $t$ .

Το curie (Ci) είναι η μονάδα μέτρησης της ενεργότητας η οποία ισούται με  $3,70 \times 10^{10}$  διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο ενώ η μονάδα ενεργότητας στο σύστημα SI είναι το becquerel (Bq), όπου  $1\text{Bq}=1$  διάσπαση/sec, με την αντιστοιχία του (Bq) με το (Ci) να είναι  $1\text{Ci} = 3,70 \times 10^{10}$  Bq.

Οι βασικοί μηχανισμοί αποδιέγερσης που επιτρέπουν σε ένα πυρήνα να μεταπέσει σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη όπως προαναφέρθηκε είναι τρεις:

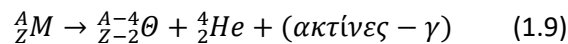
#### Αποδιέγερση $\alpha$ :

Στην αποδιέγερση ή διάσπαση- $\alpha$ , ο αρχικός πυρήνας εκπέμπει έναν πυρήνα  $^4\text{He}$ , δηλαδή σωματίδιο το οποίο αποτελείται από δύο πρωτόνια και δυο νετρόνια. Όταν πραγματοποιείται εκπομπή σωματίων  $\alpha$  από ένα βαρύ πυρήνα, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως μητρικός, ο μαζικός αριθμός μειώνεται κατά 4 και ο νέος πλέον πυρήνας, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως θυγατρικός, είναι σταθερότερος.



Εικόνα 1.4: Σχηματική αναπαράσταση διάσπασης -α.

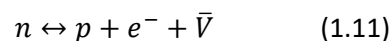
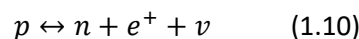
Η αποδιέγερση  $\alpha$  είναι πιθανό να συνοδεύεται και από ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολία (ακτίνες  $\gamma$ ) χωρίς αυτό να είναι πάντα αναγκαίο. Η αποδιέγερση  $\alpha$  περιγράφεται από την γενική εξίσωση:



Τα σωματίδια  $\alpha$  έχουν μεγάλο μέγεθος και είναι δυνατό να διανύσουν μερικά εκατοστά στον αέρα, αλλά ακινητοποιούνται μπροστά σε πιο πυκνά μοριακά πλέγματα όπως είναι ένα φύλλο χαρτί, λόγω των έντονων κρούσεων τους με τα μόρια της ύλης.

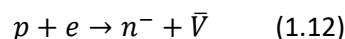
#### Αποδιέγερση $\beta$ :

Στην περίπτωση αυτή, ο αριθμός ο οποίος μεταβάλλεται είναι ο ατομικός ( $Z$ ), ενώ ο μαζικός αριθμός ( $A$ ) παραμένει σταθερός. Κατά τη διαδικασία μετάπτωσης του πυρήνα σε χαμηλότερες ενεργειακά καταστάσεις, αυτός τείνει να κινηθεί στο πλησιέστερο νουκλίδιο της κοιλάδας σταθερότητας. Η διαδικασία αυτή γίνεται με μεταβολή ενός πρωτονίου σε νετρόνιο ή αντίστροφα. Λόγω της ασθενούς αλληλεπίδρασης πραγματοποιείται η μετάπτωση μεταξύ πρωτονίου και νετρονίου, μέσω της οποίας πραγματοποιούνται οι δύο βασικές αντιδράσεις :



Οι αντιδράσεις αυτές είναι αμφίδρομες, οπότε οι αντιδράσεις που προκύπτουν από τη μεταφορά ενός σωματιδίου από το ένα σκέλος στο άλλο με ταυτόχρονη αντικατάσταση του σωματιδίου από το αντισωματίδιό του (ίδια μάζα, αλλά αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο), είναι επιτρεπτές και έχουν παρατηρηθεί από ερευνητές.

Επιπλέον ακόμα μια αξιοσημείωτη μετάπτωση που προκύπτει είναι η αλληλεπίδραση ενός ηλεκτρονίου με πρωτόνιο, που στην ουσία πρόκειται για την σύλληψη ενός τροχιακού ηλεκτρονίου (π.χ. της K στοιβάδας – K-σύλληψη):

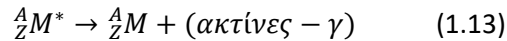


Οι παραπάνω τρεις εξισώσεις (1.10), (1.11) και (1.12) περιγράφουν τις τρεις περιπτώσεις  $\beta$ -αποδιέγερσης, αυτές των  $\beta^-$  αποδιέγερση,  $\beta^+$  αποδιέγερση και αποδιέγερση με εκπομπή ηλεκτρονίου (electron capture, EC) αντίστοιχα.

Η αποδιέγερση  $\beta^-$  λοιπόν λαμβάνει χώρα μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης ενώ η αποδιέγερση  $\alpha$  μέσω της ισχυρής.

### Αποδιέγερση $-\gamma$ :

Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται αποδιέγερση πυρήνα που τα νουκλεόνια του βρίσκονται για κάποιο λόγο σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες πάνω της βασικής, δηλαδή διεγερμένου πυρήνα. Εδώ όταν πραγματοποιείτε η αποδιέγερση εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία όταν ο πυρήνας μεταπίπτει σε χαμηλότερη ή στη θεμελιώδη του κατάσταση, κάτι το οποίο γίνεται μέσω της εκπομπής ενός ή περισσοτέρων φωτονίων. Η αποδιέγερση  $-\gamma$  περιγράφεται από την γενική εξίσωση:



Όπου  $M^*$  η ανώτερη ενεργειακή κατάσταση.

Επίσης, πέρα από την άμεση αποδιέγερση, ένας πυρήνας μπορεί να εκτελέσει διαδοχικές αποδιεγέρσεις μεταπίπτοντας σε ενδιάμεσες ενεργειακές στάθμες πριν φτάσει στη βασική, γεγονός το οποίο προκαλεί παραγωγή πολλαπλών ακτίνων  $\gamma$  από το εκάστοτε στοιχείο.

Τέλος, υπάρχουν 3 τρόποι εκπομπής ακτινοβολίας  $-\gamma$  από ένα πυρήνα. Οι δύο πρώτοι είναι η καθαρή εκπομπή ακτίνων  $-\gamma$  και η δίδυμη γένεση (pair production, PP), στους οποίους πραγματοποιείτε δημιουργία φωτονίου το οποίο μεταφέρει την αποβαλλόμενη ενέργεια, ενώ στον τρίτο τρόπο, την εσωτερική μετατροπή (internal conversion, IC) η ενέργεια μεταφέρεται σε ένα γειτονικό ατομικό ηλεκτρόνιο.

## 1.2 Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος

Το Σύμπαν δημιουργήθηκε από κάποια υπερβολικά θερμή και πυκνή κατάσταση σύμφωνα με την κοσμολογική θεωρία του Big Bang (Μεγάλη Έκρηξη), επομένως οτιδήποτε στην Γη δημιουργήθηκε από κάποια σειρά πυρηνικών διαδικασιών με πολλά από τα νουκλίδια που δημιουργήθηκαν να είναι να είναι ραδιενεργά. Πέρα από την Μεγάλη Έκρηξη, άλλες πηγές ασταθών πυρήνων που απαντώνται στην φύση σήμερα, είναι οι κοσμικές εκρηκτικές διαδικασίες (όπως σουπερνόβα), και οι πυρηνικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στη γη (φλοιός και ατμόσφαιρα) είτε από φυσικά είτε από ανθρωπογενή αίτια.

Ένας τρόπος διαχωρισμού της ραδιενέργειας που υπάρχει στην Γη είναι σε φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια, κατηγοριοποίηση η οποία γίνεται ανάλογα με την πηγή από την οποία προέρχεται. Αναγκαίος φαίνεται να είναι ο διαχωρισμός αυτός, προκειμένου να μελετηθούν οι πηγές ραδιενέργειας στο περιβάλλον και να καθοριστεί η προέλευσή τους. Στην περίπτωση που η ακτινοβολία εκπέμπεται από τα φυσικά ραδιονουκλίδια τα οποία συναντώνται στην φύση, τότε έχουμε την φυσική ραδιενέργεια, ενώ στην περίπτωση που η ακτινοβολία έχει προέλευση από ανθρωπογενή δραστηριότητα τότε η ραδιενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται ως τεχνητή.

### 1.2.1 Φυσική ραδιενέργεια

Στην φύση απαντώνται προϊόντα πυρηνικών αντιδράσεων με το σύνολο αυτών να αποτελεί τη φυσική ραδιενέργεια η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό ραδιενέργειας στο περιβάλλον (~90%). Το κύριο μέρος

της φυσικής ραδιενέργειας στο περιβάλλον αποτελείται από ορισμένα ραδιενεργά νουκλίδια των οποίων ο χρόνος ημιζωής είναι συγκρίσιμος ή ακόμα και μεγαλύτερος από την ηλικία της Γης παραμένοντας σε ποσότητες έως και σήμερα, παρόλο που το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών με το πέρασμα του χρόνου μεταστοιχειώθηκαν σε σταθερά ισότοπα.

Νουκλίδια τα οποία έχουν ατομικό αριθμό  $Z > 82$ , λόγω του φαινομένου του κορεσμού, είναι ασταθή και αποδιεγείρονται με σταδιακές διασπάσεις μέσω εκπομπής ακτινοβολίας- $\alpha$  ή  $-\beta$  (διαδοχικές  $-\alpha$  και  $-\beta$  αποδιεγέρσεις) προς σταθερούς πυρήνες με  $Z \leq 82$ .

Το μεγαλύτερο ποσοστό των φυσικών ραδιονουκλιδίων που βρίσκονται στη Γη με  $Z > 82$  χωρίζονται σε τέσσερις ομάδες οι οποίες ονομάζονται σειρές φυσικής ραδιενέργειας και αυτές είναι: η σειρά του θορίου ( $4n$ ), του ποσειδωνίου ( $4n+1$ ), του ουρανίου ( $4n+2$ ) και του ακτινίου ( $4n+3$ ). Η σειρά των πυρήνων με μαζικό αριθμό  $A=4n+1$  (σειρά Ποσειδωνίου), απουσιάζει από τα φυσικά ραδιοϊσότοπα σήμερα διότι λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής του αρχικού του στοιχείου σε σχέση με την ηλικία της Γης, όλοι οι πυρήνες που δημιουργήθηκαν κατά την κοσμογονία έχουν αποδιεγερθεί. Η ανακάλυψή του οφείλεται στη δημιουργία τεχνητών ραδιοϊσοτόπων, τα οποία ανήκουν σε αυτή τη σειρά, μέσα σε αντιδραστήρες.

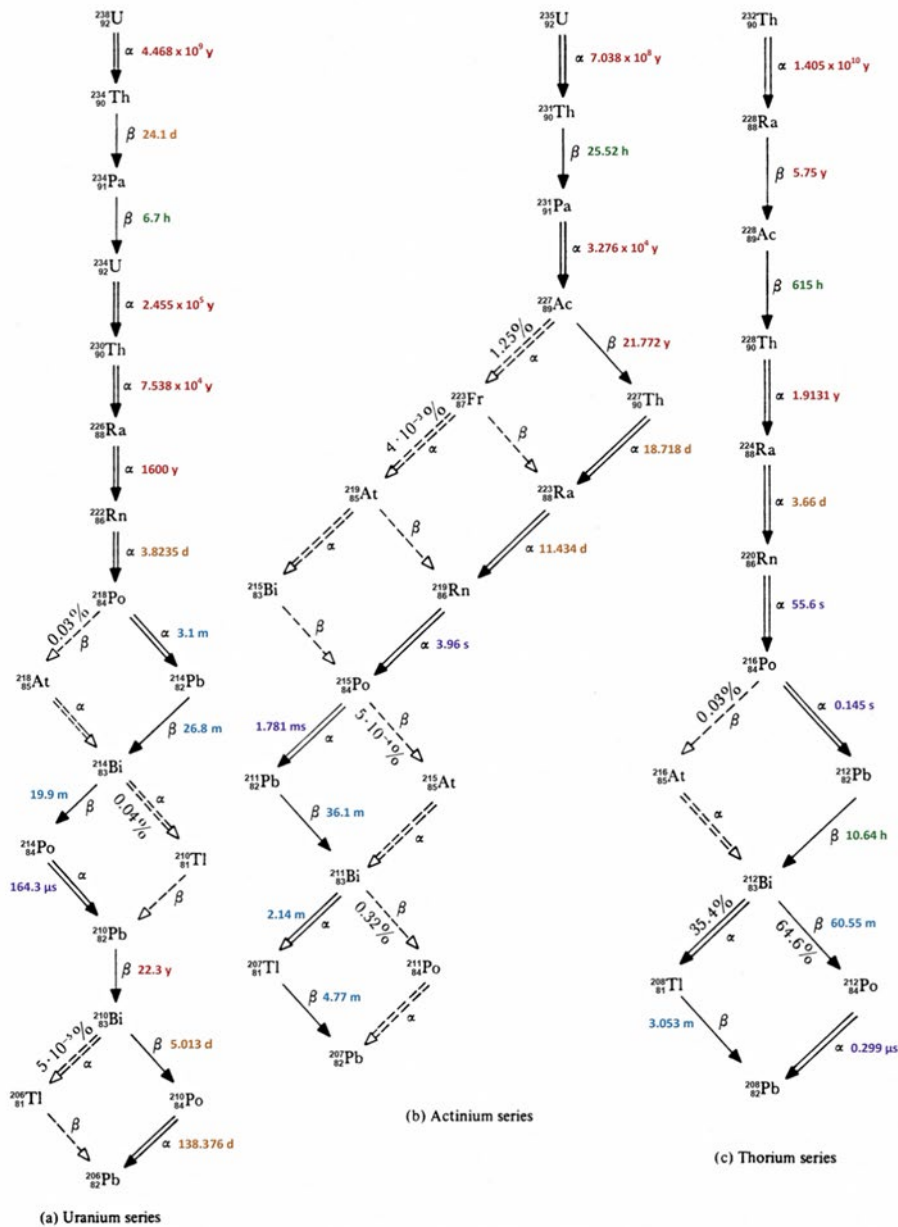
Στον Πίνακα 1.1 παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων ραδιενεργών σειρών:

*Πίνακας 1.1: Οι τέσσερις ραδιενεργές σειρές (Ασημακόπουλος, 2005).*

Σειρά	Ονομασία	Μακροβιότερος πυρήνας	$T_{1/2}$ (y)	Τερματικός πυρήνας
4n	Θορίου	$^{232}\text{Th}$	$1.39 \times 10^{10}$	$^{208}\text{Pb}$
4n+1	Ποσειδωνίου	$^{237}\text{Np}$	$2.25 \times 10^6$	$^{205}\text{Tl}$
4n+2	Ουρανίου	$^{238}\text{U}$	$4.51 \times 10^9$	$^{206}\text{Pb}$
4n+3	Ακτινίου	$^{235}\text{U}$	$7.07 \times 10^8$	$^{207}\text{Pb}$

Στην Εικόνα 1.5 φαίνονται οι διαδοχικές διασπάσεις για κάθε ραδιενεργή σειρά. Οι εναπομείνουσες ραδιενεργές σειρές σήμερα είναι τρεις (Εικόνα 1.5) και το κάθε ραδιενεργό ισότοπο ανήκει σε μια από τις παραπάνω αλυσίδες. Τα φυσικά ραδιοϊσότοπα δημιουργούν χημικές ενώσεις με ορυκτά με το Rn (ραδόνιο), που έχει ισότοπο και στις τρεις φυσικές ραδιενεργές σειρές, να αποτελεί εξαίρεση, όντας ευγενές αέριο και μάλιστα στην περίπτωση που εισπνευσθεί κάποια ποσότητα μπορεί να θεωρηθεί και επικίνδυνο (Lilley, 2001). Πέρα από τα παραπάνω, αρκετά είναι τα στοιχεία με  $Z < 82$  που διαθέτουν ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία βρίσκονται ως προσμίξεις με τα σταθερά τους ισότοπα, όπως για παράδειγμα το  $^{40}\text{K}$ .





Εικόνα 1.5: Σχηματική αναπαράσταση των ραδιενεργών σειρών (Marmier & Sheldon, 1969).

### 1.2.2 Τεχνητή ραδιενέργεια

Εκτός από την φυσική ακτινοβολία στο περιβάλλον συναντάται και η τεχνητή ραδιενέργεια, όπου απελευθερώνονται ραδιενεργά ισότοπα, η οποία είναι άμεσο αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Όλα τα ραδιοϊσότοπα που έχουν παραχθεί μέσω πυρηνικών αντιδράσεων στο εργαστήριο και οι οποίες δεν συναντώνται στην φύση είναι οι βασικές πηγές τεχνητής ραδιενέργειας σήμερα.

Αξιοσημείωτο είναι το ποσοστό τεχνητών ραδιενεργών ισωτόπων στο περιβάλλον το οποίο εμφανίστηκε λόγω πυρηνικών δοκιμών (υποθαλάσσιων και επίγειων) τις δεκαετίες του 1950 και 1960, και είχε ως συνέπεια την εισχώρηση ραδιενεργών ισωτόπων τόσο στην ατμόσφαιρα όσο και στο υπέδαφος των περιοχών που πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές. Έπειτα από την εισχώρηση των ραδιενεργών ισωτόπων στα ανώτερα στρώματα της

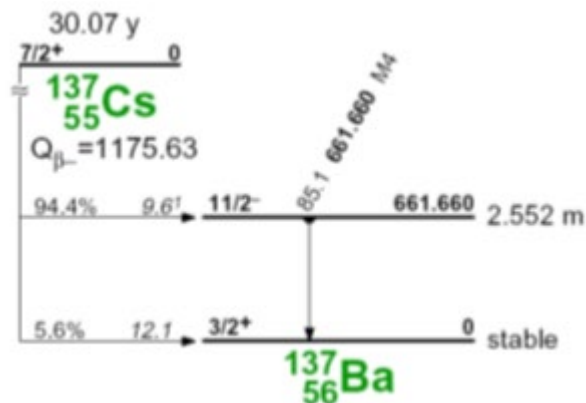
ατμόσφαιρας και σε συνδυασμό με την κίνηση των αέριων μαζών, η μόλυνση εξαπλώθηκε σε τέτοιο βαθμό που έγινε ανιχνεύσιμη σε ολόκληρη την έκταση της Γης, σε αντίθεση με τη μόλυνση του υπεδάφους η οποία περιορίζεται χωρικά. Οι υποθαλάσσιες δοκιμές είχαν επίσης σημαντικό πρόβλημα, αν και σε λίγο μικρότερο βαθμό, με την ραδιενέργεια να εξαπλώνεται σε μεγάλη έκταση εξ' αιτίας της κίνησης των υποθαλάσσιων μαζών.

Τα θαλάσσια οικοσυστήματα ανά τον κόσμο, στις μέρες μας έχουν ως κύριες πηγές τεχνητής ραδιενέργειας πλήθος εναποθέσεων και διαρροών από αντιδραστήρες και πυρηνικούς σταθμούς, τις δοκιμές πυρηνικών όπλων, τη ρίψη και λανθασμένη αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων σε θαλάσσιους ορίζοντες, τα ατυχήματα πυρηνικών αεροσκαφών και υποβρυχίων και τέλος τα πυρηνικά ατυχήματα του Chernobyl το 1986 και της Fukushima το 2011.

Συνοψίζοντας, κύριοι λόγοι παραγωγής τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων είναι για ιατρικούς, βιομηχανικούς και ερευνητικούς σκοπούς, με συνηθέστερο ραδιενεργό ισότοπο τεχνητής ραδιενέργειας στον πλανήτη να είναι εκείνο του  $^{137}\text{Cs}$ .

### 1.3 Μελέτη Καισίου (Cs)

Το ισότοπο του καισίου (Cs), το οποίο έχει ατομικό αριθμό 55, ανακαλύφθηκε το 1860 με την πρόσφατα αναπτυγμένη τότε μέθοδο της φασματοσκοπίας, κατά την διάρκεια φασματοσκοπικών μελετών μεταλλικού νερού, από τους Γερμανούς ερευνητές R.W. Bunsen και G. Kirchhoff. Όταν σε ατομικές βόμβες και πυρηνικούς αντιδραστήρες διασπάται το ουράνιο, δημιουργούνται τα ραδιενεργά ισότοπα του Cs.



**Εικόνα 1.6:** Διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η διάσπαση του  $^{137}\text{Cs}$  σε διεγερμένη στάθμη  $^{137}\text{Ba}$  η αποδιέγερση του οποίου δίνει ακτινοβολία  $\gamma$  ενέργειας 661,6 keV που ανιχνεύεται στο εργαστήριο. Η αποδιέγερση του  $^{137}\text{Cs}$  είναι μονοενεργειακή, εφόσον εξασθενεί με σταθερό ρυθμό, ενώ το  $^{137}\text{Ba}$  να είναι σταθερός πυρήνας.

Το  $^{134}\text{Cs}$  και το  $^{137}\text{Cs}$  είναι από τα σημαντικότερα τεχνητά ισότοπα (ανθρωπογενή), με το  $^{134}\text{Cs}$  να έχει χρόνο ημιζωής 2 χρόνια ( $t_{1/2}=2.07$  y) και το  $^{137}\text{Cs}$  30 χρόνια ( $t_{1/2}=30.17$  y), γεγονός που επιτρέπει τη μελέτη του δεύτερου, λόγω χρόνου ημιζωής κάποιων δεκάδων ετών, στη σχετικά πρόσφατη, τεράστια πυρηνική τραγωδία του ατυχήματος του Chernobyl (1986), της Fukushima (2011) και άλλων γεγονότων, με τις επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου και το περιβάλλον να είναι ιδιαίτερα σημαντικές.

Σημαντικές είναι οι χρήσεις του στην ιατρική και την βιομηχανία, ενώ η μελέτη των ραδιοϊσοτόπων απασχολεί σε μεγάλο βαθμό τους ερευνητές σε θέματα όπως είναι η κίνηση των ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον και η συγκέντρωσή τους, η μελέτη φυσικών διαδικασιών και άλλα.

Ως άμεσες πηγές του τεχνητού ραδιοϊσοτόπου  $^{137}\text{Cs}$  (όπως και το  $^{134}\text{Cs}$ ) χαρακτηρίζονται αυτές οι οποίες το ισότοπο απελευθερώνεται άμεσα στο περιβάλλον όπως είναι το ατύχημα που συνέβη το 1986 στο πυρηνικό εργοστάσιο στο Chernobyl, οι ατομικές δοκιμές, πλήθος αποβλήτων και διαρροών από πυρηνικά εργοστάσια αλλά ακόμα και από ινστιτούτα και ερευνητικά εργαστήρια (σε μικρότερη βέβαια έκταση), ναυάγια πυρηνικών υποβρυχίων και διάφορες ακόμα άλλες. Από την άλλη πλευρά, οι έμμεσες πηγές του  $^{137}\text{Cs}$  (όπως και  $^{134}\text{Cs}$ ) χαρακτηρίζονται εκείνες οι οποίες το ισότοπο απελευθερώνεται αργότερα στο περιβάλλον, λόγω δέσμευσης από κάποιο μέσο, ακόμα και χρόνια μετά από την έκλυση των ισοτόπων από κάποια άμεση πηγή, γεγονός το οποίο μπορεί να επιφέρει ακόμα και υψηλές συγκεντρώσεις του ισότοπου τοπικά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα έμμεσης πηγής είναι το λιώσιμο των πάγων όπου αποδεσμεύονται ισότοπα Cs, τα προϊόντα απέκκρισης του ζωοπλαγκτού, που τρέφεται με φυτοπλαγκτόν στα επιφανειακά στρώματα, καταβυθίζονται ενώ είναι πλούσια σε Cs (Fowler, 1987), τα λεπτόκοκκα ιζήματα που μεταφέρονται από ανέμους που πνέουν στις ερήμους (όπως από την έρημο Σαχάρα προς τη Μεσόγειο) (Ligero, 2005) και η μεταφορά από τη μολυσμένη λεκάνη απορροής από ισότοπα Cs μέσω των ποταμών.

Όσον αφορά τα ιχνοστοιχεία και τα ραδιονουκλίδια τα οποία καταλήγουν στη θάλασσα, αυτά συγκρατούνται από τα ιζήματα μέσω διαδικασιών όπως είναι η άμεση σε κολλοειδή μορφή καθίζηση, η απόθεση ήδη συγκρατημένων ραδιονουκλιδίων από οργανικά απόβλητα, η δέσμευση στα αιωρούμενα σωματίδια και η ιζηματογένεση και τέλος η άμεση δέσμευση από απορρόφηση. Παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων ( $^{137}\text{Cs}$ ) είναι η χημική και φυσική συμπεριφορά τους, οι μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού (μαγνητική επιδεκτικότητα), το οργανικό υλικό, το pH, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, η σύσταση, η απόσταση των δειγμάτων από την ακτή και τέλος το κοκκομετρικό μέγεθος. Το  $^{137}\text{Cs}$  παρουσιάζει αυξημένες συγκεντρώσεις σε λεπτόκοκκο υλικό και υλικά με μεγαλύτερη πυκνότητα, ενώ η συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων μειώνεται με τη αύξηση του κοκκομετρικού μεγέθους (Becks, 2000, Gasco et al., 2002, Heldal et al., 2002). Ισχυρή είναι επίσης και η κατακράτηση του  $^{137}\text{Cs}$  από οργανικά υλικά (Heldal et al., 2002).

Προκειμένου σε μια θαλάσσια περιοχή να προσδιοριστεί ο ρυθμού ιζηματογένεσης μελετάται το  $^{137}\text{Cs}$ , διότι οι μέγιστες τιμές του θεωρούνται σημεία αναφοράς χρονικών στιγμών που εκλύθηκαν υψηλές ποσότητες από αυτό, όπως είναι το 1986 με το ατύχημα του Chernobyl. Υπόψη στη διαδικασία αυτή θα πρέπει να λαμβάνονται και επιπλέον στοιχεία της κάθε περίπτωσης όπως είναι η ικανότητα αποθήκευσης από τα ιζήματα, περιπτώσεις όπου οι περιοχές που μελετώνται διαθέτουν και πηγές που παρέχουν σταθερές ποσότητες  $^{137}\text{Cs}$  (π.χ. διαρροές από εργοστάσια) και διάφορα άλλα.

Προκειμένου να είναι εφικτή η μελέτη των μεταβολών των ραδιοϊσοτόπων στο μέλλον, είναι χρήσιμη η γνώση των συγκεντρώσεων και της κατανομής τους, διότι το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των ραδιοϊσοτόπων που εισέρχονται στη θάλασσα συσσωρεύονται σε παράκτια ιζήματα. Ακόμα περισσότερη βαρύτητα στις μελέτες και καταγραφές

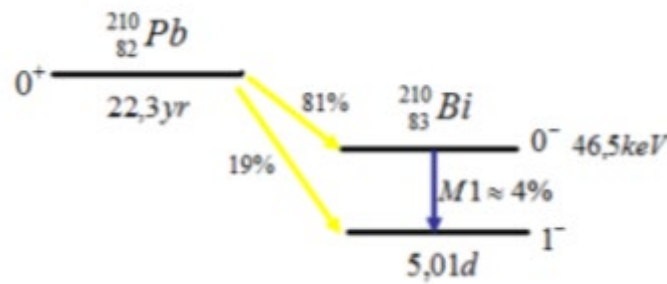
αυτές δίνεται στην περίπτωση όπου συνδέονται με επιπτώσεις στους έμβιους οργανισμούς λόγω της τοξικότητας ορισμένων ισοτόπων όπως το  $^{137}\text{Cs}$ , το οποίο είναι ένα από αυτά που μελετάται στη παρούσα εργασία.

Με τη βοήθεια ραδιοϊσοτόπων όπως  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , και  $^{240}\text{Pu}$ , των οποίων είναι συγκεκριμένες και γνωστές οι χρονικές στιγμές έκλυσής τους στην ατμόσφαιρα, είναι δυνατή σηματοδότηση διάφορων χρονολογιών. Μια τέτοια χρονολογία είναι εκείνη του 1963 όπου απαντώνται στη τροπόσφαιρα μέγιστες συγκεντρώσεις των παραπάνω ισοτόπων ή ακόμα και το ατύχημα του Chernobyl θεωρείται σημείο αναφοράς στη ραδιοχρονολόγηση μέσω της ανίχνευσης του  $^{137}\text{Cs}$  στις περιοχές όπου αυτή είναι εφικτή. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ορθή ραδιοχρονολόγηση μέσω της παρουσίας των παραπάνω ισοτόπων, χρειάζεται ο πυρήνας που θα μελετηθεί να είναι αδιατάραχτος.

Στα προφίλ των θαλάσσιων ιζημάτων αντανακλάται το πρότυπο εισόδου του  $^{137}\text{Cs}$  (και άλλων τεχνητών ραδιονουκλιδίων) στο περιβάλλον. Οι κορυφές που εμφανίζουν τα μέγιστα της συγκέντρωσης του  $^{137}\text{Cs}$ , οι οποίες είναι εμφανείς και χαρακτηριστικές σε έναν πυρήνα ιζήματος είναι τρεις και οι χρονολογίες στις οποίες αντιστοιχούν είναι οι εξής: (i) το 1954, όπου ήταν η πρώτη εμφάνιση στο ίζημα αμέσως μετά από τις πρώτες εκρήξεις θερμοπυρηνικών όπλων, (ii) το 1963, κορυφή η οποία αντιστοιχεί στις μέγιστες συγκεντρώσεις στον αέρα και προκύπτει από το πυρηνικό νέφος (παγκόσμιο επίπεδο), και τέλος (iii) το 1986, χρονολογία η οποία αντιστοιχεί στην πιο πρόσφατη κορυφή και αφορά τη ρύπανση από το ατύχημα που προκλήθηκε στο Chernobyl (Cundy and Croudace, 1995). Η συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  στα ανώτερα στρώματα του προφίλ (μερικών εκατοστών), τις περισσότερες φορές αναπαριστά την επίδραση διάφορων διεργασιών συνδυαστικά με πιθανή εισροή  $^{137}\text{Cs}$  από κάποιο ξέπλυμα που έλαβε χώρα στην ευρύτερη παράκτια περιοχή (π.χ. βροχόπτωση ή πλημμύρα μεγάλης έντασης). Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις στις οποίες οι συγκεντρώσεις του  $^{137}\text{Cs}$  είναι μειωμένες (σε μικρό βαθμό) προς την επιφάνεια εξαιτίας της εναπόθεσης της οργανικής ύλης έπειτα από την παύση της ραδιενεργού επιφανειακής εναπόθεσης των πυρηνικών δοκιμών και του Chernobyl [Walling and He, 1999].

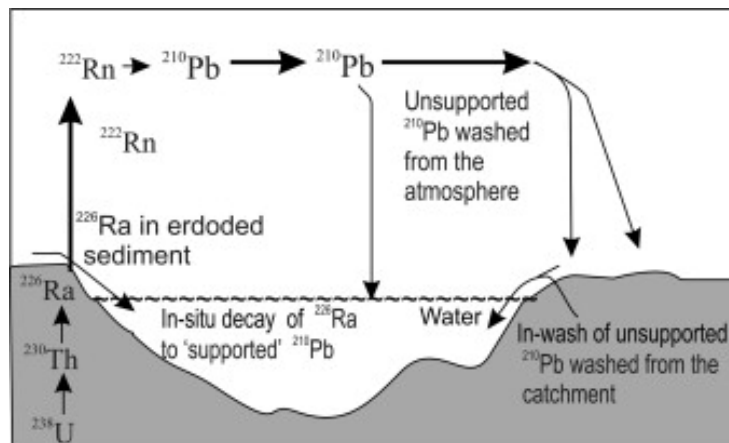
#### 1.4 Μελέτη Μολύβδου (Pb)

Ο  $^{210}\text{Pb}$  συμπεριλαμβάνεται στα φυσικά ραδιονουκλίδια της Γης, υπάγεται στη ραδιενεργό σειρά διασπάσεων του U-238 ενώ ο χρόνος ημιζωής του είναι 22 χρόνια ( $t_{1/2} = 22.23 \text{ y}$ ) (DDEP, 2010). Έχει γίνει χρήση του  $^{210}\text{Pb}$  ως περιβαλλοντικός ιχνηθέτης σε πλήθος διαδικασιών όπως είναι η ατμοσφαιρική εναπόθεση και μόλυνση (Kaste et al., 2003; Sanchez-Cabeza et al., 2007), η ραδιοχρονολόγηση ιζημάτων (Koide et al., 1972; Sanchez-Cabeza et al., 1999) και διάφορες άλλες.



Εικόνα 1.7: Διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η διάσπαση του  $^{210}\text{Pb}$  σε διεγερμένη στάθμη του  $^{210}\text{Bi}$ , με την αποδιέγερσή του να οδηγεί στην ακτινοβολία  $\gamma$  ενέργειας 46.5 keV που ανιχνεύεται στο εργαστήριο.

Ο  $^{210}\text{Pb}$  βρίσκεται σε συγκεντρώσεις στο νερό, το έδαφος και το ίζημα λόγω της αποδιέγερσης του μητρικού του πυρήνα  $^{222}\text{Rn}$  στην ατμόσφαιρα (θυγατρικό του  $^{226}\text{Ra}$ ). Στην στήλη του νερού αυτός προσκολλάται σε αιωρούμενα σωματίδια και αποτίθεται στα ιζήματα του βυθού. Στο θαλάσσιο περιβάλλον δημιουργούνται δυο είδη  $^{210}\text{Pb}$  λόγω του κύκλου αποδιεγέρσεων. Ο  $^{210}\text{Pb}$  που παράγεται από την αποδιέγερση του μητρικού πυρήνα  $^{226}\text{Ra}$  και βρίσκεται σε ραδιενεργή ισορροπία (supported lead) και ο  $^{210}\text{Pb}$  που προέρχεται από τα μεταφερόμενα λόγω φυσικών διεργασιών, συσσωρευόμενα σωματίδια και ονομάζεται περίσσεια  $^{210}\text{Pb}$  (unsupported ή excess lead). Το πλεόνασμα αυτό του μολύβδου, το οποίο συσσωρεύεται στην επιφάνεια του ιζήματος, δημιουργείται εξ' αιτίας του ότι δεν διαλύεται εύκολα σε συνδυασμό με το μεγάλο χρόνο ημιζωής του (22.3 γ). Επομένως ο πυθμένας αποτελείται από συνδυασμό των supported και excess  $^{210}\text{Pb}$  (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8: Κύκλος αποδιεγέρσεων του μητρικού πυρήνα του  $^{210}\text{Pb}$ , του  $^{238}\text{U}$  και πηγές  $^{210}\text{Pb}$  στα θαλάσσια ιζήματα. (Barlas Simsek, & Cagatay, 2014).

Στα θαλάσσια οικοσυστήματα ο υπολογισμός του πλεονάσματος του  $^{210}\text{Pb}$ , στην επιφάνεια του ιζήματος, δίνει σημαντικές πληροφορίες, για τον ρυθμό ιζηματογένεσης, ακόμα και σε βάθος χρόνου εκατονταετίας. Η βασική ποσότητα που χρησιμοποιείται προκειμένου να πραγματοποιηθεί η χρονολόγηση, δηλαδή ο  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ , δίνεται από τη διαφορά μεταξύ του συνολικού και του supported  $^{210}\text{Pb}$ . Το πλεόνασμα του  $^{210}\text{Pb}$  προκύπτει από φυσικές διεργασίες όπως είναι οι εκβολές των νερών των ποταμών στο θαλάσσιο σύστημα, υπόγειες αναβλύσεις νερού (πλούσιο σε

θυγατρικά ραδονίου) δια μέσου των ιζημάτων και η μεταφορά του από την ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα βροχοπτώσεων.

Ο  $^{210}\text{Pb}$  χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για την χρονολόγηση πυρήνων πάγου (Goldberg, 1963) και από τότε έχουν αναπτυχθεί πλήθος θεωρητικών μοντέλων προσαρμοσμένα στις διαφορετικές συνθήκες ιζηματογένεσης, με βασική υπόθεση για κάθε διαδικασία χρονολόγησης να είναι το γεγονός ότι το σύστημα είναι κλειστό. Στη περίπτωση που δεν υπάρχουν διαδικασίες ανακατανομής του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  στο ίζημα, με τη συσσώρευση του ιζήματος αλλά και τη ροή του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  στην επιφάνεια του ιζήματος να είναι σταθερές, το προφίλ που αναμένεται κατά μήκος του πυρήνα όσον αφορά τη συγκέντρωση του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ , είναι μια καθαρά εκθετική καμπύλη. Παρά το γεγονός ότι δύσκολα συναντώνται οι κατάλληλες αυτές συνθήκες στη πραγματικότητα, σε αρκετές περιπτώσεις, τα θεωρητικά αυτά μοντέλα παρέχουν καλά αποτελέσματα. Τα βασικά θεωρητικά μοντέλα χρονολόγησης με  $^{210}\text{Pb}$ , τα οποία ονοματίζονται ανάλογα με την θεμελιώδη υπόθεση στην οποία βασίζεται το καθένα (συγκέντρωση του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  στα ιζήματα, ροή του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  στην επιφάνεια του ιζήματος, ρυθμό συσσώρευσης μάζας), είναι επιγραμματικά:

- i. To Constant Activity model (CA) (Robbins and Edgington, 1975; Robbins, 1978; Dominik et al., 1981; Binford, 1990; Carroll and Lerche, 2003)
- ii. To Constant Sedimentation model (CS) (Robbins, 1978)
- iii. Constant Flux model (CF) (Robbins, 1978; Smith and Walton, 1980; Appleby and Oldfield, 1983; Binford, 1990; Carroll and Lerche, 2003)
- iv. Periodic Flux model (PF) (Sanchez-Cabeza et al., 2000) και
- v. Constant Flux Constant Sedimentation model (CFCS) (Crosaz et al., 1964; Krishnaswamy et al., 1971; Koide et al., 1973; Brugam, 1978; Appleby and Oldfield, 1983)

Στην παρούσα εργασία το θεωρητικό μοντέλο χρονολόγησης με  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  που εφαρμόστηκε, ήταν το Constant Flux Constant Sedimentation model (CFCS) το οποίο συναποτελείτε ταυτόχρονα διαφορετικά άλλα μοντέλα. Αυτά είναι το μοντέλο CF το οποίο αφορά τη σταθερή ροή στην επιφάνεια του ιζήματος ( $f_i=f(i)=f$ ), το μοντέλο CS το οποίο αναφέρεται στον σταθερό ρυθμό συσσώρευσης μάζας ( $r_i=r(i)=r$ ) και τέλος το μοντέλο CA το οποίο υποστηρίζει ότι η συγκέντρωση του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  όταν δημιουργήθηκε το δείγμα (i) ήταν σταθερή, και είχε μία τιμή την οποία θα συμβολίζεται με  $R_0$ . Συνδυάζοντας τα παραπάνω τρία μοντέλα προκύπτει ο τύπος:

$$R_i(t = 0) = \frac{f}{r} = R_0 \quad (1.14)$$

Όπου  $f(i)$  είναι η μέση ροή στην επιφάνεια του ιζήματος και  $r(i)$  ο μέσος ρυθμός συσσώρευσης μάζας στο δείγμα (κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του δείγματος (i)).

Στο μοντέλο CA το  $r$  μπορεί και να μεταβάλλεται, γεγονός το οποίο δεν αφήνει τα μοντέλα CA και CFCS να είναι ισοδύναμα, εφόσον στο CFCS μοντέλο η συσσώρευση μάζας θεωρείται ότι έχει έναν σταθερό ρυθμό. Συνδυάζοντας στον παραπάνω τύπο το μοντέλο CS, η σχέση (1.14) παίρνει την μορφή:

$$R_i = \frac{f}{r} e^{-\lambda m_i/r} = R_0 * e^{-\lambda m_i/r} \quad (1.15)$$

Σχέση η οποία υποδηλώνει την εκθετική μείωση της συγκέντρωσης του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  ( $R_i$ ) συναρτήσεως του βάθους.

Η λύση της σχέσης (1.15) δίνεται σύμφωνα με τους Crozaz et al. (1964) προσαρμόζοντας γραμμικά το λογάριθμο της συγκέντρωσης του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  ( $\ln R_i$ ) και το mass depth  $m_i$  ( $\text{kg/m}^2$ ) και προκύπτει ότι:

$$\ln R_i = \ln R_0 - \frac{\lambda}{r} m_i \quad (1.16)$$

Μέσω της γνωστής γραμμικής εξίσωσης  $y=a+bx$  εύκολα προκύπτει ότι  $a=\ln R_0$  ενώ η κλίση είναι  $b=-\lambda/r$ . Επομένως, έχουμε ότι  $R_0=e^a$  και  $r=-\lambda/b$ . Οι αβεβαιότητες των  $R_0$  και  $r$  είναι εύκολο να υπολογισθούν μέσω των αβεβαιοτήτων που αντιστοιχούν στις τιμές των  $a$  και  $b$ .

Η ξεκάθαρα εκθετική τάση του  $R_i$  σε συνάρτηση με το  $m_i$ , στο συγκεκριμένο μοντέλο, παρέχει τη δυνατότητα να υπολογιστούν χρόνοι. Μέσω του μέσου  $r$  και θεωρώντας ότι  $t(0)=0$ γρ, είναι εύκολο να υπολογιστεί ο χρόνος  $t(i)$  για το δείγμα (i) με τη χρήση της εξίσωσης:

$$r_i = \frac{dm}{dt} \quad (1.17)$$

Επιπρόσθετα, μέσω του  $R_0$  είναι εφικτό να υπολογιστούν χρονολογίες με τη βοήθεια του μοντέλου CA.

Δυο είναι οι περιπτώσεις στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί το μοντέλο CFCS. Η πρώτη είναι όταν είναι γραμμική η συνάρτηση του  $\ln(R_i)$  σε σχέση με το  $m_i$ , ενώ η δεύτερη είναι όταν είναι ανά τμήματα γραμμική, με τη παρουσία δύο ή και περισσότερων γραμμικών περιοχών σύμφωνα με τους Brugam (1978), Goldberg et al. (1977). Ο μέσος ρυθμός ιζηματογένεσης είναι εφικτό να υπολογιστεί σε κάθε περιοχή ενώ το  $R_0$  για την ανώτερη, διαδικασία η οποία πρέπει να λαμβάνεται προσεκτικά υπόψη λόγω των πιθανών μεταβολών του  $R_0$ , της επιφάνειας του ιζήματος ή της ροής.

Όλα τα μοντέλα που προαναφέρθηκαν είτε επιγραμματικά είτε αναλυτικά θεωρούνται αρκετά ισχυρά έχοντας υψηλά ποσοστά επιτυχίας, αλλά παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με τους Schottler and Engstrom (2006) και von Gunten et al. (2009) κανένα μοντέλο δεν θεωρείται κατάλληλο χωρίς κάποια επιβεβαίωση δεδομένης της πολυπλοκότητας που συναντάται στις περισσότερες πραγματικές καταστάσεις, κυρίως σε εκείνες των θαλασσών.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η επικύρωση των μοντέλων χρονολόγησης, κάποιοι ακόμα παραδειγματικοί δείκτες των οποίων γίνεται χρήση είναι:

- Καλά τεκμηριωμένες εκρήξεις ηφαιστειών, και είναι πιθανό να έχουν ως υπολείμματα στρώματα στάχτης τα οποία θα αντιστοιχούν σε μικρές χρονικές περιόδους (Arnaud et al., 2006).
- Σεισμοί, τσουνάμι και πλημμύρες, δηλαδή ακραία φαινόμενα που μπορεί να αφήσουν ευδιάκριτες ιζηματώδεις αποθέσεις οι οποίες είναι δυνατό να ταυτοποιήσουν πλήθος γεωχημικών χαρακτηριστικών και απότομες αλλαγές στον ρυθμό ιζηματογένεσης (van den Bergh et al., 2003; Tuttle et al., 2004; Garcia-Orellana et al., 2006).

- 
- Σε γνωστές πηγές μόλυνσης, οι απότομες μεταβολές όπως είναι το άνοιγμα ή το κλείσιμο μιας βιομηχανίας είναι εύκολος ο προσδιορισμός τους στο περιβάλλον μέσω της χρήσης ισοτόπων του Pb ή μετάλλων ως ιχνηθέτες (Palanques et al., 1998; Diaz-Asencio et al., 2009).
  - Άλλα, αν και με σπάνια εφαρμογή, ραδιοϊσότοπα όπως είναι το Bi-207 (Kim et al., 1997), ο C-14 (Marshall et al., 2007) και το I-129 (Oktay et al., 2000).



## Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία

### 2.1 Περιοχή Μελέτης

Η Λέσβος είναι το τρίτο μεγαλύτερο ελληνικό σε μέγεθος ελληνικό νησί και βρίσκεται στο βορειοανατολικό Αιγαίο. Καταλαμβάνει έκταση 1636 Km<sup>2</sup>, με ακτογραμμή 371 Km. Ο πληθυσμός της κυμαίνεται στους 85.330 κατοίκους, σύμφωνα με απογραφή που πραγματοποιήθηκε το 2011.

Το κλίμα της Λέσβου χαρακτηρίζεται ως ήπιο μεσογειακό, καθώς παρατηρούνται σε αυτό υψηλά ποσοστά υγρασίας κατά την χειμερινή περίοδο με την ετήσια βροχόπτωση να κυμαίνεται μεταξύ 600 και 800 mm ανά έτος, κάτι το οποίο συμβάλει και στα υψηλά επίπεδα κατακρημνίσεων (κυρίως Νοέμβριο έως Φεβρουάριο). Αντίθετα ξηρό είναι το καλοκαίρι (κυρίως Μάιο έως Αύγουστο), με ισχυρούς βορειοανατολικούς ανέμους ανά καιρούς (κυρίως Ιούνιο και Αύγουστο) και υψηλή ηλιοφάνεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Αυτό το οποίο χαρακτηρίζει την περιοχή είναι το τυπικό χερσαίο οικοσύστημα της Μεσογείου, το οποίο έχει ως κύρια χαρακτηριστικά του τα αβαθή και άγονα εδάφη, περιορισμένες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, ανεπάρκεια νερού και τις απόκρημνες πλαγιές. Από καλλιεργήσιμους ή μη ελαιώνες, καλύπτεται το μεγαλύτερο κομμάτι του νησιού, οι οποίοι μετά από τη μακρόχρονη παρουσία τους αποτελούν δασικά συστήματα υψηλής αξίας και έχουν αναδειχτεί ως ένα από τα πιο χαρακτηριστικά οικοσυστήματα της Λέσβου και σε μικρά ποσοστά άλλα είδη φυτών.

Παρά την πλούσια βλάστηση, η Λέσβος, δεν έχει μεγάλους ποταμούς, παρά μόνο χειμάρρους. Από τον Όλυμπο πηγάζει ένας από τους μεγαλύτερους ποταμούς – χειμάρρους της Λέσβου, ο Ευεργέτουλας στο κεντρικό μέρος του νησιού, ο οποίος έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς στο σημείο που εκβάλλει στο κόλπο της Γέρας σχηματίζεται το έλος Ντίπι το οποίο είναι το μεγαλύτερο του νησιού και σημαντικός υδροβιότοπος.

Το νησί στα νότια έχει δύο κόλπους, με πολύ στενές εισόδους. Ο ένας είναι αυτός της Καλλονής, ο οποίος είναι και ο μεγαλύτερος ενώ της Γέρας, ο μικρότερος, ο οποίος βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της Λέσβου και αποτελεί το δεύτερο σε μέγεθος φυσικό κόλπο του νησιού. Ο κόλπος της Γέρας καταλαμβάνει έκταση 43 Km<sup>2</sup>, έχει όγκο 0.52 Km<sup>3</sup> και μέσο βάθος 10 m με μέγιστο τα ~19 m στο κέντρο, γεγονός που τον χαρακτηρίζει ως σχετικά αβαθή, αποτελώντας ένα ημίκλειστο παράκτιο οικοσύστημα. Ο κόλπος συγκοινωνεί με την ανοιχτή θάλασσα, από τη νότια πλευρά, μέσω ενός στενού διαύλου το οποίο έχει μήκος 6.5 km, πλάτος 200 – 800 m, ενώ το βάθος κυμαίνεται από 10 έως 30 m (με τα 30 m να αναφέρονται έξω από το στόμιο λόγω του ότι στο δίαυλο σχηματίζονται μερικά «κατώφλια»).



Εικόνα 2.1: Νήσος Λέσβου με επισημασμένους τους κόλπους της Καλλονής (α) και της Γέρας (β).

Ο κόλπος της Γέρας αποτελεί ένα ημίκλειστο οικοσύστημα του Αιγαίου το οποίο επηρεάζεται από ποικίλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην λεκάνη απορροής όπως είναι η βιομηχανία, η γεωργία, η επίδραση από πλοία και διάφορες άλλες (βλ. πιο αναλυτικά για την ρύπανση του Κόλπου στο υποκεφάλαιο 2.1.4)

Βασικό χαρακτηριστικό της Λέσβου είναι το μεγάλο ποσοστό ελαιόδεντρων τα οποία καλύπτουν σημαντικό τμήμα του νησιού, καθώς και το 42.9% καλύπτεται από καλλιεργούμενες εκτάσεις όσον αφορά την ευρύτερη λεκάνη απορροής του κόλπου της Γέρας, ενώ τα δάση καταλαμβάνουν ποσοστό της τάξης των 25%. Συνεπώς, οι εισροές από λιπάσματα και ζιζανιοκτόνα είναι μια επιπλέον επιβάρυνση στον κόλπο. Η περίοδος κατά την οποία πραγματοποιείται η εφαρμογή των λιπασμάτων είναι από τον Ιανουάριο έως και τον Μάρτιο, δηλαδή η ίδια περίοδος κατά την οποία παρατηρούνται υψηλές βροχοπτώσεις. Ο συνδυασμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα το να καταλήγει στην θάλασσα μεγάλο ποσό θρεπτικών συστατικών, όπως άζωτο και φώσφορος, τα οποία εμπεριέχονται σε μεγάλο βαθμό στα λιπάσματα (Tamvaki and Tsirotsis, 2005). Οι μεγάλες ποσότητες λιπασμάτων και τα αστικά/οικιακά λύματα, τα οποία περιέχουν χημικές ουσίες οι οποίες δεν μπορούν να αποδομηθούν εύκολα, συνδυαστικά με τις συνθήκες που επικρατούν στον πυθμένα, ευνοούν τη συσσώρευση των βυθιζόμενων σωματιδίων στα ιζήματα (Φυτιάνος & Σαμανίδου, 1988).

### 2.1.1. Γεωλογία

Η γεωλογία του χερσαίου τμήματος γύρω από τον κόλπο της Γέρας είναι πολύπλοκη. Η καταβύθιση του κεντρικού τμήματος μιας τεκτονικής τάφρου, η οποία δημιουργήθηκε λόγω του συστήματος ρηγμάτων βορειοδυτικής – νοτιοανατολικής κατεύθυνσης της περιοχής, οδήγησε στον σχηματισμό του κόλπου της Γέρας (Ε.Κ.Θ.Ε., 1986). Το νότιο και ανατολικό τμήμα του νησιού καλύπτεται από μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα, φυλλίτες και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους με ενδιαστρώσεις μαρμάρων, σερπεντινίτες και περιδοτίτες, ανω παλαιοζωικής-τριαδικής ηλικίας (Παπάκης, 1966). Από την άλλη, το βόρειο και δυτικό τμήμα του νησιού καλύπτεται από ηφαιστειακά πετρώματα ηλικίας Τεταρτογενούς - Νεογενούς που αποτελούνται από μάργες και ηφαιστειο-ιζηματογενείς αποθέσεις, που διακρίνονται σε δύο ηφαιστειακές σειρές. Η παλαιότερη χαρακτηρίζεται από

ανδρειακές έως βασαλτικές-ανδρειακές λάβες ενώ η νεότερη ηφαιστειακή σειρά αποτελείται από αλκαλικές βασαλτικές εκχύσεις.

Τρία είναι τα κύρια συστήματα ρηγμάτων που παρατηρούνται στην Λέσβο: ένα βορειοανατολικής διεύθυνσης το οποίο που αποτελεί και την κύρια διεύθυνση διαρρήξεων, ένα βορειοδυτικής διεύθυνσης στο οποίο και το μεγαλύτερο μήκος ρηγμάτων και τέλος ένα με διεύθυνση Βορρά - Νότου (Κατσικάτσος, κ.α., 1993).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί οι οποίοι απαντώνται στην περιοχή του κόλπου της Γέρας είναι οι εξής (Αναγνώστου & Σιούλας, 1989):

- i. Μεταμορφωμένα πετρώματα (φυλλίτες, σχιστόλιθοι, μάρμαρα).
- ii. Πυριγενή πετρώματα διαφόρων φάσεων έκχυσης λάβας (βασάλτες, ολιβινίτες, περιδοτίτες, πράσινοι σχιστόλιθοι).
- iii. Αλλουβιακές προσχώσεις (κροκάλες, άργιλοι, άμμοι).
- iv. Μικρές εμφανίσεις ιζηματογενών πετρωμάτων (ψαμμίτες, άργιλοι, μάργες, κροκαλοπαγή).

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα έχει επηρεάσει σημαντικά το νησί, το οποίο έως και σήμερα παρουσιάζει σημαντικές επιφανειακές υδροθερμικές εξαλλοιώσεις με τα γεωθερμικά πεδία και τις θερμές πηγές να αποτελούν τα υπολείμματα της δραστηριότητας αυτής. Η σύγχρονη ενεργός τεκτονική δράση θεωρείται ότι συνδέεται με τη πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα η οποία είχε ως αποτέλεσμα την παρουσία θερμικών πηγών (Lambrakis & Stamatis, 2008).

### 2.1.2. Μορφολογία – Ιζηματολογία

Βασικός παράγοντας όσον αφορά στη διαμόρφωση της μορφολογίας στην περιοχή του κόλπου της Γέρας, είναι η έντονη τεκτονική δραστηριότητα στην οποία οφείλονται έντονα βυθίσματα και απότομα πρανή, λόγω γεωλογικών ρηγμάτων και επαναδραστηριοποίησής τους.

Στα πλαίσια μίας γενικότερης έρευνας του κόλπου της Γέρας, μελετήθηκε και η μορφολογία (βαθυμετρία) του κόλπου από το Ε.Κ.Θ.Ε (1986), (σημερινό ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.). Η γεωμορφολογική διαφοροποίηση η οποία φαίνεται να υπάρχει στην χέρσο παρατηρείται και στο εσωτερικό του κόλπου, σύμφωνα με την μελέτη αυτή, το οποίο διακρίνεται σε ανατολικό και δυτικό τμήμα (Ε.Κ.Θ.Ε., 1986; Αναγνώστου και Σιούλας, 1989).

Το ανατολικό τμήμα έχει ως κύριο χαρακτηριστικό του τις απότομες διαβρωσιγενείς ακτές, ο διαχωρισμός των οποίων γίνεται σε ακτές με χαμηλούς κρημούς (3-4 m), σε στενές ζώνες παραλίας (4-6 m) και βραχώδεις δύσβατες περιοχές (στην περιοχή του δίαυλου). Το τμήμα αυτό παρουσιάζει μικρή έκταση της επιφάνειας της λεκάνης απορροής και αντίστοιχα μικρό υδρογραφικό δίκτυο. Ενώ αντίθετα στο δυτικό τμήμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από ομαλό ανάγλυφο, αποτελείται κυρίως από ακτές απόθεσης, οι οποίες είναι πλούσιες κυρίως σε άμμο, και είναι εκείνες που αποτελούν στα παράλια τις προσχωσιγενείς περιοχές των δυο υπολεκανών απορροής, ενώ παράλληλα απαντώνται και βραχώδεις δύσβατες ακτές στον δίαυλο. Σε αυτό το τμήμα παρατηρείτε μεγαλύτερη έκταση της λεκάνης απορροής και αντίστοιχα μεγαλύτερο υδρογραφικό δίκτυο.

Στο ανατολικό τμήμα επίσης, ο πυθμένας παρουσιάζει, με παρόμοιο τρόπο, απότομες κλίσεις και τα ιζήματα που επικρατούν είναι κυρίως βιογενούς προέλευσης, ενώ από την άλλη πλευρά στο δυτικό τμήμα παρατηρούνται πιο ήπιες μεταβολές με τα ιζήματα που επικρατούν εκεί να είναι κυρίως χερσογενούς προέλευσης. Στο κέντρο του κόλπου εντοπίζεται το βαθύτερο σημείο στα ~19 m, ενώ υβώματα παρατηρήθηκαν στον πυθμένα των οποίων ο σχηματισμός αποδόθηκε στο γεγονός ότι σε χώρους ανάπτυξης θαλάσσιων λιβαδιών συσσωρεύεται ιζημα (Ε.Κ.Θ.Ε, 1986). Επιπλέον στον διάυλο παρατηρείται προοδευτική αύξηση του βάθους, πέρα από απότομα πρηνή, από το βόρειο τμήμα προς το στόμιο (Αναγνώστου και Σιούλας, 1989).

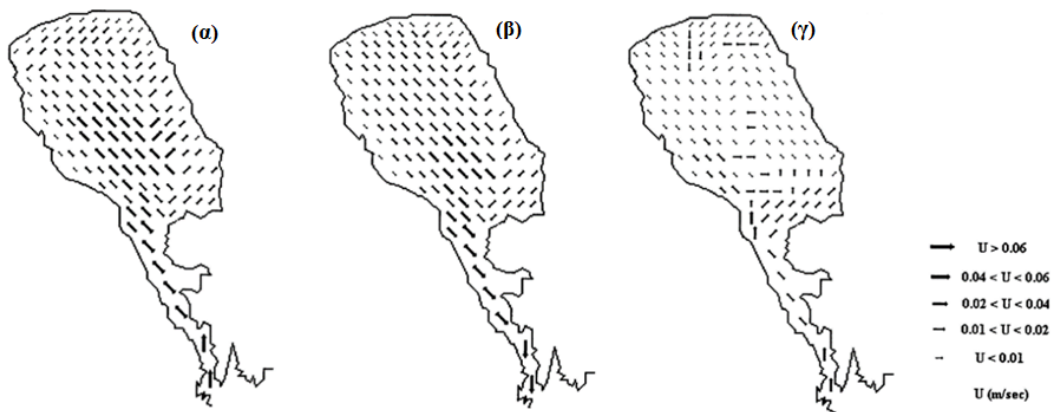
### 2.1.3 Υδρογραφικά χαρακτηριστικά και υδροδυναμικό καθεστώς

Ως ημίκλειστο σύστημα χαρακτηρίζεται ο κόλπος της Γέρας, με την παλίρροια εκεί να μην ξεπερνά τα 2 m σε εύρος (μικροπαλιρροιακό περιβάλλον). Δι- ημερήσια είναι η παλίρροια του κόλπου της Γέρας με 2 πλημμυρίδες και 2 άμπωτες (οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε 24 ώρες, 50 λεπτά και 5 δευτερόλεπτα) και εκείνη θεωρείται ως βασικός παράγοντας που καθορίζει το υδροδυναμικό καθεστώς της περιοχής, ενώ ο άνεμος λαμβάνεται υπόψιν όταν η ταχύτητά του ξεπεράσει τα 5 m/s (Αρχοντίσης, 1998).

Λόγω μορφολογικών χαρακτηριστικών εντός του κόλπου, υπάρχει κάποια διακύμανση στην ανταλλαγή υλικού με την ανοιχτή θάλασσα κατά την διάρκεια του έτους (Theocharis and Georgoroulos, 1984). Η εποχιακή μεταβλητότητα των φυσικών παραμέτρων εντός του κόλπου είναι έντονη και κατά την περίοδο της ανάμιξης (Νοέμβριος-Μάρτιος, διεργασίες ψύξης), το νερό του Αιγαίου το οποίο είναι ελαφρύτερο, τείνει να ρέει πάνω από το βαρύτερο νερό του κόλπου στο στενό. Το υδροδυναμικό αυτό καθεστώς και ο χρόνος ανανέωσης του νερού στον κόλπο ορίζεται σε δύο με τρεις μήνες. Ενώ κατά την θερμή περίοδο (Απρίλιο-Οκτώβριο, στρωμάτωση), οι κατανομές θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας αντιστρέφονται, με το νερό του Αιγαίου τώρα να είναι βαρύτερο και το νερό του κόλπου να γίνεται σταδιακά ελαφρύτερο και θερμότερο (παρ' όλο που λόγω της έλλειψης απορροών και της εξάτμισης είναι αλμυρότερο) έχοντας την τάση αυτό να ρέει από πάνω. Την θερμή περίοδο η ανανέωση των υδάτων, μπορεί να ολοκληρώνεται σε 33 περίπου μέρες (ευνοϊκές συνθήκες), σε αντίθεση με την περίοδο των δυο – τριών μηνών της χειμερινής περιόδου που προαναφέρθηκε (Θεοχάρης και Γεωργόπουλος, 1984), ενώ παράλληλα παρατηρείται είσοδος ολιγοτροφικών υδατικών μαζών του Αιγαίου στον κόλπο και αντικυκλωνική (δεξιόστροφη) κυκλοφορία στην περιοχή.

Σύμφωνα με την εργασία των Κολοβογιάννης και Τσιρτσής (2015), η υδροδυναμική κυκλοφορία του παράκτιου ημίκλειστου οικοσυστήματος του κόλπου Γέρας, διαμορφώνεται ως εξής: μέσω του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης (POM) το οποίο χρησιμοποιήθηκε, παρατηρήθηκε ότι ένα σύστημα 2 στρωμάτων μπορεί να αναπτυχθεί, με το επιφανειακό να κινείται δεξιόστροφα και το υποκείμενο στρώμα (8-10 m και κάτω) να κινείται αριστερόστροφα, στο κέντρο του κόλπου. Επίσης, η περιοχή ανάμιξης των δυο μαζών νερού είναι το στενό και οι ταχύτητες ρεύματος, που είναι γενικά αυξημένες, μπορούν να φτάσουν από 0.3 έως και 0.6 m/s, ενώ στην υδάτινη στήλη μπορεί είτε να αναπτυχθεί μια δομή 2 στρωμάτων με το επιφανειακό και υποκείμενο στρώμα να κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις ή αυτή να κινείται προς μία κατεύθυνση (Κολοβογιάννης και Τσιρτσής, 2015).

Σύμφωνα με το μοντέλο υδροδυναμικής κυκλοφορίας στον κόλπο Γέρας που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1 φαίνεται η διαδικασία ανάμειξης του νερού του κόλπου με την ανοικτή θάλασσα. Οι τιμές ταχύτητας των ρευμάτων κατά τη θερινή περίοδο κυμαίνονται μεταξύ 0.04-0.06 m/s. Στην Εικόνα 2.1 (α), κατά την διάρκεια της πλημμυρίδας (θερινή περίοδος) παρατηρείται εισροή ολιγοτροφικών υδάτινων μαζών από το Αιγαίο προς τον κόλπο, ενώ στην Εικόνα 2.1 (β), την ίδια περίοδο, κατά τη διάρκεια της άμπωτης το υδροδυναμικό καθεστώς αναστράφηκε παρουσιάζοντας εκροή αυτών. Από την άλλη πλευρά, κατά την χειμερινή περίοδο στην Εικόνα 2.1 (γ), οι ταχύτητες των ρευμάτων είναι πολύ χαμηλότερες με τις τιμές τους να κυμαίνονται μεταξύ 0.01-0.02 m/s. Στην περίοδο αυτή ο χρόνος ανανέωσης του νερού του κόλπου προσδιορίζεται στους δυο με τρεις μήνες περίπου, όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω. Κατά την διάρκεια του χειμώνα παρατηρούνται περίοδοι όπου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με τις εισροές ψυχρότερων απορροών καθιστούν τα νερά του κόλπου πυκνότερα από εκείνα του εξωτερικού συστήματος, έχοντας ως αποτέλεσμα τον περιορισμό εισόδου ολιγοτροφικών νερών από το Αιγαίο προς τον κόλπο (Arhonditsis et al., 2003; Arhonditsis et al., 2000a).



**Εικόνα 2.2:** Η κυκλοφορία των υδάτινων μαζών (α) τη θερινή περίοδο (διάρκεια πλημμυρίδας), (β) τη θερινή περίοδο (διάρκεια άμπωτης) και (γ) τη χειμερινή περίοδο όπου η διαδικασία ανάμειξης του νερού του κόλπου με την ανοικτή θάλασσα είναι περιορισμένη (Arhonditsis et al., 2000).

Στις ιδιαίτερες υδροδυναμικές συνθήκες πιθανόν να οφείλεται το γεγονός ότι τα λεπτόκοκκα ιζήματα υπερεισχύουν στο εσωτερικό του κόλπου ενώ αντίθετα, μεγάλα ποσοστά άμμου παρατηρούνται σε περιοχές εκβολής ποταμο-χειμάρων και στην περιοχή απόθεσης του ποταμού Ευεργέτουλα. Οι παρατηρήσεις αυτές προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία του κόλπου και της περιοχής γύρω από αυτόν, όπως επίσης και την γεωλογία, το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής και την υδροδυναμική.

Η κυκλοφορία και η μεταφορά της μάζας στο σύστημα του Κόλπου, αποτελούν συνέπεια του υδροδυναμικού καθεστώτος το οποίο προσδιορίζεται από σειρά διεργασιών και παραγόντων, όπως είναι οι μεταβολές της πυκνότητας μεταξύ της ανοιχτής θάλασσας και του κόλπου κατά τη διάρκεια του ετήσιου κύκλου, η μορφολογία της λεκάνης η οποία συμπεριλαμβάνει τη γεωμετρία της ακτογραμμής και τα βαθυμετρικά χαρακτηριστικά, η επίδραση των διατμητικών τάσεων του ανέμου και της παλίρροιας (Κολοβογιάννης και Τσιρτσής 2015).

### 2.1.4 Χημική σύσταση και ρύπανση του κόλπου της Γέρας

Σημαντικό ρόλο στον κόλπο της Γέρας φαίνεται να έχει η ροή θρεπτικών από σημειακές και μη σημειακές πηγές, λόγω των απορροών, κυρίως έπειτα από κατακρημνίσεις και εδαφικές διαβρώσεις, με μεγαλύτερη συνεισφορά θρεπτικών να παρουσιάζουν οι μη σημειακές πηγές. Κατά την χειμερινή κυρίως περίοδο, τα αποθέματα ανόργανου αζώτου είναι ιδιαίτερα αυξημένα, αποτελώντας περιοριστικό παράγοντα του συστήματος και τα οποία κυμαίνονται μεταξύ 40-60% της συνολικής ροής θρεπτικών στον κόλπο (Arhonditsis et al., 2000).

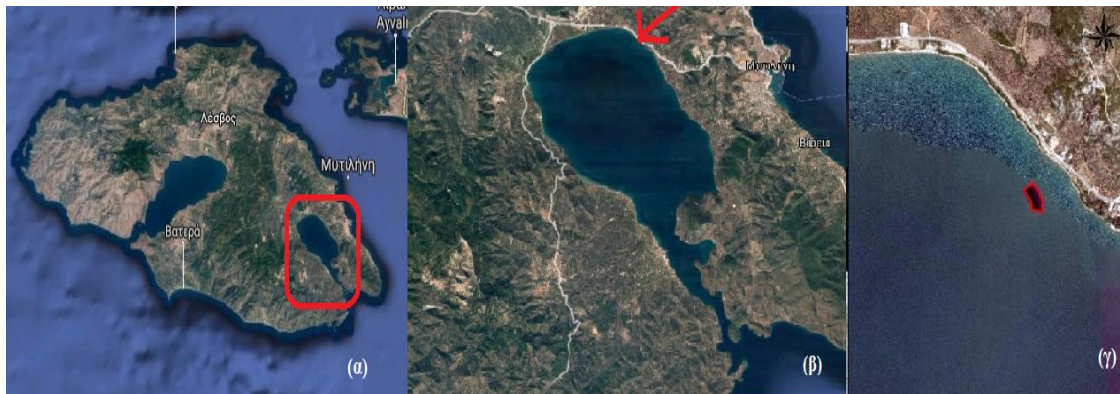
Κύρια αίτια της εμφάνισης του ευτροφισμού στην λεκάνη απορροής του κόλπου της Γέρας είναι η εφαρμογή γεωργικών λιπασμάτων κατά τους χειμερινούς μήνες, οι οποίοι εντάσσονται σε περίοδο υψηλών κατακρημνίσεων, οι εισροές ακατέργαστων αστικών λυμάτων από τα χωριά της γύρω περιοχής και τα λύματα των μονάδων παραγωγής ελαιόλαδου. Όλα τα προαναφερόμενα αίτια σε συνδυασμό και με τον χαμηλό ρυθμό ανανέωσης υδάτων επιδεινώνουν τα περιστατικά ευτροφισμού. Ως εύτροφο λουπόν χαρακτηρίζεται το εσωτερικό του κόλπου, μεσότροφο το κανάλι επικοινωνίας με την ανοιχτή θάλασσα και ολιγότροφο το άνοιγμα του κόλπου από την πλευρά της θάλασσας (Tsirtsis et al., 2003).

Έντονη χαρακτηρίζεται η ανθρωπογενείς δραστηριότητα η οποία συμβάλει στην ρύπανση της περιοχής, λόγω του μεγάλου σε αριθμό πληθυσμού που κατοικεί γύρω από τον κόλπο της Γέρας (~7000 άνθρωποι). Κύριοι τομείς που αυτή περιλαμβάνει είναι η εντατική καλλιέργεια της γης με ελαιώνες, η λειτουργία των ελαιοτριβείων και σαπυνοποιείων, ενώ κατάλοιπα από τα απόβλητα, ενός εκ των μεγαλύτερων κατά την περίοδο της βιομηχανικής άνθησης βυρσοδεψείων των Βαλκανίων (Βυρσοδεψείο Σουρλάγκα), που δεχόταν ο κόλπος επιβαρύνουν ακόμα και σήμερα την περιοχή. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό συμβάλουν στην επιβάρυνση τόσο των υδάτων όσο και του ιζήματος με βαρέα μέταλλα, τα οποία καταλήγουν να συσσωρεύονται στις περιοχές αυτές εφόσον δεν μπορούν να αποδομηθούν ή να καταστραφούν και ιχνοστοιχεία. Εντός των διεθνών επιτρεπτών ορίων κυμαίνονται οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων των ιζημάτων του κόλπου, ενώ παρατηρήθηκε αύξηση κυρίως του χρωμίου κοντά στην περιοχή του διαύλου όπου γινόταν παλαιότερα η έκχυση των αποβλήτων του βυρσοδεψείου, σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη περιοχή του κόλπου (Scoullios et al., 1980).

### 2.2 Δειγματοληψία - Μεθοδολογία

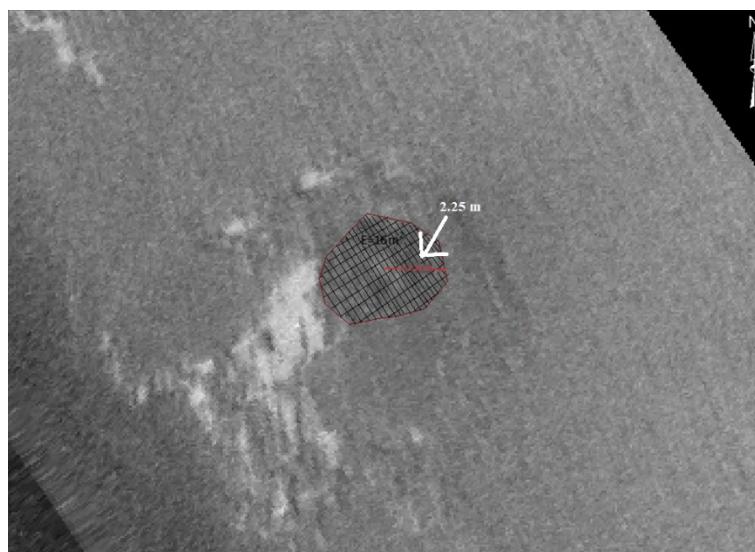
Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται οι μεταλλικοί και ραδιολογικοί παράμετροι της θερμής πηγής στην ηφαιστειογενή περιοχή του κόλπου της Γέρας, από επιφανειακά ιζήματα που λήφθηκαν πάνω από μια υποθαλάσσια ανάβλυση που βρίσκεται εντός κρατήρα, από επιφανειακό δείγμα εκτός κρατήρα και επιφανειακό δείγμα ανοιχτά του κόλπου. Επίσης γίνεται μελέτη αυτών των παραμέτρων και κάποια εκατοστά κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα (πυρήνας ιζήματος) κοντά στη σημειακή πηγή, όπου υπολογίστηκε και ο ρυθμός ιζηματογένεσης. Οι ποσότητες των τριών παραμέτρων που μελετώνται μπορούν να βρεθούν έπειτα από σειρά χημικών αναλύσεων των ιζημάτων στο εργαστήριο.

Η δειγματοληψία έλαβε χώρα σε σημειακή υποθαλάσσια εκροή υπογείων υδάτων εντός κρατήρα, με 5 επιφανειακά δείγματα σε διάφορα σημεία της, τα οποία και ονοματίστηκαν THS1-THS5, ενώ μερικά μέτρα δίπλα από την υποθαλάσσια αυτή ανάβλυση, έξω από τον κρατήρα, λήφθηκε μικρός κατακόρυφος πυρήνας ιζήματος (THC), όπως επίσης και ακόμα ένα επιφανειακό δείγμα (THS6) για σύγκριση των συγκεντρώσεων του περιβάλλοντος εντός με αυτό εκτός κρατήρα. Η υποθαλάσσια ανάβλυση βρίσκεται στο Ανατολικό-Βορειανατολικό τμήμα του κόλπου Γέρας της Λέσβου σε απόσταση μικρότερη των 600 m από την παράκτια περιοχή «Θέρμα».



**Εικόνα 2.3:** (α) Ο κόλπος της Γέρας στη Λέσβο (κόκκινο πλαίσιο). (β) Περιοχή μελέτης –Δειγματοληψίας. (γ) Η παράκτια περιοχή μελέτης με σημειωμένη την υποθαλάσσια ανάβλυση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, η δειγματοληψία στην περιοχή αυτή πραγματοποιήθηκε στις 19 Οκτωβρίου 2018 από ομάδα του Τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλάσσιων Βιοεπιστημών (Τ.Ω.Θ.ΒΕ.) του Πανεπιστημίου Αιγαίου σε συνεργασία με την ομάδα Περιβαλλοντικής Ραδιενέργειας του Ελληνικού Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών. Στην προσέγγιση της περιοχής μελέτης βοήθησε το Ερευνητικό/Εκπαιδευτικό σκάφος μικρής ακτοπλοΐας Αμφιτρίτη που ανήκει στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου, το οποίο κάλυψε την απόσταση μέχρι το σημείο όπου ανιχνεύτηκε η υποθαλάσσια ανάβλυση.



**Εικόνα 2.4:** Εμβαδό και ακτίνα του κρατήρα της υποθαλάσσιας ανάβλυσης που μελετάται σε μια απεικόνιση του βυθού της περιοχής μελέτης από side scan sonar system (Σαϊτάνης Σ. (2019).

Η αποτύπωση της μορφολογίας και βαθυμετρίας έλαβε χώρα στην ευρύτερη περιοχή της ανάβλυσης και πραγματοποιήθηκε από άλλη ομάδα του Τ.Ω.Θ.ΒΕ. Προκειμένου να επιτευχθεί η μορφολογική αποτύπωση του πυθμένα έγινε χρήση ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης (side scan sonar), ο οποίος αποτελούνταν από ρυμουλκούμενη μονάδα (Starfish 450F) με δυο κανάλια υψηλής συχνότητας (450 kHz). Η αποτύπωση της επιφανειακής μορφολογίας με το πλευρικό ηχοβολιστικό είχε σκοπό την χαρτογράφηση της επιφάνειας του πυθμένα, όπως επίσης και η θέση στην οποία βρίσκεται η κύρια ανάβλυση. Μέσω εργαλείων του λογισμικού του ArcMap πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της επιφάνειας και της ακτίνας του κρατήρα.

Πρόκειται για έναν κρατήρα μεγάλης έκτασης  $\sim 16 \text{ m}^2$  ο οποίος εμφανίζει εντός του πλήθος γεωθερμικών πηγών. Η τοποθεσία των γεωθερμικών πηγών ήταν σχετικά εμφανής λόγω της έντονης παρουσία φυσαλίδων αλλά και της διαφοράς στη πυκνότητα του νερού. Στην περιοχή εκείνη, στον κρατήρα, όπου πραγματοποιήθηκε η έρευνα δεν υπάρχει μια μόνο η υποθαλάσσια ανάβλυση, αλλά παρατηρούνται επτά (7) με τις τρεις από αυτές να εμφανίζουν υψηλότερη σχετικά αλλά παρόμοια αναμεταξύ τους επιφάνεια εκφόρτωσης, από τις οποίες συγκριτικά, στις δυο παρατηρούνταν χαμηλή ροή ενώ μια ήταν εκείνη που εμφάνιζε υψηλή. Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην εργασία αυτή επικεντρώθηκε στην έρευνα της θερμοπηγής που αντιστοιχούσε σε εκείνη που παρουσιάζει μεγαλύτερη κινητικότητα από όλες και εμφανίζει επιφάνεια εκροής  $S_{\text{mean}} \sim 15 \text{ cm}^2$ , προσεγγιστικά συνολική επιφάνεια εκροής του όλου κρατήρα να αντιστοιχεί περίπου στο  $S_{\text{total}} \sim 1 \text{ m}^2$  σε κοίλωμα διαμέτρου περίπου 4.5 m και συνολικής επιφάνειας  $16 \text{ m}^2$  (Σαϊτάνης, 2019). Λόγω περιορισμένης ορατότητας των δυτών εξαιτίας του πλήθους αιωρούμενων σωματιδίων (θολά νερά), η επιλογή της ανάβλυσης με τη μεγαλύτερη παροχή-κινητικότητα πραγματοποιήθηκε οπτικά από τους δύτες. Οι πληροφορίες για τη συγκεκριμένη ανάβλυση συλλέχτηκαν από επιτόπιες παρατηρήσεις και δειγματοληψίες από τους δύτες σε συνδυασμό με περιγραφές τους, μετρήσεις, βιντεοσκοπήσεις και φωτογραφίες καταγράφηκε η συγκεκριμένη περιοχή. Πρόκειται για δειγματοληψία σε βάθος 6 m από την επιφάνεια της θάλασσας και με βάθος περίπου 1 - 1.5 m. Με μια πρώτη ματιά παρατηρήθηκε ότι το υλικό του πεδίου ήταν χονδρόκοκκο ενώ δεν έλειπαν και αμμώδεις αποθέσεις στη γύρω περιοχή, με εμφανή απόβλητα εξαιτίας της μακρόχρονης ρύπανσης από την έντονη βιομηχανική δραστηριότητα που υπήρχε στην περιοχή (π.χ. βυρσοδεψείο).

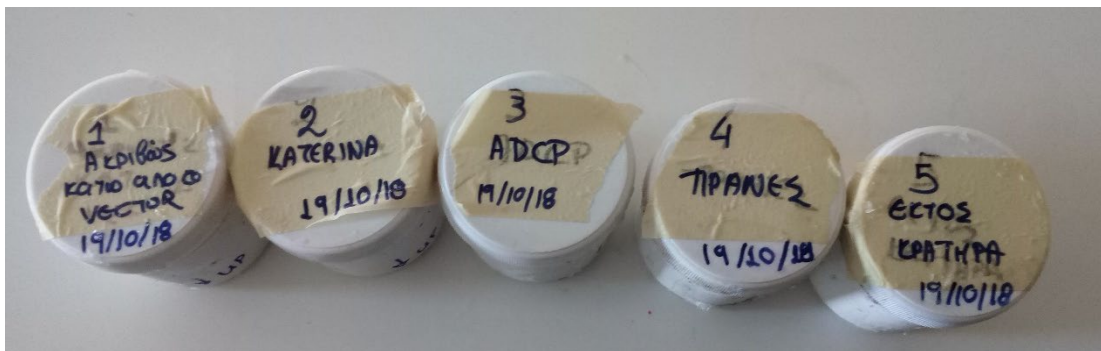
Ο πυρήνας που συλλέχθηκε σε τυχαίο σημείο  $\sim 4 \text{ m}$  Α. του κρατήρα, είχε μήκος 16 cm και τεμαχίστηκε στο εργαστήριο σε δείγματα πάχους 1 έως 2 cm περίπου χωρίς αυτό να είναι σταθερό για όλα τα δείγματα, λόγω του τρόπου που ήταν κατανεμημένο το υλικό μέσα στον πυρήνα και διάφορων άλλων υλικών που συμπεριλαμβάνονταν σε αυτόν (π.χ. χερσογενή ή βιογενή θραύσματα κ.α.), με αποτέλεσμα να μην συμπληρώνεται η απαιτούμενη ποσότητα ιζήματος για ανάλυση ανά 1 cm μόνο. Έπειτα από τον τεμαχισμό τα δείγματα του πυρήνα που προέκυψαν ήταν 12 (THC1-THC12) με τις μάζες τους να κυμαίνονται μεταξύ 25.6 g και 61.1 g.





Εικόνα 2.5: Πυρήνας ιζήματος προτού υποστεί επεξεργασία.

Πέρα από τον πυρήνα, συλλέχτηκαν και επιφανειακά δείγματα σε 5 διαφορετικά σημεία της σημειακής πηγής (4 εντός και 1 εκτός αυτής) τα οποία δεν ξεπερνούσαν τα 7 cm υλικού το καθένα και κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας τοποθετήθηκαν σε σφραγισμένα πλαστικά κυλινδρικά κουτιά προκειμένου να διατηρηθούν τα χαρακτηριστικά του ιζήματος, όπως είναι η πυκνότητα, το πορώδες κ.α., έως ότου πραγματοποιηθεί η επεξεργασία τους στο εργαστήριο.



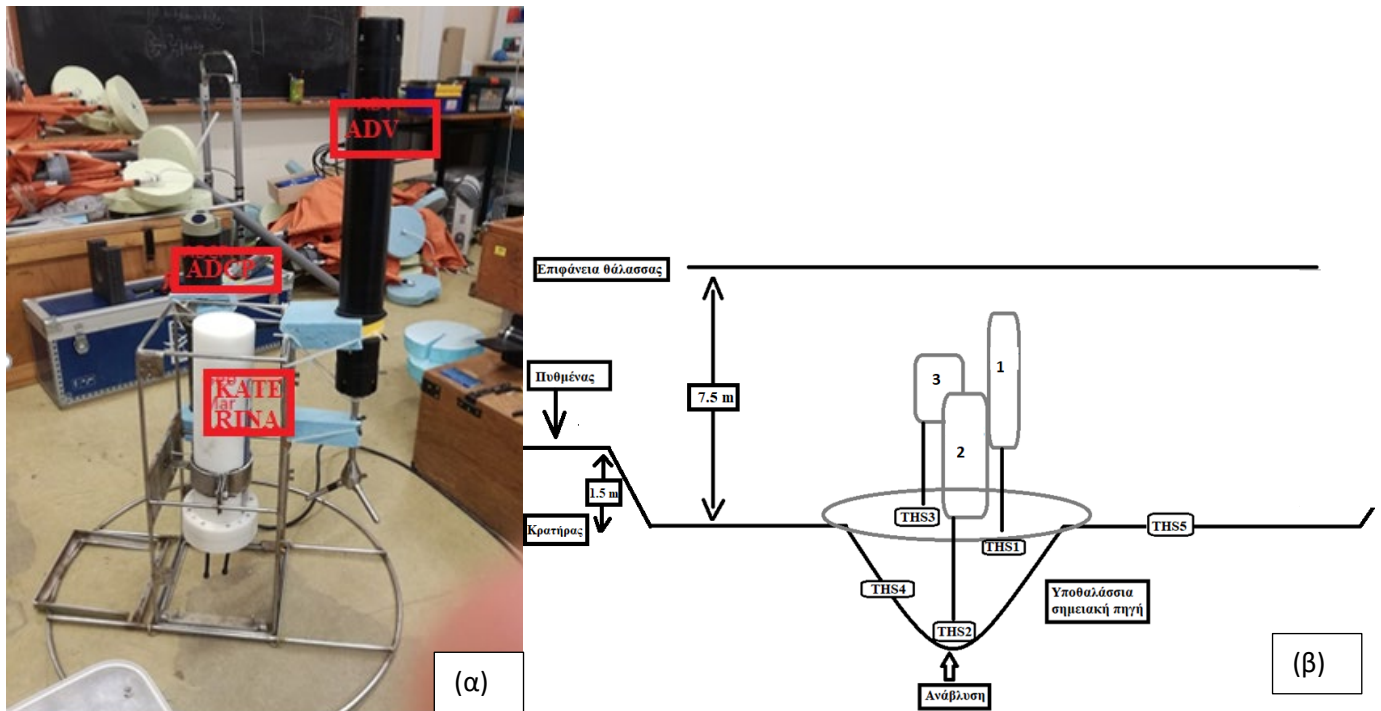
Εικόνα 2.6: Σφραγισμένα πλαστικά κυλινδρικά κουτιά επιφανειακών δειγμάτων προτού υποστούν κανένα είδος επεξεργασίας.

Η περιοχή από την οποία λήφθηκε το κάθε δείγμα με τα εκατοστά υλικού που του αντιστοιχούν να αναγράφονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Περιοχές δειγματοληψίας επιφανειακών δειγμάτων και τα εκατοστά υλικού του καθ' ενός.

Samples	cm
THS1: Ακριβώς κάτω από Vector (ADV)	6.8
THS2: Ακριβώς κάτω από KATERINA	5.5
THS3: ADCP	6
THS4: Πρανές	5.7
THS5: Εκτός κρατήρα	5.5

Όπου τα ADV, KATERINA και ADCP αναφέρονται στο συνδυασμό οργάνων που τοποθετήθηκε πάνω από την υποθαλάσσια πηγή ανάβλυσσης, με σκοπό να ληφθούν τιμές με επιτόπιες καταγραφικές μεθόδους (in situ) οι οποίες επεξεργάστηκαν και παρουσιάστηκαν σε άλλη προγενέστερη διπλωματική εργασία (Σαϊτάνης, 2019).



**Εικόνα 2.7:** (α) Πειραματική διάταξη πόντισης των *in situ* καταγραφών ADV, ADCP και KATERINA (GeoMarea), σύστημα το οποίο τοποθετήθηκε ακριβώς πάνω από την πηγή ανάβλυσης. (β) Αναπαράσταση τους συστήματος στον χώρο, όπου το 1 αντιστοιχεί στο ADV, το 2 στο KATERINA και το 3 στο ADCP.

Τα 5 επιφανειακά δείγματα στο εργαστήριο διαχωρίστηκαν σε top (TMS1 top - TMS5 top) και bottom (TMS1 bot – TMS5 bot) ώστε να παρατηρηθούν τυχόν διαφορές, ακόμα και μεταξύ μερικών εκατοστών, που μπορεί να υπάρχουν στην περιοχή του κρατήρα λόγω αναβλύσεων και αυξημένης δραστηριότητας συγκριτικά με την υπόλοιπη περιοχή.

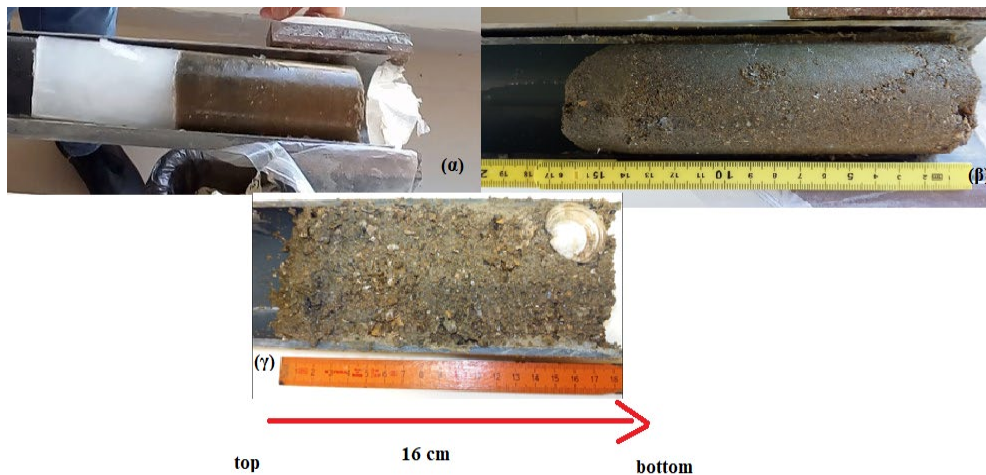
Όλα τα δείγματα έπειτα από την λήψη τους, τοποθετήθηκαν στην κατάψυξη ώστε χαρακτηριστικά του ιζήματος να μην υποστούν αλλοιώσεις (π.χ. στην πυκνότητα) έως ότου ανοίγονταν για μακροσκοπική παρατήρηση και εφαρμογή σειράς χημικών αναλύσεων στο εργαστήριο για εύρεση φυσικής ραδιενέργειας, οργανικού άνθρακα και κύριων στοιχείων.

### 2.3 Μακροσκοπική περιγραφή

Ο πυρήνας και τα επιφανειακά δείγματα που λήφθηκαν από τον κόλπο, αφέθηκαν κάποιες ώρες εκτός κατάψυξης προκειμένου να ξεπαγώσουν και να ανοιχτούν. Ο πυρήνας ανοίχτηκε με τη βοήθεια του εργαλείου σέγας και έπειτα όταν ξεπάγωσε διαχωρίστηκε με νήμα σε δυο τμήματα ώστε να γίνουν διακριτές οι διάφορες ενότητες του. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι είχε αποθηκευτεί μεγάλο ποσοστό νερού στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα έπειτα από την ψύξη περισσότερο σχεδόν από το μισό του να έχει καταληφθεί από πάγο.



**Εικόνα 2.8:** (α) Ο πυρήνας και τα επιφανειακά δείγματα που λήφθηκαν από τον κόλπο εκτός κατάψυξης προκειμένου να ξεπαγώσουν για τη μετέπειτα επεξεργασία. (β) Ένα από τα επιφανειακά δείγματα μετά την απόψυξη. (γ) Άνοιγμα του πυρήνα ιζήματος με τη βοήθεια του εργαλείου σέγας.



**Εικόνα 2.9:** (α) Άνοιχτος πυρήνας ιζήματος μαζί με την ποσότητα πάγου από το νερό που είχε εγκλωβιστεί μέσα. (β) Άνοιχτος πυρήνας ιζήματος έπειτα από το λιώσιμο του πάγου. (γ) Πυρήνας ιζήματος έπειτα από το διαχωρισμό του με νήμα σε δυο τμήματα, προκειμένου να γίνουν διακριτές οι διάφορες ενότητες του.

Όσον αφορά τον πυρήνα που λήφθηκε, φαίνεται να διακρίνονται τρεις ιζηματολογικές ενότητες με βάση το χρώμα του ιζήματος και την κοκκομετρική σύσταση που μπορεί να παρατηρηθεί με μια πρώτη ματιά. Οι ενότητες αυτές φαίνονται αναλυτικότερα στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Ιζηματολογικές ενότητες πυρήνα και μακροσκοπική περιγραφή τους

Ιζηματολογική Ενότητα	Έκταση / Περιοχή (cm)	Χαρακτηρισμός
1 <sup>η</sup>	0-2	Καφέ γκρι άμμος προς ιλυούχος άμμος με πολλά βιογενή θραύσματα. Στη βάση εντοπίστηκαν θραύσματα χερσογενών ψηφίδων.
2 <sup>η</sup>	2 - 4,5	Γκρι έως σκούρα γκρι άμμος προς ιλυούχος άμμος με πολλά βιογενή θραύσματα.
3 <sup>η</sup>	4,5-16	Καφέ έως καφέ γκρι άμμος προς ιλυούχο άμμο με περισσότερα βιογενή θραύσματα.

Συμπερασματικά λοιπόν ο πυρήνας φαίνεται να απαρτίζεται στο σύνολο από ιλυούχο άμμο με αρκετά βιογενή θραύσματα σε όλη την έκτασή του. Συγκεκριμένα μάλιστα μεγάλο κομμάτι κελύφους βρέθηκε προς τα τελευταία εκατοστά (14-16 cm) και όχι στα επιφανειακά όπως θα περίμενε κανείς. Επίσης εμφανής είναι και ένας μαύρος ορίζοντας στο 2-4,5 cm και για αυτό απομονώθηκε ως μια ξεχωριστή ιζηματολογική ενότητα.

Όσον αφορά τα επιφανειακά δείγματα τώρα, έγινε διάκριση σε top και bottom για το καθ' ένα από αυτά. Ως top και bottom απομονώθηκε ποσότητα ίση περίπου με ~1-2 cm ανάλογα την σύσταση του υλικού προσπαθώντας κάθε φορά αυτό να μένει αδιατάρακτο, γεγονός που δεν ήταν πάντα εύκολο σε περιπτώσεις που ήταν αρκετά υδαρές. Ο χαρακτηρισμός τους φαίνεται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Μακροσκοπική περιγραφή επιφανειακών δειγμάτων.

Δείγματα	Ολικά cm	Top	Bottom
THS1: Ακριβώς κάτω από Vector (ADV)	6.8	Ανοιχτή καφέ ιλυούχος άμμος προς άμμο με πολλά χερσογενή θραύσματα.	Ανοιχτή καφέ ιλυούχος άμμος προς άμμο με πολλά χερσογενή θραύσματα.
THS2: Ακριβώς κάτω από KATERINA	5.5	Ανοιχτή καφέ ιλυούχος άμμος προς άμμο με πολλά χερσογενή και ελάχιστα βιογενή θραύσματα.	Ανοιχτή καφέ ιλυούχος άμμος προς άμμο με πολλά χερσογενή και ελάχιστα βιογενή θραύσματα.
THS3: ADCP	6	Καφέ ιλυούχος άμμος προς άμμο με πολλά χερσογενή και ελάχιστα	Καφέ ιλυούχος άμμος προς άμμο με πολλά χερσογενή και ελάχιστα

Δείγματα	Ολικά cm	Top	Bottom
		βιογενή θραύσματα.	βιογενή θραύσματα.
THS4: Πρανές	5.7	Καφέ γκρι έως γκρι αμμούχος ιλύς προς ιλύ με αρκετά βιογενή θραύσματα (έντονη μυρωδιά)	Καφέ γκρι έως γκρι αμμούχος ιλύς προς ιλύ με βιογενή θραύσματα (έντονη μυρωδιά)
THS5: Εκτός κρατήρα	5.5	Σκούρα καφέ-γκρι προς σκούρα γκρι ιλυούχος άμμος προς αμμούχο ιλύ με πολλά βιογενή και χερσογενή θραύσματα (έντονη μυρωδιά)	Σκούρα καφέ-γκρι προς σκούρα γκρι ιλυούχος άμμος προς αμμούχο ιλύ με πολλά βιογενή και χερσογενή θραύσματα (έντονη μυρωδιά)

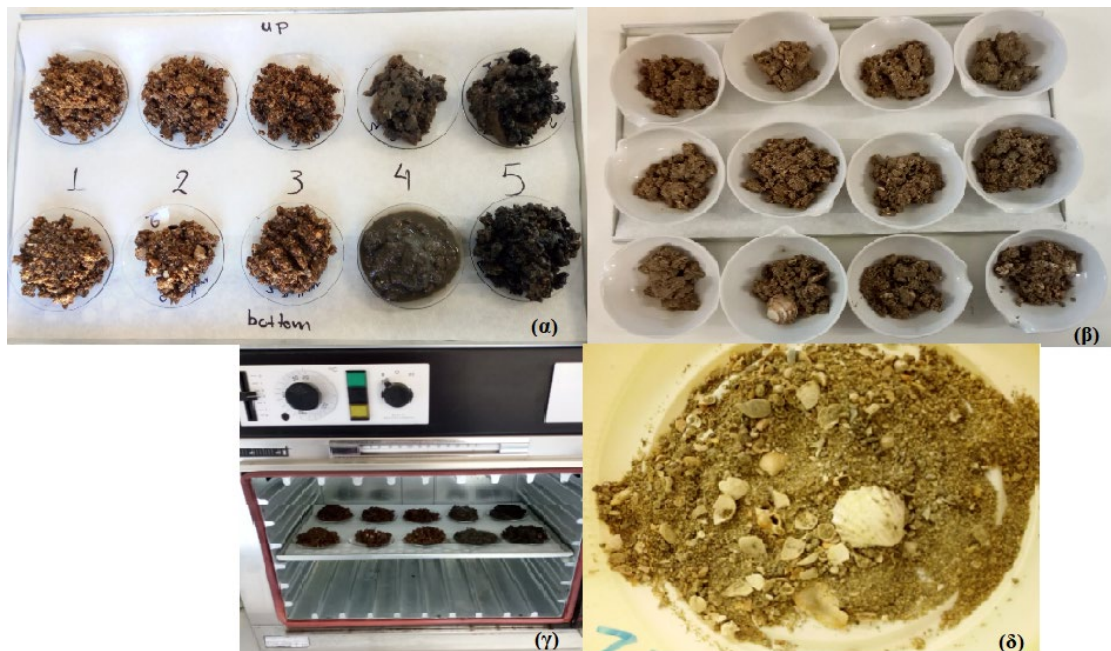


Εικόνα 2.10: Απεικόνιση των επιφανειακών δειγμάτων ιζηματος 1,4 και 5 έπειτα από την απόψυξή τους.

Ενώ όλα τα επιφανειακά δείγματα λήφθηκαν από τον ίδιο κρατήρα, παρατηρείται σημαντική διαφορά στην κοκκομετρική τους σύσταση με τα THS4 top- THS4 bot και THS5 top-THS5 bot να έχουν έντονη μυρωδιά. Το γεγονός αυτό (της έντονης οσμής) παραπέμπει σε υψηλές ποσότητες βιογενούς υλικού, όπου πραγματοποιείται αναγωγή των θεικών, δηλαδή γίνονται τα θειικά ιόντα θειούχα, εξού και η έντονη αυτή οσμή. Η μάζα των επιφανειακών δειγμάτων για κάθε top και bottom κυμαινόταν γενικά από 18.9g έως 34.4g, με αποτέλεσμα κάποια από αυτά σε μετέπειτα επεξεργασία, συγκεκριμένα τα επιφανειακά δείγματα 2 και 3, να ενοποιηθούν ώστε να μπορέσουν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα (π.χ. στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων (HPGe)).

Έπειτα από τη μακροσκοπική περιγραφή ακολούθησε η τοποθέτηση των δειγμάτων σε φούρνο προκειμένου να απομακρυνθεί πλήρως η υγρασία τους, με το χρόνο παραμονής των δειγμάτων στο φούρνο να εξαρτάται από τη σύσταση του υλικού. Για την ακρίβεια από τα δείγματα που τοποθετήθηκαν στον φούρνο στους 40 °C για δυο μέρες

με σκοπό να χρησιμοποιηθούν αργότερα στην εύρεση οργανικού άνθρακα (TOC) λήφθηκαν 3 g ξηρού δείγματος, ενώ τα υπόλοιπα γραμμάρια βρίσκονταν τοποθετημένα σε άλλο φούρνο στους 60 °C για δυο μέρες επίσης, με σκοπό να πραγματοποιηθεί η κοκκομετρία και οι υπόλοιπες μετρήσεις.



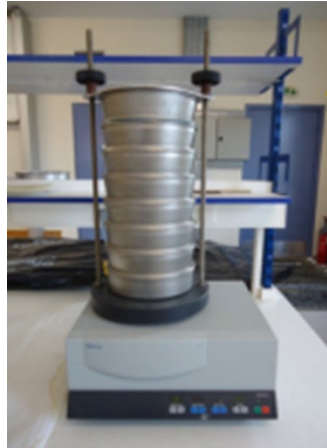
**Εικόνα 2.11:** (α) Επιφανειακά δείγματα ιζημάτων (THS1 top – THS5 bot) έτοιμα για την τοποθέτησή τους στο φούρνο με σκοπό την πλήρη απομάκρυνση της υγρασίας. (β) Δείγματα πυρήνα (THC1 – THC12) έτοιμα για την τοποθέτησή τους στο φούρνο με σκοπό την πλήρη απομάκρυνση της υγρασίας. (γ) Τα επιφανειακά δείγματα στο φούρνο σε θερμοκρασία 40 °C. (δ) Δείγμα έπειτα από τη πλήρη αποβολή της υγρασίας, έτοιμο για κοκκομετρική ανάλυση.

Η επεξεργασία των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με διαφορετικό κάθε φορά τρόπο για την εκάστοτε περίπτωση όπως αναφέρεται στις παρακάτω ενότητες, προκειμένου να βρεθεί η ποσότητα φυσικής ραδιενέργειας, οργανικού άνθρακα και κύριων στοιχείων στα ιζήματα.

Σε κάθε περίπτωση μεσολαβούσε ένα μικρό χρονικό διάστημα αναμονής από τη στιγμή που τα δείγματα έβγαιναν από τον φούρνο, έως ότου χρησιμοποιηθούν προκειμένου αυτά να πάρουν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

## 2.4 Κοκκομετρική Ανάλυση Ιζημάτων: Μέθοδος Ξηρού Κοσκινίσματος

Τα δείγματα που λήφθηκαν απαρτίζονταν κατά κύριο λόγο από χονδρόκοκκο υλικό, οπότε επιλέχθηκε η μέθοδος του ξηρού κοσκινίσματος με σκοπό τον προσδιορισμό του μεγέθους των κόκκων του εκάστοτε δείγματος. Οι διάφορες χονδρόκοκκες κλάσεις είναι πιο εύκολο να προσδιοριστούν κατά το ξηρό κοσκίνισμα με το δείγμα να περνά από σειρά κόσκινων. Η στήλη κοσκινίσματος αποτελείται από αριθμό κόσκινων μαζί τοποθετημένα με διάταξη φθίνουσας σειρά του μεγέθους οπής, από πάνω προς τα κάτω, ενώ στη στήλη συμπεριλαμβάνονται το καπάκι και ο δίσκος.



Εικόνα 2.12: Στήλη κοσκινίσματος.

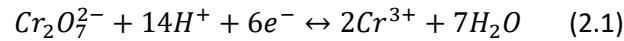
Αφού λοιπόν τα δείγματα αφαιρέθηκαν από το φούρνο και ήρθαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, πραγματοποιήθηκαν ζυγίσεις σε ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας 0.01 g. Ακολούθησε τοποθέτηση καθενός από τα δείγματα ξεχωριστά σε μηχανικό αναδευτήρα κόσκινων, με τις διαμέτρους των οπών τους να αντιστοιχούν σε 4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 μm, 250 μm, 125 μm και 63 μm (κόκκοι <63μm αντιστοιχούν σε λεπτόκοκκο υλικό (mud), ενώ κόκκοι > 63 μm αντιστοιχούν σε χονδρόκοκκο υλικό (sand)) σε και δεκάλεπτη δόνηση. Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν ένα προς ένα τα κόσκινα, ξεκινώντας από εκείνο που έχει τη μεγαλύτερη μεγέθους οπή και το υλικό του κάθε δείγματος το οποίο συγκρατήθηκε στο κάθε κόσκινο, ζυγίστηκε ξεχωριστά στον ηλεκτρονικό ζυγό, καταγράφηκε και αποθηκεύτηκε σε σφραγισμένο πλαστικό σακουλάκι, ώστε να μην πάρουν υγρασία, για τις αναλύσεις που θα ακολουθούσαν. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το υλικό του οποίου οι κόκκοι είχαν διάμετρο πάνω από 4 mm (κυρίως μεγάλα κελύφη και κροκάλες), ενώ καταγράφηκε και αποθηκεύτηκε, δεν χρησιμοποιήθηκε σε περαιτέρω αναλύσεις διότι δεν ήταν εύκολη η επεξεργασία του (π.χ. στο μήλο για άλεση βλ. Ενότητα 2.6 και 2.7).

## 2.5 Προσδιορισμός οργανικού άνθρακα (TOC)

Ανεξάρτητα από το είδος των ενώσεων που περιέχονται στο ίζημα, ο Ολικός Οργανικός Άνθρακας (Total Organic Carbon – TOC) προσφέρει πληροφορίες σχετικά με το επίπεδο και την ποιότητα ρύπανσης σε ύδατα και ιζήματα σχετικά με τη παρουσία οργανικών συστατικών. Επιπλέον ο TOC αποτελεί παράμετρο άμεσου υπολογισμού του συνολικού οργανικού άνθρακα που περιέχεται σε ύδατα, ιζήματα και απόβλητα.

Ένα μέτρο του συνόλου των οργανικών ενώσεων που περιέχονται σε ένα ίζημα αποτελεί η περιεκτικότητα του οργανικού άνθρακα σε αυτό. Η προέλευση των οργανικών ενώσεων είναι είτε φυσική, όπως είναι για παράδειγμα η βιολογική δραστηριότητα των θαλάσσιων οργανισμών (π.χ. τα προϊόντα του μεταβολισμού και της αποσύνθεσης τους), είτε ανθρωπογενής, όπως οι ανθρωπίνες δραστηριότητες (π.χ. αστικά λύματα, βιομηχανία). Το πρώτο στάδιο του αναλυτικού προσδιορισμού των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στο δείγμα, είναι ο προσδιορισμός του οργανικού άνθρακα συνήθως.

Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας του οργανικού άνθρακα στα θαλάσσια ιζήματα στηρίζεται σε μέθοδο οξειδωσης, με διχρωμικό κάλιο και θειϊκό οξύ, του συνόλου των οργανικών ουσιών που περιέχονται σε αυτά. Η σχέση (2.1) περιγράφει την αντίδραση οξειδωσης του διχρωμικού καλίου της παραπάνω μεθόδου σε όξινο περιβάλλον:



Μέσω της διαδικασίας της οπισθογκομέτρησης της περίσσειας του διχρωμικού καλίου με διάλυμα δισθενούς σιδήρου, προσδιορίζεται η ποσότητα του αντιδραστήριου ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) η οποία καταναλώθηκε, ενώ για το τελικό στάδιο της ογκομέτρησης γίνεται χρήση του δείκτη διφαινυλαμίνη (Gaudette et al., 1974).

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να πραγματοποιηθεί προσδιορισμός της περιεκτικότητας του οργανικού άνθρακα στα υπό εξέταση δείγματα, είναι απαραίτητη η παρασκευή διαλυμάτων των αντιδραστηρίων του διχρωμικού καλίου και του εναμμώσιου θειϊκού σιδήρου(II), τα οποία παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Χημείας του Τμήματος.

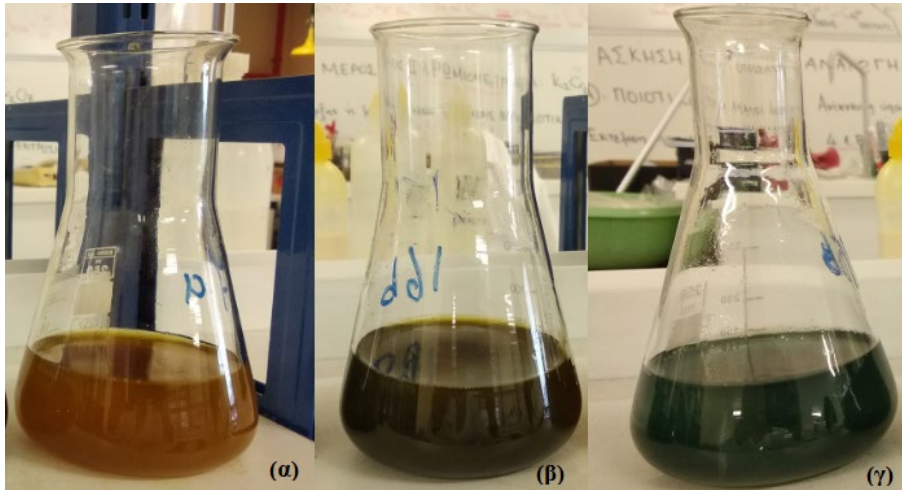
Για το πρότυπο διάλυμα διχρωμικού καλίου ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) 1.0 N, διαλύθηκαν 49.4 g στερεού  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  αναλυτικής καθαρότητας σε απεσταγμένο νερό και στη συνέχεια αραιώθηκαν σε ογκομετρική φιάλη ενός λίτρου (1L).

Για το διάλυμα εναμμώσιου θειϊκού σιδήρου ( $\text{FeSO}_4$ ) 0.50 N, διαλύθηκαν 196.1 g στερεού  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  μέσα σε 800 mL νερού το οποίο περιείχε 20 mL πυκνού  $\text{H}_2\text{SO}_4$  και στη συνέχεια αραιώθηκε σε ογκομετρική φιάλη ενός λίτρου (1L).

Τα δείγματα που επεξεργάστηκαν (THC1-THC12 & THS1 top- THS5 bot) είχαν υποστεί προετοιμασία η οποία περιλάμβανε τη ξήρανση και αποβολή της υγρασίας τους σε φούρνο στους 40 °C, μια σχετικά χαμηλή θερμοκρασία προκειμένου να μην υποστεί αλλοίωση η περιεκτικότητα οργανικού άνθρακα που εξετάζετε στη συγκεκριμένη μέθοδο στα δείγματα, για το χρονικό διάστημα των 2 ημερών και αφέθηκαν έως ότου έλθουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η διαδικασία προσδιορισμού του οργανικού άνθρακα στα δείγματα, ξεκίνησε με την ακριβή ζύγιση 0.5 g ξηραμένου ιζήματος, το οποίο μεταφέρθηκε σε κωνική φιάλη και του προστέθηκαν 10 mL διαλύματος διχρωμικού καλίου 1.0 N με τη χρήση σιφωνίου, ανακινώντας τη καλά προκειμένου να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη ανάδευση μεταξύ του αντιδραστήριου με το ιζήμα. Στη συνέχεια προστέθηκαν 20 mL πυκνού θειϊκού οξέος (με την ανάδευση να συνεχίζεται) και για να ολοκληρωθεί η αντίδραση, η φιάλη αφέθηκε για μισή ώρα στην άκρη. Έπειτα από αυτό το χρονικό διάστημα, προστέθηκαν 100 mL απεσταγμένο νερό, 10 mL  $\text{H}_3\text{PO}_4$  85% και 0.2 g NaF και 15 σταγόνες από το δείκτη, που στη συγκεκριμένη μέθοδο ως δείκτης χρησιμοποιήθηκε διάλυμα διφαινυλαμίνης. Η ογκομέτρηση του διαλύματος που παρασκευάστηκε, έγινε με διάλυμα δισθενούς σιδήρου κατά την προσθήκη του οποίου παρατηρήθηκε αλλαγή του χρώματος. Δηλαδή κατά τη διαδικασία της ογκομέτρησης, παρατηρήθηκε σταδιακή αλλαγή στο χρώμα, από πρασινοκαφέ που ήταν αρχικά, σε ανοικτό πράσινο και μετέπειτα σε γκρι-μπλε. Από αυτό το σημείο και έπειτα η ογκομέτρηση έγινε σταγόνα-σταγόνα μέχρι το χρώμα να αλλάξει απότομα σε λαμπερό πράσινο, όπου είναι και το τελικό σημείο.





**Εικόνα 2.13:** (α) Το διάλυμα που παρασκευάστηκε προτού τη προσθήκη του δείκτη διφαινυλαμίνης. (β) Το διάλυμα που παρασκευάστηκε έπειτα τη προσθήκη του δείκτη διφαινυλαμίνης (15 σταγόνες). (γ) Μετά το πέρας της ογκομέτρησης του διαλύματος που παρασκευάστηκε με διάλυμα δισθενούς σιδήρου.

Η σειρά των παραπάνω αναλύσεων, επαναλήφθηκε ακόμα μια φορά για καθένα από τα δείγματα, με σκοπό το τελικό αποτέλεσμα των συγκεντρώσεων του οργανικού άνθρακα να δοθεί από το μέσο όρο των δύο τιμών που λήφθηκαν για το κάθε δείγμα.

Πριν από τις αναλύσεις των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε ανάλυση του τυφλού δείγματος, επίσης εις διπλούν, η οποία αφορά την τιτλοδότηση του διαλύματος του δισθενούς σιδήρου με το πρότυπο διάλυμα διχρωμικού καλίου. Στη περίπτωση του τυφλού προσδιορισμού, η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ακριβώς η ίδια με εκείνη των δειγμάτων, η οποία περιγράφηκε παραπάνω, με τη μόνη διαφορά ότι στο τυφλό δεν προστίθεται ιζημα στην κωνική φιάλη με τα αντιδραστήρια, και η χρωματική αλλαγή που παρατηρείται στο τελικό σημείο να είναι περισσότερο εμφανής εδώ.

Ο υπολογισμός της % περιεκτικότητας του ιζήματος σε οργανικό άνθρακα υπολογίστηκε από τη σχέση (2.2):

$$\% \text{ οργανικός άνθρακας} = N * V * \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) * \frac{12}{4000} * \frac{100}{B_\xi} \quad (2.2)$$

όπου: V: ο όγκος του διαλύματος διχρωμικού καλίου που προστέθηκε, (mL)

N = η κανονικότητα του διαλύματος διχρωμικού καλίου

$V_1$  = ο όγκος του διαλύματος δισθενούς σιδήρου που καταναλώθηκε κατά τη διαδικασία της ογκομέτρησης του δείγματος, (mL)

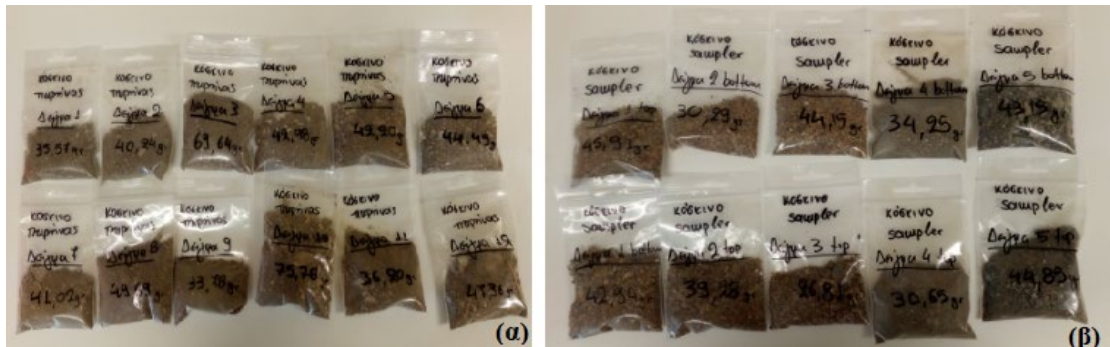
$V_2$  = ο όγκος του διαλύματος δισθενούς σιδήρου που καταναλώθηκε κατά τη διαδικασία της ογκομέτρησης του τυφλού, (mL)

$B_\xi$  = το διορθωμένο, ως προς την υπολειπόμενη υγρασία, ακριβές βάρος του δείγματος, (g)

12/4000 = το ισοδύναμο βάρος του άνθρακα σε meq (χιλιοστογραμμαμοϊσοδύναμο)

Οι διαδικασίες που περιγράφηκαν έως εδώ, δηλαδή της μακροσκοπικής περιγραφής, κοκκομετρικής ανάλυσης και του προσδιορισμού οργανικού άνθρακα, έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Χημείας του ΤΩΘΕ. Στη συνέχεια τα δείγματα (THS1-THS12 & THS1 top - THS5 bot) μεταφέρθηκαν από τη Μυτιλήνη στο ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., σφραγισμένα σε

σακουλάκια προκειμένου να πάρουν όσο το δυνατόν λιγότερη υγρασία, όπου διεξάχθηκε η δειγματοποίηση στο Εργαστήριο Ιζηματολογίας, και πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις των δειγμάτων με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας-γ, στον ανιχνευτή (High Purity Germanium) HPGe για εύρεση φυσικής ραδιενέργειας, και τον προσδιορισμό της σύστασης ως προς τα κύρια στοιχεία του ιζήματος με τη μέθοδο XRF.



**Εικόνα 2.14** Τα δείγματα του πυρίτη (α) και τα επιφανειακά δείγματα (β) που μεταφέρθηκαν από το εργαστήριο Χημείας του Τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλασσιών Βιοεπιστημών του Πανεπιστημίου Αιγαίου (Μυτιλήνη) στο ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (Αθήνα) για περεταίρω αναλύσεις. Τα δείγματα έχουν ήδη αποξηραθεί και υποστεί κοκκομετρική ανάλυση στη Μυτιλήνη.

Τα δείγματα (THS1-THS12 & THS1 top - THS5 bot) τα οποία μεταφέρθηκαν από τη Μυτιλήνη τοποθετήθηκαν σε αποστειρωμένα ποτήρια ζέσεως, για το χρονικό διάστημα 24 ωρών, στο φούρνο στους 60 °C ώστε να αποβληθεί η υγρασία τους. Την επόμενη μέρα (έπειτα από 24 ώρες) έπειτα από την απομάκρυνσή τους από τον φούρνο τοποθετήθηκαν κατευθείαν σε ξηραντήρα, προκειμένου να μην πάρουν υγρασία από το περιβάλλον, για μισή ώρα με σκοπό να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια ακολούθησε ζύγιση του κάθε δείγματος σε ζυγό ακριβείας και άμεση εναπόθεσή τους στο φούρνο για ακόμα 48 ώρες Έπειτα από το πέρας των 2 ημερών επαναλήφθηκε η παραπάνω διαδικασία, και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις δυο ζυγίσεις, ώστε να διαπιστωθεί αν είχε εξαλειφθεί πλήρως η υγρασία από αυτά (αποτελέσματα 2<sup>ης</sup> ζύγισης ≤ αποτελέσματα 1ης ζύγισης). Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε προκειμένου να προετοιμαστούν τα δείγματα για τις περεταίρω αναλύσεις που θα αναφερθούν παρακάτω (Ενότητα 2.6 και 2.7).

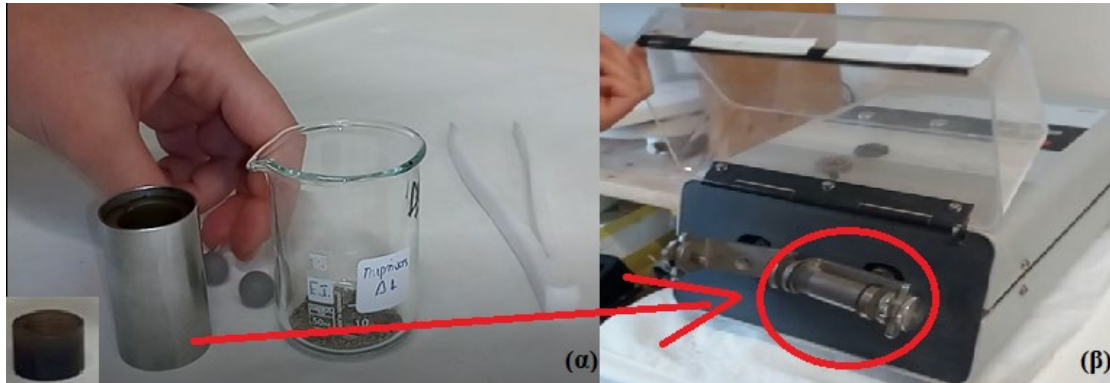
## 2.6 Η μέθοδος φθορισμού ακτίνων-Χ (XRF)

Από τις περισσότερο αναλυτικές και ευρέως διαδεδομένες πλέον ορυκτολογικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται για χημικές αναλύσεις (προσδιορισμός ιχνοστοιχείων και κύριων στοιχείων) στα ιζήματα είναι ο φθορισμός ακτίνων-Χ (XRF) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και στη παρούσα εργασία.

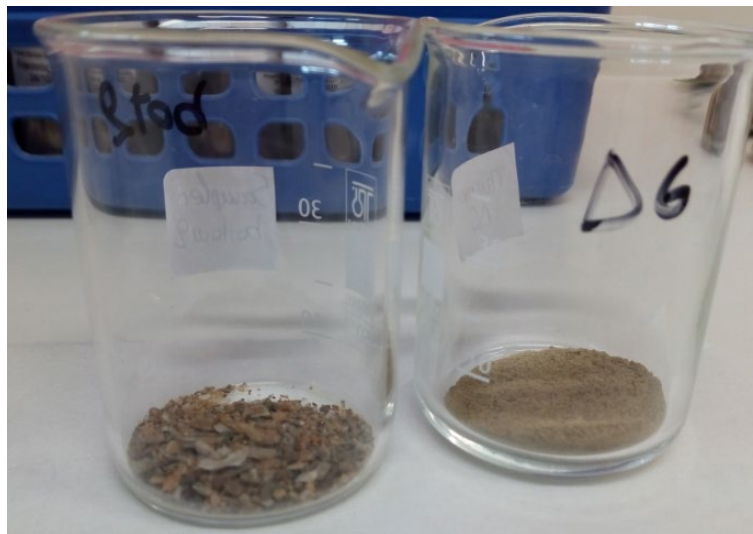
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός της σύστασης ως προς τα κύρια στοιχεία του ιζήματος των δειγμάτων με τη μέθοδο X-Ray Fluorescence system (XRF), η διαδικασία παρασκευής των δειγμάτων με σκοπό να μορφοποιηθούν σε συγκεκριμένη γεωμετρία, όπου η τελική μορφή θα πρέπει να είναι εκείνη συμπαγούς υαλώδους δισκίου, και να αναλυθούν μέσω της φασματοσκοπίας ακτίνων-Χ, αναφέρεται παρακάτω.

Αρχικά το δείγμα κονιορτοποιήθηκε με σκοπό τον θρυμματισμό των κόκκων και τη μείωση του μεγέθους τους για τη μετέπειτα παρασκευή υαλωδών δισκίων, σε ειδικό μικρό μύλο ο οποίος αποτελείται από ένα μικρό δοχείο με

καπάκι και 2 μπίλιες μέσα σε αυτό. Η διαδικασία τριψίματος ήταν η εξής: αρχικά μέσα στο δοχείο τοποθετήθηκαν με τη σειρά η μια μπίλια, ~ 2 g δείγματος, η 2η μπίλια, καπάκι και έπειτα το δοχείο σφραγίστηκε στο μηχάνημα όπου θα δονούνταν (δεξιά - αριστερά). Ορίστηκε ως χρόνος λειτουργίας τα 3 λεπτά περίπου, ο χρόνος ενδέχεται να είχε μικρές μεταβολές ανάλογα με το πόσο χονδρόκοκκο ήταν το δείγμα, με συχνότητα 24,1 Hz, έως ότου το δείγμα να πάρει τη μορφή πούδρας. Όλη η ποσότητα πούδρας που δημιουργήθηκε μεταφέρθηκε σε αποστειρωμένο ποτήρι ζέσεως, το οποίο έπειτα από τη ζύγισή του τοποθετήθηκε στον φούρνο για 1 μέρα ώστε να αποβληθεί η υγρασία και να ακολουθήσει η διαδικασία παρασκευής υαλωδών δισκίων.



**Εικόνα 2.15:** (α) Εξαρτήματα του μικρού μύλου (καπάκι, δοχείο, 2 μπίλιες) και ποτήρι ζέσεως με το δείγμα. (β) Μικρός μύλος έτοιμος να αλέσει το δείγμα το οποίο βρίσκεται μέσα στο δοχείο (κόκκινος κύκλος).



**Εικόνα 2.16:** Το δείγμα πριν και μετά (δεξιά και αριστερά αντίστοιχα) τη διαδικασία της άλεσης στο μικρό μύλο.

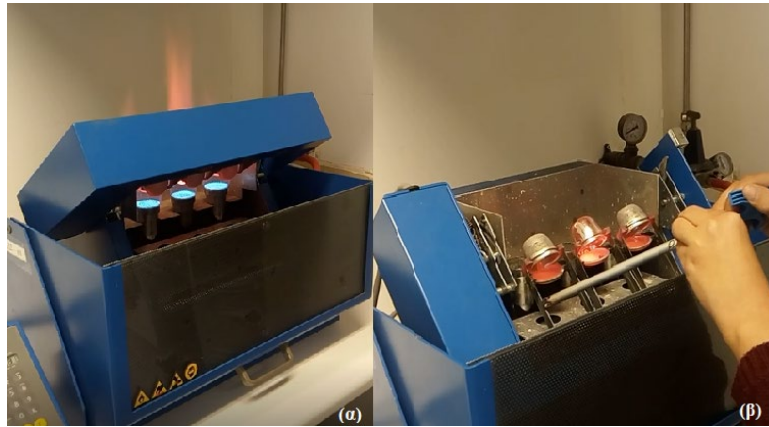
Η διαδικασία παρασκευής των υαλωδών δισκίων ξεκίνησε έπειτα από 24 ώρες, όπου τα δείγματα αφαιρέθηκαν από τον φούρνο και τοποθετήθηκαν άμεσα στον ξηραντήρα, για να μην επηρεαστούν από την υγρασία του περιβάλλοντος, όπου και αφέθηκαν για περίπου μισή ώρα ώστε να έρθουν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος ώστε στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί ακριβής ζύγιση των δειγμάτων ελαχιστοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερο την επίδραση της υγρασίας σε αυτά.



Εικόνα 2.17: Ξηραντήρας, τα δείγματα έπειτα από την ακριβή ζύγιση και ο ζυγός ακριβείας που χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχα.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε ζυγό ακριβείας με σφάλμα  $\pm 0,0002$  g αποστειρωμένο ποτήρι ζέσεως (βρισκόταν στον φούρνο και αφέθηκε έως ότου έρθει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος), το οποίο μηδενίστηκε και σε αυτό έγινε ακριβής προσθήκη 5.5 g αντιδραστηρίου Lithium Tetraborate ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), 0.5 g Lithium Carbonate ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), 0.5 g Ammonium Nitrate και 0.5 g δείγματος πούδρας που παρασκευάστηκε παραπάνω. Όλα αυτά μαζί αναδεύτηκαν καλά με την σπάτουλα για να ομογενοποιηθούν.

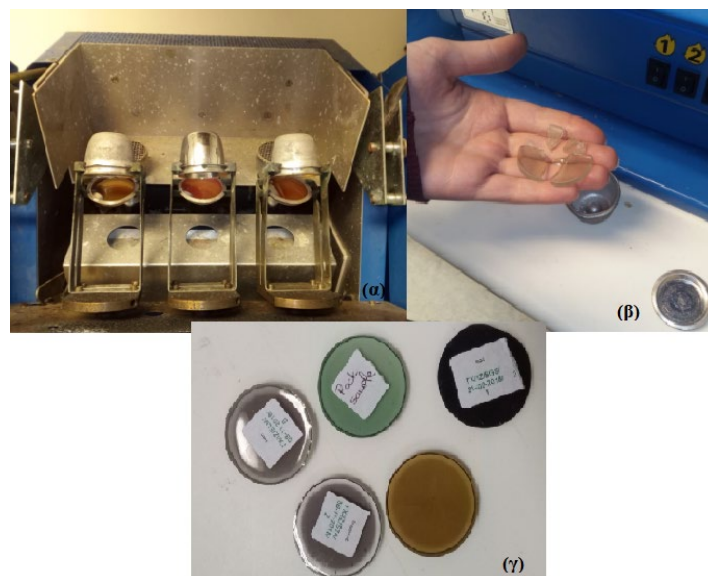
Αργότερα, το ομογενοποιημένο δείγμα μεταφέρθηκε από το ποτήρι ζέσεως σε ένα από τα τρία πλατινένια δοχεία, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και γρήγορη ανάκτηση αρχικής θερμοκρασίας του μηχανήματος σύντηξης, με μεγάλη προσοχή με τη χρήση πινέλου ώστε το ποτήρι να καθαριστεί καλά και να μην υπάρξει απώλεια υλικού καθώς δόθηκε μεγάλο βάρος στην ακρίβεια των ζυγίσεων. Εδώ χρειάζεται να αναφερθεί ότι τα δείγματα επεξεργάζονταν ανά τριάδες με προσοχή ώστε να μην μπερδεύεται η σειρά τους, εφόσον και το μηχάνημα διέθετε τρία πλατινένια δοχεία. Έπειτα σε καθένα από τα πλατινένια δοχεία που εμπεριείχαν τα ομογενοποιημένα δείγματα, προστέθηκαν 4-5 σταγόνες βρωμιούχου λιθίου και τα πλατινένια δοχεία με τα καπάκια που αντιστοιχούσαν στο καθένα, τοποθετήθηκαν με συγκεκριμένη σειρά στο μηχάνημα, με προσοχή ώστε να είναι σωστά τοποθετημένα στις εγκοπές του μηχανήματος, και με τη σειρά των δειγμάτων να είναι από αριστερά προς τα δεξιά. Όταν τέθηκε σε λειτουργία το μηχάνημα ξεκίνησε η καύση του μείγματος και έπειτα από 20 περίπου λεπτά ανάδευσης σε υψηλή θερμοκρασία ( $1000^\circ\text{C}$ ) τα δείγματα πήραν παχύρρευστη μορφή. Όταν ολοκληρώθηκε η διαδικασία ανάδευσης το υλικό "έπεσε" στα καπάκια των δοχείων, ώστε το υγρό δείγμα να απλωθεί σωστά και να γεμίσει το εκάστοτε καπάκι σε όλη την επιφάνειά του με την βοήθεια του χειριστή, όπου αυτή ήταν αναγκαία.



**Εικόνα 2.18:** (α) Μηχάνημα σύντηξης σε λειτουργία κατά την παρασκευή υαλωδών δισκίων. (β) Τέλος ανάδευσης στο μηχάνημα σύντηξης και τοποθέτηση υγρού δείγματος στα καπάκια των δοχείων, ώστε να πάρει τη μορφή υάλου, με τη βοήθεια του χειριστή.

Έπειτα από πολύ λίγα λεπτά, που το δείγμα είχε πια κρυώσει έχοντας πάρει τη σύσταση και μορφή υάλου, απομακρύνθηκε από το καπάκι με την χρήση ενός αυτοκόλλητου πάνω στο οποίο καταγράφονταν τα στοιχεία του δείγματος. Η αφαίρεση του γυαλιού έγινε με ιδιαίτερη προσοχή, κρατώντας το από τα πλάγια διότι στη περίπτωση επαφής με την επιφάνεια θα προκαλούνταν προβλήματα στις περαιτέρω αναλύσεις του. Το κάθε «γυαλάκι» που παράχθηκε τοποθετήθηκε σε κατάλληλη θήκη ώστε να μπορέσει να γίνει εύκολα η συλλογική μεταφορά των δειγμάτων συλλογικά.

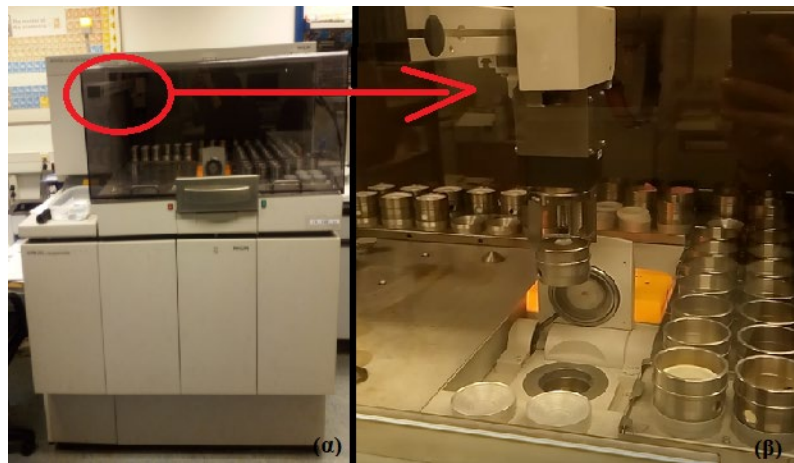
Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι στη περίπτωση όπου το υγρό δείγμα δεν γέμιζε σωστά το καπάκι ή στην περίπτωση που το δείγμα έσπαγε ή προκαλούνταν ρωγμές κατά το κρύωμα ακολουθούσε η επανατοποθέτησή του στο πλατινένιο δοχείο μαζί με 4-5 σταγόνες βρωμιούχου λιθίου και η επεξεργασία του στην επόμενη παρτίδα δειγμάτων. Η διαδικασία αυτή, της επανατοποθέτησης του ήδη μια φορά επεξεργασμένου δείγματος μπορούσε να γίνει το πολύ 3 φορές και αν δεν πετύχαινε καμία από αυτές η διαδικασία παρασκευής υαλωδών δισκίων επαναλαμβανόταν από την αρχή.



**Εικόνα 2.19:** (α) Περίπτωση υγρών δειγμάτων τα οποία δεν έχουν καταλάβει ολόκληρη την επιφάνεια του καπακιού ώστε να σχηματιστούν «γυαλάκια» κατάλληλα για μετέπειτα μέτρηση, με αποτέλεσμα να χρειαστεί επανάληψη της διαδικασίας για αυτά. (β) Περίπτωση δείγματος το οποίο έσπασε κατά τη διάρκεια μετάβασης από υγρή κατάσταση σε στερεή, καθιστώντας το ακατάλληλο για προσδιορισμό των κύριων στοιχείων με τη μέθοδο XRF. (γ) Παραδείγματα δειγμάτων τα οποία είναι έτοιμα για ανάλυση με τη μέθοδο XRF.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για όλη τη σειρά δειγμάτων (THC1-THC12 & THS1 top - THS5 bot) και όταν αυτά ήταν πλέον ορθά παρασκευασμένα και χωρίς ρωγμές, τότε το κάθε δείγμα (μορφή γυαλιού) ήταν έτοιμο για ανάλυση και η επεξεργασία ολοκληρώθηκε με την τοποθέτηση των δειγμάτων στο εργαστήριο του ΕΛΚΕΘΕ, όπου πραγματοποιήθηκε και η μέτρησή τους. Με μια πρώτη ματιά στα γυαλάκια που παρασκευάστηκαν, υπήρχε μια πρώτη ιδέα για το τί αποτελέσματα αναμένονταν, όπως για παράδειγμα στην Εικόνα 2.17 (γ) η διαβάθμιση χρωμάτων που υπάρχει αναμεταξύ τους φανερώνει ότι τα πιο σκουρόχρωμα γυαλάκια έχουν μεγαλύτερα ποσοστά οργανικού άνθρακα απ' ότι τα ανοιχτόχρωμα. Στη περίπτωση των δειγμάτων μας, το ανοιχτό χρώμα που έχουν φανερώνει ότι δεν είναι πλούσια σε οργανικό άνθρακα.

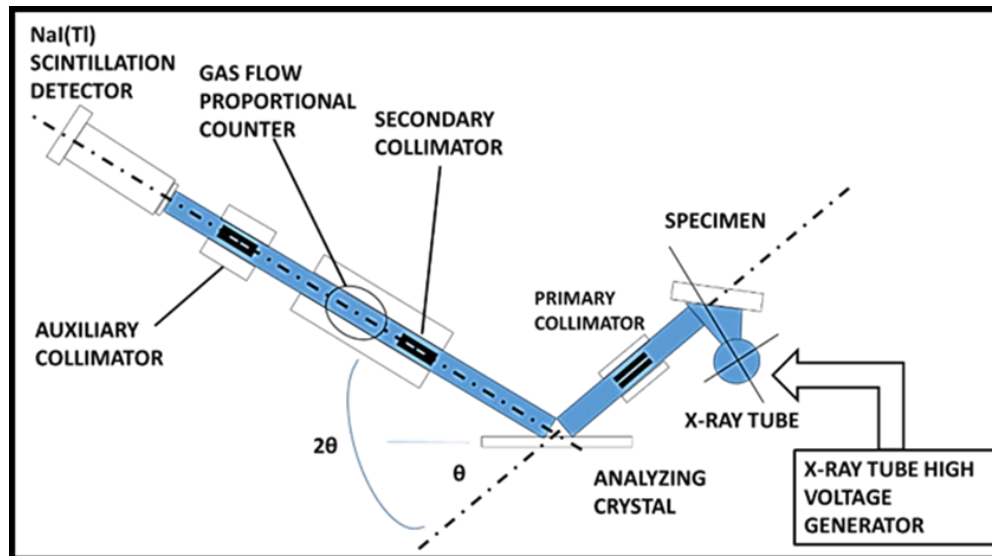
Ο προσδιορισμός και η ποσότητα (σε ppm) των κύριων στοιχείων που περιέχονται στα δείγματα αποτελεί σκοπό της ανάλυσης αυτών (δειγμάτων) μέσω της φασματοσκοπίας ακτίνων-Χ.



**Εικόνα 2.20:** (α) Φασματόμετρο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των κύριων στοιχείων στη παρούσα εργασία. (β) Φασματόμετρο το οποίο βρίσκεται σε λειτουργία και αλλάζει το δείγμα που αναλύεται με το επόμενο στη σειρά (τα γυαλάκια βρίσκονται μέσα στα δοχεία).

Η φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων-Χ χαρακτηρίζεται ως μέθοδος ταχείας πολυστοιχειακής ανάλυσης και η ανίχνευση των στοιχείων που πραγματοποιείται, βασίζεται στη διέγερση των ατόμων του υλικού-δείγματος έχοντας ως αποτέλεσμα την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-Χ από τα στοιχεία του, με το ανιχνευτικό σύστημα να μετατρέπει σε μετρήσιμους ηλεκτρικούς παλμούς την ενέργεια των φωτονίων. Η μέτρηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα ένα φάσμα στο οποίο φαίνονται όλα τα στοιχεία που ανιχνεύονται στο δείγμα. Μέσω σχετικών μετρήσεων από την ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και χρήσης δειγμάτων αναφοράς, επιτυγχάνεται η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Ο προσδιορισμός λοιπόν των στοιχείων και το ποσοστό του καθενός από αυτά πραγματοποιείται από την ανάλυση του φάσματος.

Ο τύπος φασματόμετρου του οποίου έγινε χρήση σε αυτή την εργασία ήταν PW-2400 της Phillips (Εικόνα 2.1) με υλικό ανόδου το ρόδιο (γενικά ως υλικά ανόδου είναι της λυχνίας είναι τα Cr, Rh, Mo) και η μέτρηση των κύριων στοιχείων μέσω της ανάλυσης των φασμάτων ακτίνων-Χ, εκτελείται αυτόματα με το λογισμικό Pro Trace, Panalytical.



Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος XRF. Φαίνεται ο ανοδικός σωλήνας παραγωγής ακτίνων X, ο χώρος τοποθέτησης του δείγματος, ο κρύσταλλος περίθλασης, οι διόπτρες οδήγησης των φωτονίων X και το ανιχνευτικό σύστημα.

### 2.6.1 Μέθοδος LOI

Η διαδικασία LOI (loss on ignition) αφορά μια δοκιμή η οποία χρησιμοποιείται στην ανόργανη αναλυτική χημεία και ιδιαίτερα στην ανάλυση των ορυκτών και τη χημική σύνθεση του εδάφους. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται μέσω της υψηλής θέρμανσης (της ανάφλεξης) των δειγμάτων σε συγκεκριμένη θερμοκρασία με σκοπό την απομάκρυνση των πτητικών ουσιών έως ότου η μάζα τους σταματήσει να αλλάζει, εξαιτίας της εξάτμισης των ουσιών αυτών. Για τη διαδικασία αυτή μερικά μόνο γραμμάρια δείγματος είναι αρκετά ενώ τόσο ο χρόνος, όσο και η θερμοκρασία του μηχανήματος που θα πραγματοποιηθεί η διαδικασία (πυριαντήριο) αποτελούν ελεγχόμενες παραμέτρους. Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη περιγράφεται παρακάτω.

Τα δείγματα πούδρας που παρασκευάστηκαν αφαιρέθηκαν από τον φούρνο όπου βρίσκονταν και τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα προκειμένου να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου, χωρίς να επηρεαστούν από την υγρασία του περιβάλλοντος. Στη συνέχεια σε ζυγό ακριβείας ζυγίστηκαν τα βάρη αριθμημένων πήλινων χωνευτηρίων και αφού καταγράφηκαν, προστέθηκε περίπου 1 g πούδρας σε καθένα από τα χωνευτήρια που βρισκόταν πάνω στο ζυγό κάθε φορά ενώ ταυτόχρονα καταγραφόταν το συνολικό βάρος. Όντας όλα τα δείγματα σε αντίστοιχα χωνευτήρια, τα οποία είναι κατασκευασμένα να αντέχουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, μεταφέρθηκαν και τοποθετήθηκαν στο πυριαντήριο του Εργαστηρίου Ιζηματολογίας του ΕΛ. ΚΕ.Θ.Ε., το οποίο ρυθμίστηκε σε θερμοκρασία 1000 °C για το χρονικό διάστημα των 4 ωρών. Μετά το πέρας των 4 ωρών, τα δείγματα δεν ήταν εφικτό να απομακρυνθούν από το πυριαντήριο λόγω υψηλής θερμοκρασίας στην οποία είχε ρυθμιστεί το μηχάνημα, με αποτέλεσμα να αφεθούν μέσα και να απομακρυνθούν την επόμενη μέρα. Το τελικό στάδιο ήταν τα δείγματα να τοποθετηθούν στον ξηραντήρα κατευθείαν μετά το πυριαντήριο έως ότου αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου, ενώ στη συνέχεια ζυγίστηκαν σε ζυγό ακριβείας με σκοπό να βρεθεί πιθανή διαφορά πριν και μετά την τοποθέτησή τους στο πυριαντήριο.



Εικόνα 2.21: (α) Το πυριαντήριο σε λειτουργία. (β) Τα υπό εξέταση δείγματα μέσα στα χωνευτήρια έπειτα από την επεξεργασία τους στο πυριαντήριο.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε πριν την εξέταση των υαλωδών δισκίων με τη μέθοδο XRF. Σκοπός της ήταν η πλήρης απομάκρυνση των πτητικών ουσιών που εμπεριέχονταν στα υπό εξέταση δείγματα, ώστε στη συνέχεια να υπάρξει ως επιβεβαίωση ότι η ανάλυση που διεξήχθη (αργότερα) στα γυαλάκια ήταν πράγματι ορθή. Η επιβεβαίωση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι κατά τη διαδικασία παρασκευής υαλωδών δισκίων πραγματοποιείται καύση του ιζήματος στο μηχάνημα σύντηξης, κατά την οποία επίσης επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των πτητικών ουσιών. Στο “καινούριο” λοιπόν υλικό που προκύπτει (γυαλάκια) μετρώνται κάποια γεγονότα (κάποιες καμπύλες βαθμονόμησης) τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες συγκεντρώσεις (ppm). Προκειμένου να γίνει επιβεβαίωση για το αν η διαδικασία της καύσης πραγματοποιήθηκε σωστά, απαιτείται το άθροισμα μεταξύ των υλικών απ’ όλα τα στοιχεία που μετρώνται στο ίζημα (ppm) και των πτητικών υλικών να ισούται με μονάδα.

Όσον αφορά τα δείγματα που μελετώνται στην παρούσα εργασία, το αποτέλεσμα που δίνει το προαναφερόμενο άθροισμα, σε κάθε περίπτωση, είναι μεγαλύτερο από 0.99, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σωστή διεξαγωγή της διαδικασίας παρασκευής αλλά και των μετέπειτα μετρήσεων των στοιχείων στα υαλώδη δισκία.

## 2.7 Επεξεργασία δειγμάτων για μέτρηση ραδιενέργειας

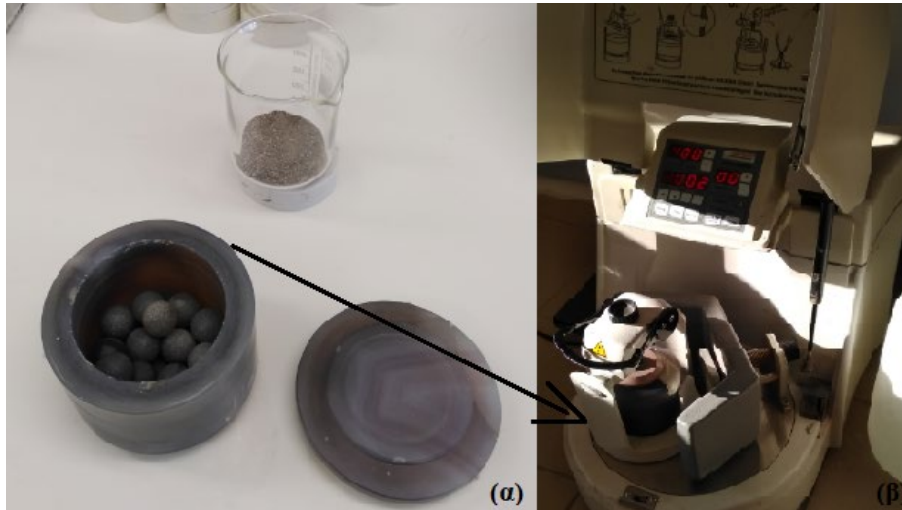
Η βέλτιστη προσομοίωση των δειγμάτων με τη πυκνότητα, το πορώδες, τη γεωμετρία κ. α. της πρότυπης πηγής η οποία χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή (ενότητα 2.8), είναι ο κύριος σκοπός της επεξεργασίας των δειγμάτων.

Ο ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (High Purity Germanium, HPGe) αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους ανιχνευτές στερεάς κατάστασης. Τα δείγματα μετρήθηκαν με τη χρήση φασματοσκοπίας  $\gamma$  από τον ανιχνευτή Ge (γερμανίου) υψηλής καθαρότητας (HPGe – High Purity Germanium) ο οποίος κατατάσσεται στη κατηγορία των ανιχνευτών ημιαγωγών και βρίσκεται σε εργαστήριο του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ..

Η διαδικασία παρασκευής των δειγμάτων προκειμένου να πάρουν την απαιτούμενη, για τη διεξαγωγή της μελέτης, μορφή της πούδρας και να μετρηθούν περιγράφεται παρακάτω.



Τα δείγματα έπειτα από τον φούρνο όπου βρίσκονταν προκειμένου να αποφύγουν την υγρασία περιβάλλοντος, τοποθετήθηκαν στο ξηραντήρα μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου και έπειτα ένα - ένα ξεχωριστά στο μεγάλο μύλο ώστε να κονιορτοποιηθούν παίρνοντας έτσι τη μορφή πούδρας. Στον μεγάλο μύλο τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη παρασκευή πούδρας ήταν τα εξής: αρχικά το εκάστοτε ίζημα αδειάζετε σε δοχείο το οποίο περιέχει 12 μπίλιες και σφραγίζεται με το καπάκι του (και τα τρία αυτά εξαρτήματα αποτελούνται από αχάτη, υλικό πολύ ανθεκτικό στις επιμολύνσεις των δειγμάτων και στα γδαρσίματα). Έπειτα από τη σφράγιση το δοχείο τοποθετήθηκε στο μύλο με προσοχή και ρυθμίστηκε στις 400 στροφές (rpm) για 2 λεπτά.



**Εικόνα 2.22:** (α) Εξαρτήματα του μεγάλου μύλου (καπάκι, δοχείο, 12 μπίλιες) και ποτήρι ζέσεως με το δείγμα. (β) Μεγάλος μύλος έτοιμος να αλέσει το δείγμα το οποίο θρίσκεται μέσα στο δοχείο.

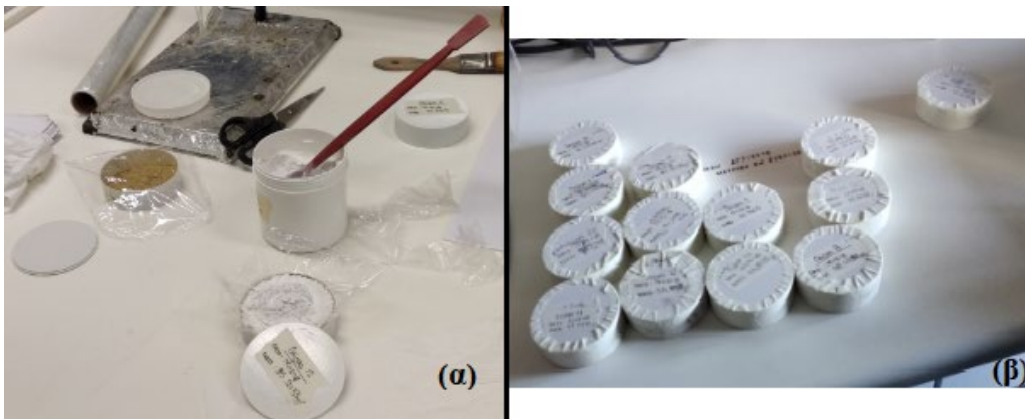
Το κονιορτοποιημένο υλικό που προέκυψε, τοποθετήθηκε μέσα σε ειδικά πλαστικά κουτιά κυλινδρικής γεωμετρίας με διάμετρος 7 cm, ύψος 2 cm, πάχος κουτιού 1mm. Το κάθε κουτί είχε από μια χαρτοταινία το επάνω μέρος, στην οποία καταγράφηκαν τα στοιχεία του δείγματος που θα περιείχε (το όνομα της περιοχής δειγματοληψίας και η καθαρή του μάζα (g)). Προκειμένου να υπάρξει πλήρης καταγραφή των βασικών στοιχείων των δειγμάτων κατά τη δειγματοποίηση, στο καθένα από τα κουτιά ζυγίστηκε σε ζυγό ακριβείας και καταγράφηκε το βάρος του, μετά μηδενίστηκε ο ζυγός με το κουτί πάνω και έγινε προσεκτική τοποθέτηση πουδραρισμένου ιζήματος μέσα στο κουτί για την ζύγιση και καταγραφή του βάρους του, έπειτα πάλι μηδενίστηκε ο ζυγός και τοποθετήθηκε το καπάκι για την ζύγιση και καταγραφή του βάρους του επίσης (το κάθε καπάκι αντιστοιχούσε σε μια μόνο μέτρηση οπότε δεν έπρεπε να μπερδευτούν τα καπάκια μεταξύ των δειγμάτων). Να σημειωθεί βέβαια ότι όλα τα δοχεία και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της δειγματοποίησης καθαρίζονταν και πλένονταν με μεγάλη προσοχή, με απιονισμένο νερό, ώστε να μην υπάρχουν υπολείμματα άλλων δειγμάτων σε κάθε κουτί, και αποφυγή κάθε πιθανής επιμόλυνσης.

Στη περίπτωση που η ποσότητα του δείγματος δεν ήταν επαρκής για να γεμίσει πλήρως το κουτί, συμπληρώθηκε αδρανές υλικό παρόμοιας σύστασης και πυκνότητας (ταλκ) έως τη πλήρωσή του. Η τοποθέτηση του ταλκ έγινε με την χρήση διάφανης μεμβράνης ώστε να αποφευχθεί η ανάμειξη των δύο υλικών. Όταν διαπιστώθηκε ότι το κουτί έχει γεμίσει πλήρως και δεν υπάρχουν άλλα κενά, το καπάκι σφραγίστηκε προσεκτικά και ζυγίστηκε εκ νέου. Εφόσον

καταγράφηκε και το ολικό βάρος του εκάστοτε δείγματος (κουτί, ίζημα, καπάκι, ταλκ), το κλειστό κουτί με το πληρωμένο δείγμα και ταλκ σφραγίστηκε προσεκτικά με χαρτοταινία, έτσι ώστε κατά τη διαδικασία μέτρησης της ραδιενέργειας να μην υπάρξει πιθανότητα απελευθέρωσης ραδιενεργών αερίων.

Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για όλα τα δείγματα (THC1-THC12 & THS1 top - THS5 bot) και τα δείγματα για 21 μέρες τουλάχιστον παρέμειναν αεροστεγώς σφραγισμένα έως ότου μετρηθούν, προκειμένου να επέλθει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ των ισότοπων του ραδίου ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ) και των θυγατρικών τους προϊόντων στο δείγμα (μεταξύ των ραδιονουκλιδίων  $^{214}\text{Pb}$  και  $^{214}\text{Bi}$ ) (Garcia-Orellana et al., 2009).

Το τελικό δείγμα που κατασκευάστηκε αποτελούνταν μόνο από ταλκ και μετρίοταν αρκετές φορές στον ανιχνευτή ενδιάμεσα από τις μετρήσεις των δειγμάτων (THC1-THC12 & THS1 top - THS5 bot) ανά χρονικά διαστήματα εβδομάδων με τις μετρήσεις αυτές να αντιστοιχούν σε ενεργότητες υποβάθρου για όλα τα ισότοπα που περιέχονται στα δείγματα και βοηθούσαν στη μετέπειτα ανάλυση δειγμάτων που πραγματοποιούνταν.



**Εικόνα 2.23:** (α) Συμπλήρωση δειγμάτων των οποίων το υλικό δεν ήταν επαρκές για να γεμίσει πλήρως το κουτί, με αδρανές υλικό παρόμοιας σύστασης και πυκνότητας (ταλκ) έως τη πλήρωσή του. (β) Σφραγισμένα δείγματα τα οποία είναι πλήρη (με σκέτο δείγμα όπου αυτό ήταν αρκετό ή με δείγμα και ταλκ όπου ήταν αναγκαίο για τη πλήρωση του κουτιού) και έτοιμα για τη διαδικασία μέτρησης της ραδιενέργειας.

Η διαδικασία μέτρησης των δειγμάτων από τον ανιχνευτή HPGe πραγματοποιείται τοποθετώντας αυτά στον ανιχνευτή και στη συνέχεια το κάλυμμά του, ο οποίος ανιχνευτής είναι τοποθετημένος κατακόρυφα με όλη τη περιοχή του δείγματος και του κρυστάλλου ανιχνευτή να περιβάλλεται από θωράκιση μολύβδου, διότι με αυτό το τρόπο η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το υπόβαθρο του περιβάλλοντος του εργαστηρίου δεν επηρεάζει πλέον τη μέτρηση.



**Εικόνα 2.24:** Ο ανιχνευτής ο οποίος περιβάλλεται από θωράκιση μολύβδου, με το υπό εξέταση δείγμα στο κέντρο, έτοιμος για τη λήψη μετρήσεων μόλις τοποθετηθεί το κάλυμμά του.

## 2.8 Μετρητικό Σύστημα

Το ανιχνευτικό σύστημα του ανιχνευτή Γερμανίου (HP-Ge Detector), μέσω του οποίου έλαβαν χώρα οι μετρήσεις των δειγμάτων πούδρας που παρασκευάστηκαν όπως προαναφέρθηκε, χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα όντας έτσι δυνατή η ανάλυση φασμάτων τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλές ενέργειες μέχρι και ορισμένα keV. Εξαιτίας του ότι τα υπό μελέτη δείγματα της παρούσας εργασίας χαρακτηρίζονται από ισότοπα χαμηλής συγκέντρωσης, η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρείται πολύ καλή επιλογή, εφόσον η ικανότητα ανίχνευσης φωτονίων είναι αναγκαίο να ξεκινάει από αρκετά χαμηλή τιμή, της τάξης των 30 keV και πάνω. Στη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτικού αυτού συστήματος, οφείλεται ο διαχωρισμός των ενεργειακών κορυφών ο οποίος είναι αναγκαίος, διότι σε αυτές αντιστοιχούν τα ισότοπα που καταγράφονται και υπόκεινται σε επιπλέον διαδικασία και ανάλυση.

Η ανιχνευτική συσκευή της οποίας έγινε χρήση ήταν HPGe της εταιρίας ORTEC, με τον τύπο του ανιχνευτή να είναι GEM-FX8530, και χαρακτηρίζεται από πολύ λεπτό παράθυρο από ανθρακονήματα ώστε να έχει τη δυνατότητα το σύστημα να μετρά στις χαμηλές ενέργειες φωτονίων. Κάποια βασικά γνωρίσματα που καθιστούν κατάλληλο το συγκεκριμένο σύστημα ανίχνευσης για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας είναι πρώτον η δυνατότητα ανίχνευσης ακτίνων  $\gamma$  ξεκινώντας από τη τιμή των 10 keV και άνω, και δεύτερον χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση στην ενεργειακή περιοχή 100-1000 keV, εντός της οποίας συμπεριλαμβάνονται οι ενεργειακές κορυφές των ισωτόπων που μας ενδιαφέρουν για ανάλυση.

Η πειραματική διάταξη της οποίας έγινε χρήση προκειμένου να διεξαχθεί η συγκεκριμένη έρευνα απαρτίζεται από τα εξής μέρη:

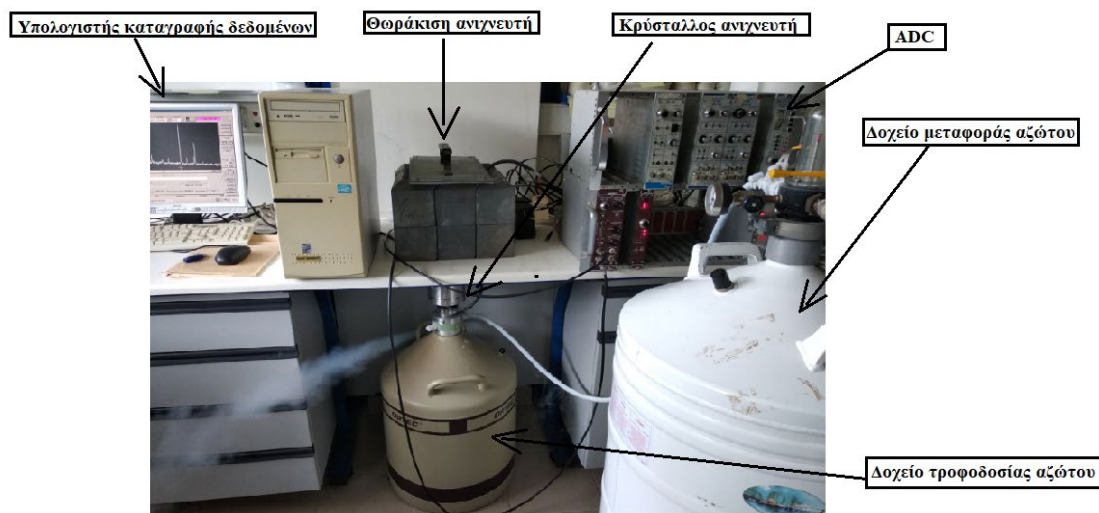
- Τον ανιχνευτή ημιαγωγού HPGe μέσω του οποίου ανιχνεύεται η ακτινοβολία- $\gamma$ .
- Τον προενισχυτή, ο οποίος βρίσκεται μέσα στη συσκευή ανίχνευσης και με σκοπό να επιτευχθεί η όσο γίνεται μικρότερη υποβάθμιση της λειτουργίας του συστήματος, είναι αναγκαίο να τοποθετείται όσο το δυνατόν

πλησιέστερα στον ανιχνευτή. Η τάση τροφοδοσίας του προενισχυτή αντιστοιχεί στα 12V και προκειμένου να περιορισθούν οι απώλειες κατά τη μεταφορά του σήματος, αυτός ενισχύει τον παλμό που βρίσκεται σε ισχύ.

- Τον ενισχυτή, του οποίου η χρήση είναι να βοηθάει στην ενίσχυση και μορφοποίηση των παλμών, προκειμένου να γίνει βελτίωση στον λόγο μεταξύ του σήματος προς τον θόρυβο.
- Τον ADC (Analog to Digital Converter), δηλαδή μετατροπέας με στόχο τη μετατροπή του αναλογικού σήματος, το οποίο δέχεται από τον ενισχυτή σε ψηφιακά δεδομένα με αποτέλεσμα τη μετατροπή της πληροφορίας από αναλογική σε ψηφιακή.
- Τον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του οποίου η πληροφορία συλλέγεται και παρουσιάζεται με ανάλυση φάσματος ώστε συνεχιστεί η περαιτέρω ανάλυση από τον εκάστοτε χρήστη.

Στον ανιχνευτή, κάθε 2 ημέρες περίπου, του χορηγείται υγρό άζωτο ώστε να λειτουργήσει σε συνθήκες ελαχίστου ρεύματος διαρροής (leakage current), με τη συχνότητα των δυο ημερών να μην είναι σε κάθε περίπτωση η ίδια, αλλά να εξαρτάται από τη χωρητικότητα του δοχείου αζώτου που εφαρμόζεται στην ανιχνευτική συσκευή. Στη περίπτωση που δεν πραγματοποιούνταν ψύξη στον ανιχνευτή, εξαιτίας της μεγάλης κινητικότητας που αποκτούν οι φορείς, λόγω της υψηλής ανάστροφης τάσης (4,8 kV) που εφαρμόζεται με σκοπό τη καλύτερη συλλογή φορτίου στον κρύσταλλο, θα επερχόταν αύξηση της θερμοκρασίας του κρυστάλλου, με αποτέλεσμα τη καταστροφή του στο μέλλον.

Για να μειωθεί ο θόρυβος από την ακτινοβολία υποβάθρου στον περιβάλλοντα χώρο, τοποθετήθηκε θωράκιση στον ανιχνευτή η οποία αποτελούνταν από τούβλα από Μόλυβδο γύρω από το παράθυρο του ανιχνευτή. Στο εργαστήριο το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, εκτός από τη κοσμική ακτινοβολία και τη φυσική ραδιενέργεια από το περιβάλλον, υπάρχει υψηλή συνεισφορά από τα οικοδομικά υλικά που κατασκευάζονται τα κτήρια όπως για παράδειγμα είναι το βηρύλλιο κ.ά., γεγονός το οποίο προσπαθήσαμε να το εξαλείψουμε όσο το δυνατόν περισσότερο μέσω των δειγμάτων ταλκ που αντιστοιχούσαν στο υπόβαθρο και την καθαρή ραδιενέργεια που υπήρχε στον χώρο και μόνο, το οποίο αφαιρούνταν από τις συνολικές μετρήσεις των δειγμάτων.



Εικόνα 2.25: Η πειραματική ανιχνευτική διάταξη φασματοσκοπίας  $\gamma$  του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., στην οποία μετρήθηκαν τα δείγματα του Κόλπου Γέρας.

Η καθαρότητα που χαρακτηρίζει τον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) είναι ικανοποιητική, ενώ πλησιάζει συνθήκες και ιδιότητες ακόμα και θεωρητικά πραγματικού ενδογενούς (καθαρού) ημιαγωγίμου Ge. Ο ανιχνευτής HPGe χαρακτηρίζεται από σειρά πλεονεκτημάτων με κύριο από αυτά να είναι το γεγονός ότι έχει τη δυνατότητα να φυλάσσεται σε θερμοκρασία δωματίου με την προϋπόθεση πως όταν βρίσκεται σε λειτουργία είναι απαραίτητο να ψύχεται ο κρύσταλλος σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με μέσω της χρήσης υγρού αζώτου, εξαιτίας του ότι τα ηλεκτρόνια υπόκεινται σε θερμική διέγερση. Ακόμα ένα πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι πέρα από ικανοποιητική διακριτική ικανότητα, παρουσιάζει και λογική απόδοση για ακτίνες  $\gamma$  ή ακτινοβολία σωματιδίων υψηλής ενέργειας, με ορισμένους ενδογενείς ανιχνευτές HPGe να εμφανίζουν πολύ μεγάλες αποτελεσματικότητες, δηλαδή οι ποσοστιαίες, ή αλλιώς οι σχετικές, αποδόσεις να είναι υψηλότερες από 100%. Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται και οι χαμηλοί νεκροί χρόνοι οι οποίοι έχουν όλοι οι ημιαγωγάμοι ανιχνευτές με αποτέλεσμα να μην είναι ευαίσθητοι στα μαγνητικά πεδία. Το υψηλό κόστος παραγωγής σε συνδυασμό με την ανάγκη για ψύξη και χρήση του ανιχνευτή HPGe αποτελούν τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα τους, κυρίως σε περιπτώσεις επιτόπιων μετρήσεων (in situ), εφόσον τέτοιου είδους μετρήσεις είναι δύσκολο να λάβουν χώρα εξαιτίας της ανάγκης για υγρό άζωτο.

## 2.9 Βαθμονόμηση του ανιχνευτή HPGe

Προτού γίνει η μέτρηση των δειγμάτων, πραγματοποιήθηκε μια σειρά βαθμονομήσεων (Ενότητα 2.9.1-2.9.3) με σκοπό την ορθή διεξαγωγή αποτελεσμάτων, η οποία περιλάμβανε (**α**) την ενεργειακή βαθμονόμηση της πειραματικής διάταξης, δηλαδή η ορθή αντιστοίχιση ενέργειας ακτίνων  $\gamma$  και καναλιών, (**β**) τη βαθμονόμηση της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας (FWHM), δηλαδή την ικανότητα που έχει ο ανιχνευτής να ξεχωρίσει δύο κοντινές κορυφές ακτίνων-  $\gamma$ , και τέλος (**γ**) τη βαθμονόμηση της απόδοσης του ανιχνευτή HPGe, δηλαδή την μετατροπή του αριθμού των ακτίνων  $\gamma$ , που ανιχνεύονται σε κάθε φωτοκορυφή, σε συγκέντρωση ενεργότητας του αντίστοιχου ραδιονουκλιδίου όντας έτσι απόλυτη η απόδοση της εκάστοτε φωτοκορυφής στα υπό ανάλυση δείγματα. Οι τιμές οι οποίες προκύπτουν, αποτελούν ενδογενές χαρακτηριστικό του ανιχνευτή HPGe ενώ είναι απαραίτητες όσον αφορά την αριθμητική επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα δείγματα που εξετάζονται στη παρούσα εργασία. Έπειτα από τις βαθμονομήσεις, η πειραματική διάταξη καθίσταται έτοιμη για τις επακόλουθες μετρήσεις των δειγμάτων με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων να καθορίζεται από τις αβεβαιότητες αυτών των βαθμονομήσεων. Ο σκοπός που γίνονται αυτές οι βαθμονομήσεις είναι το να ταυτοποιηθούν τα ραδιονουκλίδια που ανιχνεύονται στο ίζημα από το οποίο αποτελούνται τα δείγματα και η ποσοτική μέτρηση της συγκέντρωσης ενεργότητάς τους (Bq/kg). Η βαθμονόμηση συνήθως γίνεται για μια περιοχή ενεργειών των ακτίνων- $\gamma$  οι οποίες καλύπτουν το εύρος ενδιαφέροντος των εκάστοτε μετρήσεων, ανάλογα με το που κυμαίνονται οι ενέργειες ακτίνων- $\gamma$  των ραδιονουκλιδίων που αναμένουμε να συναντήσουμε στα δείγματα από φυσική άποψη.

Η διαδικασία βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε μέσω της καταγραφής ενός φάσματος από πρότυπη γνωστή πηγή Eu-152 (με πρόσμιξη Eu-154) σε μορφή σκόνης, η οποία γέμισε ένα κυλινδρικό δοχείο ίδιων διαστάσεων με

αυτό των δειγμάτων και τοποθετήθηκε σε θέση επαφής με το παράθυρο του ανιχνευτή (σε απόσταση ~5mm από τον κρύσταλλο του ανιχνευτή). Έπειτα από τη διαδικασία βαθμονόμησης, το σύστημα ανίχνευσης ήταν σε θέση να πραγματοποιήσει τις μετρήσεις δειγμάτων οπότε αυτά τοποθετήθηκαν σε θέση επαφής με το παράθυρο του ανιχνευτή.

Οι διαστάσεις ανιχνευτών όπως αυτός του γερμανίου, δεν είναι σε κανένα βαθμό τυποποιημένες, καθιστώντας τον ακριβή καθορισμό του ενεργού τους όγκου αρκετά δύσκολο. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα το να μην ξεπερνά το 10-20% η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, ακόμα και αν αυτή είναι βασισμένη είτε σε σταθερές που εκφράζουν τις βαθμονομήσεις, οι οποίες έχουν ήδη γίνει, και δίνονται από τον κατασκευαστή είτε σε εκτιμήσεις που γίνονται από δημοσιευμένες μετρήσεις και υπολογισμούς για ανιχνευτές παρόμοιου μεγέθους. Για αυτό το λόγο, είναι αναγκαία η βαθμονόμηση της διάταξης πριν από κάθε πειραματική σειρά μετρήσεων. Κάποιες επιπλέον παράμετροι οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν ολισθήσεις στην απόδοση του ανιχνευτή ανά χρονικά διαστήματα, είναι οι μεταβολές είτε στο πάχος του παραθύρου, είτε στην απόδοση της συλλογής φορτίου, είτε στην απόδοσης και συμπεριφορά των ηλεκτρικών κυκλωμάτων που συνοδεύουν τον ανιχνευτή, όπως επίσης και πλήθος άλλων παραμέτρων των μετρήσεων. Μέσω των πειραματικών βαθμονομήσεων, είναι δυνατή η κατασκευή εμπειρικής εκδοχής καμπύλων τόσο της διακριτικής ικανότητας, όσο και της απόδοσης της ενέργειας του ανιχνευτή, ενώ επίσης με τη βοήθεια αυτών των καμπυλών επιτυγχάνεται ο ακριβής προσδιορισμός των αριθμητικών τους σταθερών, με τις τιμές αυτές να χρησιμοποιούνται μετέπειτα στην αριθμητική επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τα δείγματα που εξετάζονται στην εργασία αυτή, ενώ παράλληλα αποτελούν ενδογενές χαρακτηριστικό του ανιχνευτικού συστήματος HPGe.

### 2.9.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση

Κατά τη διαδικασία της ενεργειακής βαθμονόμησης πραγματοποιείται αντιστοίχιση μιας συγκεκριμένης ενέργειας σε καθένα από τα κανάλια καταγραφής των γεγονότων. Η προσαρμογή αυτή ορίζεται ως γραμμική ή ακριβέστερα δευτέρου βαθμού σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, και η σχέση από την οποία δίνεται είναι η εξής:

$$E = a + b * x + c * x^2 \quad (2.3)$$

Όπου:

E: η ενέργεια και

x: το αντίστοιχο κανάλι εμφάνισης της ενέργειας

### 2.9.2 Βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας

Για την ανάλυση και των κοντινών ενεργειακών κορυφών, προαπαιτείται η βαθμονόμησης της διακριτικής ικανότητας ώστε να εξακριβωθεί η άρτια λειτουργία του ανιχνευτή. Για τη διαδικασία της βαθμονόμησης αυτής η

οποία ακολουθεί την ενεργειακή βαθμονόμηση, γίνεται γραμμική προσαρμογή στο FWHM των 10 ισχυρότερων κορυφών του Eu-152 (κορυφές που η επιλογή των ενεργειών τους πραγματοποιήθηκε με κριτήριο την μεγάλη τους σχετική ένταση κάτι που συνεπάγεται και με τη μεγαλύτερη ευκρίνεια τους στο φάσμα. Οι φωτοκορυφές αυτές προσδιορίστηκαν και πραγματοποιήθηκε η εμβοδομέτρησή τους μέσω της ανάλυσης των φασμάτων με το πρόγραμμα SPECTRW (KALFAS, 2011)). Σύμφωνα με τη σχέση (2.4), η συνάρτηση προσαρμογής που αναφέρθηκε είναι γραμμική.

$$FWHM = a + b * E \quad (2.4)$$

Όπου:

E: η ενέργεια και

**FWHM**: το πλάτος της φωτοκορυφής σε ύψος, ακριβώς στο μέσο της κορυφής αυτής, μετρημένο σε keV.

### 2.9.3 Βαθμονόμηση της απόδοσης του ανιχνευτή HPGe

Για να επιτευχθεί η εκτίμηση της συγκέντρωσης ενεργότητας ενός ραδιοϊσοτόπου με τη χρήση του αριθμού των ανιχνευόμενων ακτίνων-γ των αντίστοιχων φωτοκορυφών, κρίνεται απαραίτητη η βαθμονόμηση της απόδοσης του ανιχνευτή (απόλυτη απόδοση φωτοκορυφής), προτού πραγματοποιηθεί μέτρηση άγνωστης πηγής. Η συγκεκριμένη βαθμονόμηση υποδηλώνει τη σχέση μεταξύ του αριθμού των ακτίνων –γ δεδομένης ενέργειας (φωτοκορυφής) που ανιχνεύονται και του αριθμού των συνολικών ακτίνων-γ της ίδιας ενέργειας που είχαν εκπεμφθεί από την πηγή. Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται είναι αρχικά η ικανότητα του ανιχνευτή να ανιχνεύει εσωτερικά, κάτι το οποίο έχει να κάνει με την ενέργεια που έχουν τα φωτόνια και τη πυκνότητα, το τύπο και τις διαστάσεις του ανιχνευτή. Επίσης η ικανότητα που έχει ο ανιχνευτής στο να μετατρέπει πλήρως τα ανιχνευόμενα φωτόνια σε ηλεκτρονικό παλμό (Knoll, 1989), σε συνδυασμό με τη γεωμετρική σχέση ανιχνευτή-πηγής αποτελούν επίσης σημαντικούς παράγοντες για τη βαθμονόμηση του συστήματος.

Ο προσδιορισμός του απόλυτου ρυθμού εκπομπής ακτίνων –γ οποιουδήποτε άγνωστου δείγματος για κάποια συγκεκριμένη γεωμετρία και όχι παρόμοια πηγή γνωστής ενεργότητας, είναι αποτέλεσμα του προσδιορισμού της απόλυτης τιμής της απόδοσης του ανιχνευτή για οποιαδήποτε ενέργεια. Γεγονός το οποίο ισούται με τη βαθμονόμηση της απόδοσής του.

Για να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση της απόδοσης του ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκε όμοια γεωμετρία με εκείνη των δειγμάτων. Η πρότυπη πηγή Eu, από τη στιγμή που οι διαστάσεις του κυκλικού μέρους του δείγματος ήταν κοινές με εκείνες του ανιχνευτή, τοποθετήθηκε και προσαρμόστηκε σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή.

Η θεωρητική καμπύλη η οποία δείχνει τη σχέση εξάρτησης μεταξύ της απόλυτης ανιχνευτικής ικανότητας από την ενέργεια (E), δίνεται από τη σχέση (2.5).

$$efficiency = \frac{A * E^B}{1000 * C + E^D} \quad (2.5)$$

Όπου A,B,C,D σταθερές.

Η μορφή αυτή της συνάρτησης στηρίζεται στην εμπειρία αναλύσεως πολλών φασμάτων από την ομάδα πυρηνικής φασματοσκοπίας του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε., σύμφωνα και με την αντίστοιχη βιβλιογραφία.

Από τη προσαρμογή, στη θεωρητική αυτή καμπύλη, της ενέργειας των ισχυρών φωτοκορυφών και την απόλυτης απόδοσής της συσκευής που χρησιμοποιείται για τις κορυφές αυτές, είναι εφικτή η απόδοση για οποιαδήποτε ενέργεια - $\gamma$  στον συγκεκριμένο ανιχνευτή.

## 2.10 Βαθμονόμηση συστήματος XRF

Το καταλληλότερο σύστημα για τον προσδιορισμό κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων είναι το φασματόμετρο διαχωρισμού μήκους κύματος (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence system (WDXRF)) το οποίο και απέκτησε το Βιογεωχημικό εργαστήριο του Ινστιτούτου Ωκεανογραφίας του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. το 1998, και είναι τύπου Phillips PW-2400. Σημαντικά πλεονεκτήματα του συστήματος είναι το χαμηλό κόστος, η ταχύτητα ανάλυσης, η δυνατότητα να επαναληφθεί η μέτρηση και το γεγονός ότι επεξεργάζεται χωρίς να καταστρέφει τα δείγματα.

Προκειμένου να βαθμονομηθεί το σύστημα, πραγματοποιείται σάρωση διαφορετικών δειγμάτων αναφοράς, τα οποία καταλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα χημικής σύστασης (συγκέντρωσης) στοιχείων. Για το σκοπό αυτό έγινε συλλογή δειγμάτων πετρωμάτων και ιζημάτων, τα οποία βρίσκονταν ήδη σε μορφή σκόνης, από τα U.S Geological Survey και National Research Council of Canada Reference Materials. Έπειτα ακολούθησε η παρασκευή δειγμάτων «χαπιών» και «γυαλιών» ώστε να προσδιοριστούν τα ιχνοστοιχεία και κύρια στοιχεία αντίστοιχα, με τη μέτρηση των κύριων στοιχείων (μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία) να απαιτεί τη χρήση δειγμάτων σε μορφή «γυαλιού». Εκτός της παρασκευής των δειγμάτων, αποκτήθηκαν και πιστοποιημένες τιμές που αφορούσαν τα ίδια δείγματα τα οποία παρασκευάστηκαν και μετρήθηκαν και στα προαναφερόμενα εργαστήρια. Έπειτα μέσω του λογισμικού ρυθμίστηκαν οι παράμετροι μέτρησης από τα αρμόδια άτομα, όπου κατασκευάστηκαν δύο διακριτές εφαρμογές η καθεμία από τις οποίες αφορούσε το εκάστοτε είδος μέτρησης και επιλέχθηκαν οι βέλτιστες ρυθμίσεις για το κάθε στοιχείο.

Μετά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη σταθερότητα της ανιχνευτικής διάταξης για τις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια. Αυτός είναι και ο λόγος που η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στον θάλαμο της ανιχνευτικής διάταξης έχει ιδιαίτερη σημασία και επιτυγχάνεται με τη συνεχή παραμονή του φασματόμετρου σε κατάσταση αναμονής. Επιπλέον πραγματοποιούνται τακτικοί έλεγχοι με τη χρήση δύο δειγμάτων αναφοράς (των Breitlaender και Ausmon), ενώ ελέγχεται συνεχώς η ακρίβεια του συστήματος μέσω της μέτρησης των πιστοποιημένων υλικών αναφοράς (MAG-1, MESS-2, PACS-2) τόσο πριν όσο και μετά από κάθε παρτίδα δειγμάτων ενδιαφέροντος. Ο έλεγχος αυτός γίνεται και κατά τη διάρκεια των βαθμονομήσεων σε περιπτώσεις όπου εισάγονται επιπλέον μετρήσεις. Η συνεχής αυτή σύγκριση των μετρήσεων των υλικών αναφοράς (από το Βιογεωχημικό εργαστήριο) με τις πιστοποιημένες συγκεντρώσεις αυτών (από το εργαστήριο του Καναδά) επιβεβαιώνει και εξασφαλίζει την ικανοποιητική επαναληψιμότητα και ακρίβεια της μεθόδου.



## 2.11 Ρυθμός ιζηματογένεσης

Τα ραδιονουκλίδια για δεκαετίες χρησιμοποιούνται ως ιχνηθέτες για μελέτη περιβαλλοντικών συστημάτων. Σήμερα, εκτός των τεχνητών ραδιονουκλιδίων που χρησιμοποιούνταν αρχικά σε έρευνες, γίνεται χρήση και των φυσικών ραδιονουκλιδίων αλλά και των σταθερών ισotόπων. Η μεταβολή της αφθονίας των ραδιονουκλιδίων, τα οποία βρίσκονται διασκορπισμένα στο φυσικό περιβάλλον, κατά τόπους είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να προσδιοριστούν οι οδοί μεταφοράς της μάζας και η χρονολόγηση περιβαλλοντικών διαδικασιών στην ατμόσφαιρα, το νερό και το έδαφος. Το  $^{137}\text{Cs}$  και το  $^{210}\text{Pb}$  (όπως και το  $^7\text{B}$ ) χαρακτηρίζονται και ως «ραδιονουκλίδια επιφανειακής εναπόθεσης» (fallout radionuclides, FRN) και γίνεται χρήση αυτών στην πλειοψηφία των μελετών ιζηματογένεσης και διάβρωσης-καθίζησης (Froehlich, 2009).

Η μετάβαση από την ποιοτική περιγραφή σειράς γεγονότων σε ποσοτική βάση, όσον αφορά τις γεωλογικές επιστήμες, πραγματοποιείται μόνο στη περίπτωση που υπάρχει τρόπος να αντιστοιχηθούν δεδομένα είτε νερού είτε ιζήματος με συγκεκριμένες χρονολογίες. Μια φυσική διαδικασία χρονολόγησης αποτελεί εκείνη της ραδιενεργούς διάσπασης εφόσον τα ραδιονουκλίδια είναι αναπόσπαστο μέρος των στοιχείων του πλανήτη, καθώς η ραδιοχρονολόγηση αφορά ποσοτική αντιστοίχιση καταγραφών με χρονολογίες. Ο προσδιορισμός των σύγχρονων διαδικασιών ιζηματογένεσης επιτυγχάνεται μέσω της ραδιοχρονολόγησης και είναι ιδιαίτερα σημαντικές λόγω του ότι έχουν υποστεί σειρά ανθρωπογενών επιδράσεων, συμπεριλαμβανομένης της μόλυνσης από χημικές, βιολογικές και ραδιενεργές πηγές.

Το ότι κάθε ασταθές ραδιονουκλίδιο παράγεται από τη διάσπαση ενός μητρικού το οποίο έχει συγκεκριμένο χρόνο ημιζωής, αποτελεί το γεγονός στο οποίο βασίζεται η χρονολόγηση. Μετρώντας την ενεργότητα του μητρικού ραδιονουκλιδίου και του θυγατρικού, είναι εφικτός ο προσδιορισμός της ποσότητας η οποία υπήρχε στο ίζημα κατά την απόθεσή του, διαδικασία μέσα από την οποία μπορούν να προσδιοριστούν τα χρονολογικά όρια της ηλικίας του ιζηματογενούς σχηματισμού. Η χρονολογία των ιζημάτων και κατ' επέκταση ο ρυθμός ιζηματογένεσης λοιπόν, είναι εφικτό να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια έπειτα από συνδυασμό ραδιονουκλιδίων. Τα ραδιονουκλίδια τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί σε πλήθος μελετών για τα σύγχρονα ιζήματα ηλικίας έως 100 ετών περίπου και λιγότερο, είναι το  $^{137}\text{Cs}$  και ο  $^{210}\text{Pb}$  εξαιτίας των χρόνων ημιζωής τους (περίπου 30 και 22 έτη αντίστοιχα) αλλά και των υψηλών συγκεντρώσεων που εμφανίζουν σε ιζήματα σε ολόκληρο τον κόσμο.

### 2.11.1 Ραδιοχρονολόγηση με $^{210}\text{Pb}$

Η ραδιοχρονολόγηση με  $^{210}\text{Pb}$  στηρίζεται σε μετρήσεις των συγκεντρώσεών του σε πυρήνες ιζήματος ή εδάφους. Η χρονολόγηση των πυρήνων ιζημάτων βασίζεται στη μελέτη της αποδιέγερσης του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ . Μέσω της εκθετικής εξίσωσης του νόμου της ραδιενεργού αποδιέγερσης και στηριζόμενοι στις υποθέσεις ότι (i) η επαναιώρηση και η καθίζηση του ιζήματος δεν διακόπτεται στο χρόνο, (ii) δεν υπάρχει καμία κινητικότητα του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  μετά την απόθεση

του ιζήματος, (iii) η ταχύτητα καθίζησης είναι σταθερή στο χρόνο και (iv) δεν υπάρχει κάποια ανάμειξη μεταξύ των στρωμάτων του ιζήματος, προκύπτει η παρακάτω σχέση (2.6) η οποία συνδέει την ενεργότητα  $C$  με το βάθος  $x$  του ιζήματος:

$$R(t) = (R_0) * \exp(-\lambda * t) \Rightarrow R(x) = (R_0) * \exp(-\lambda * \frac{x}{v}) \quad (2.6)$$

όπου:

$R_0$ : η επιφανειακή ενεργότητα του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  στο χρόνο  $t=0$  (αντιστοιχεί στην επιφάνεια του ιζήματος στη θέση  $x=0$ ),

$v$ : η ταχύτητα καθίζησης (η οποία συνδέεται με το βάθος με τη σχέση  $t=x/v$ )

$t$ : η χρονική στιγμή που αντιστοιχεί σε ενεργότητα  $R(t)$ , και

$\lambda$ : η σταθερά διάσπασης που είναι χαρακτηριστική για κάθε ισότοπο, έχει διαστάσεις οι οποίες είναι αντιστρόφου χρόνου και ισούται:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (2.7)$$

Με το  $T_{1/2}$  να είναι ο χρόνος ημιζωής για το αντίστοιχο ισότοπο.

Έπειτα από σειρά διαδοχικών πράξεων της εξίσωσης (2.6), η ενεργότητα  $R(t)$  είναι δυνατόν να εκφραστεί ως εξής:

$$\ln R(t) = -\lambda t + \ln R_0 \quad (2.8)$$

Στη περίπτωση όπου θεωρήσουμε ότι όπου  $t=x/v$  για τον χρόνο, με το  $x$  να εκφράζει το βάθος του ιζήματος και το  $v$  αυτό της ταχύτητας, σε συνδυασμό με τη χρήση του μοντέλου σταθερής ροής - σταθερής ιζηματογένεσης (Constant Flux-Constant Sedimentation) CFCS καταλήγουμε στη σχέση (2.9):

$$\ln R(x) = -(\lambda/v) * x + \ln R_0 \quad (2.9)$$

Η εξίσωση (2.9) έχει τη γραμμική μορφή της μορφής  $\ln R = a * x + b$ , με το  $a = -(\lambda/v)$  και  $b = \ln R_0$ , δηλαδή η ενεργότητα (σε λογάριθμο) έχει γραμμική εξάρτηση συναρτήσει της απόστασης  $x$ . Στη περίπτωση όπου η συσσώρευση του ιζήματος, όπως και η ροή του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  στην επιφάνεια του ιζήματος είναι σταθερές, όπως συμβαίνει στη συγκεκριμένη περίπτωση (βλ. αρχή υποενοότητας, υποθέσεις), το προφίλ της συγκέντρωσης κατά μήκος του πυρήνα αναμένεται να είναι μια καθαρά εκθετική καμπύλη. Συνεπώς μέσω των πειραματικών μετρήσεων των  $R(x)$  κατά μήκος του πυρήνα και τη βέλτιστη εκθετική προσαρμογή της σχέσης (2.6) στα δεδομένα, είναι εφικτός ο προσδιορισμός της ταχύτητας καθίζησης του ιζήματος.

Στην παρούσα εργασία, η οποία έχει να κάνει με θαλάσσια ιζήματα, η απόσταση  $x$  έχει να κάνει με το βάθος που βρίσκεται το κάθε δείγμα (μετρώντας από την επιφάνεια του πυθμένα) στο οποίο αντιστοιχεί ενεργότητα  $\ln R$ , και το μέγεθος  $v$  (ορισμένο σε μονάδες ταχύτητας) είναι το μέγεθος που ζητάμε να προσδιορίσουμε, στη συγκεκριμένη περίπτωση, δηλαδή ο ρυθμός ιζηματογένεσης, όπου εκφρασμένος σε μονάδες  $\text{cm/yr}$  μας φανερώνει πόσο γρήγορα κατακάθεται η ύλη στον πυθμένα ετησίως.

Μέσο της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων γίνεται προσδιορισμός της κλίσης της ευθείας  $\ln R(x)$ , δηλαδή της ποσότητας  $a = -(\lambda/v)$ , μέσω της οποίας εξαγάγουμε την πειραματική τιμή του ρυθμού ιζηματογένεσης  $v$  σε κάθε περιοχή δειγματοληψίας (θεωρώντας γνωστούς τους χρόνους ημιζωής του κάθε ισότοπου).

Η αβεβαιότητα που αντιστοιχεί στην τιμή του ρυθμού ιζηματογένεσης δίνεται από τη σχέση (2.10)

$$\delta v = \frac{\lambda \cdot \delta a}{a^2} \quad (2.10),$$

όπου μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζεται η αβεβαιότητα της κλίσης ( $\delta a$ ).

### 2.11.2 Ραδιοχρονολόγηση με $^{137}\text{Cs}$

Λόγω των δοκιμών των πυρηνικών όπλων υψηλής απόδοσης τη δεκαετία του 1950 και στις αρχές τους 1960, άρχισε η ευρεία διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  στο περιβάλλον. Το 1986 για παράδειγμα, η παραπάνω ατμοσφαιρική απόθεση του  $^{137}\text{Cs}$  σε ορισμένες Ευρωπαϊκές περιοχές ήταν αποτέλεσμα του ατυχήματος που προκλήθηκε στο Chernobyl. Το  $^{137}\text{Cs}$  χρησιμοποιείται ως χρησιμοποιείται ως ραδιοϊχνηθέτης του ρυθμού διάβρωσης – καθίζησης στο έδαφος και ιζηματογένεσης εφόσον υπάρχει καλή γνώση τόσο του χρόνου όσο και της ποσότητας του  $^{137}\text{Cs}$  το οποίο εναποτίθεται σε παγκόσμιο επίπεδο. Εξαιτίας του χρόνου ημιζωής του  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} \sim 30$  yr), της ισχυρής και γρήγορης προσρόφησης του από τα λεπτόκοκκα σωματίδια του εδάφους, την ευκολία της μέτρησής του με φασματοσκοπία-γ και το καθορισμένο πρότυπο εισόδου του στο περιβάλλον (πυρηνικές δομικές και ατύχημα Chernobyl), το  $^{137}\text{Cs}$  είναι ο ιχνηθέτης ο οποίος χρησιμοποιείται περισσότερο σε ευρεία κλίμακα όσον αφορά την ραδιοχρονολόγηση. Πλήθος μετρήσεων έχουν χρησιμοποιηθεί με σκοπό να εκτιμηθούν πρόσφατοι ρυθμοί ιζηματογένεσης (δηλαδή μετά το 1950) σε λίμνες, εκβολές ποταμών, ποτάμια, θαλάσσιες περιοχές κ.α. (Semizhon et al., 2010; Kirchner, 1998; Sanchez-Cabeza, 1999; Radakovitch et al., 1999).

Μέσο της εμφάνισης των κορυφών του  $^{137}\text{Cs}$  (βλ. υποενότητα 1.3) σε πυρήνα ιζήματος είναι δυνατή η εκτίμηση του μέσου ρυθμού ιζηματογένεσης της υπό μελέτη περιοχής. Οι μέσοι ρυθμοί ιζηματογένεσης ( $V_i$ ) σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Ruiz-Fernandez και Hillaire- Marcel, 2009; Tsabaris et al., 2009) μετά το 1954, μετά το 1963 και μετά το 1986 υπολογίζονται, αντιστοίχως από την παρακάτω σχέση (2.11).

$$V_i = \frac{z_i}{t_0 - t_i} \quad (2.11)$$

Όπου

$z_i$ : το βάθος που παρατηρείται η εκάστοτε κορυφή του  $^{137}\text{Cs}$

$t_0$ : η χρονολογία της δειγματοληψίας του πυρήνα,

και

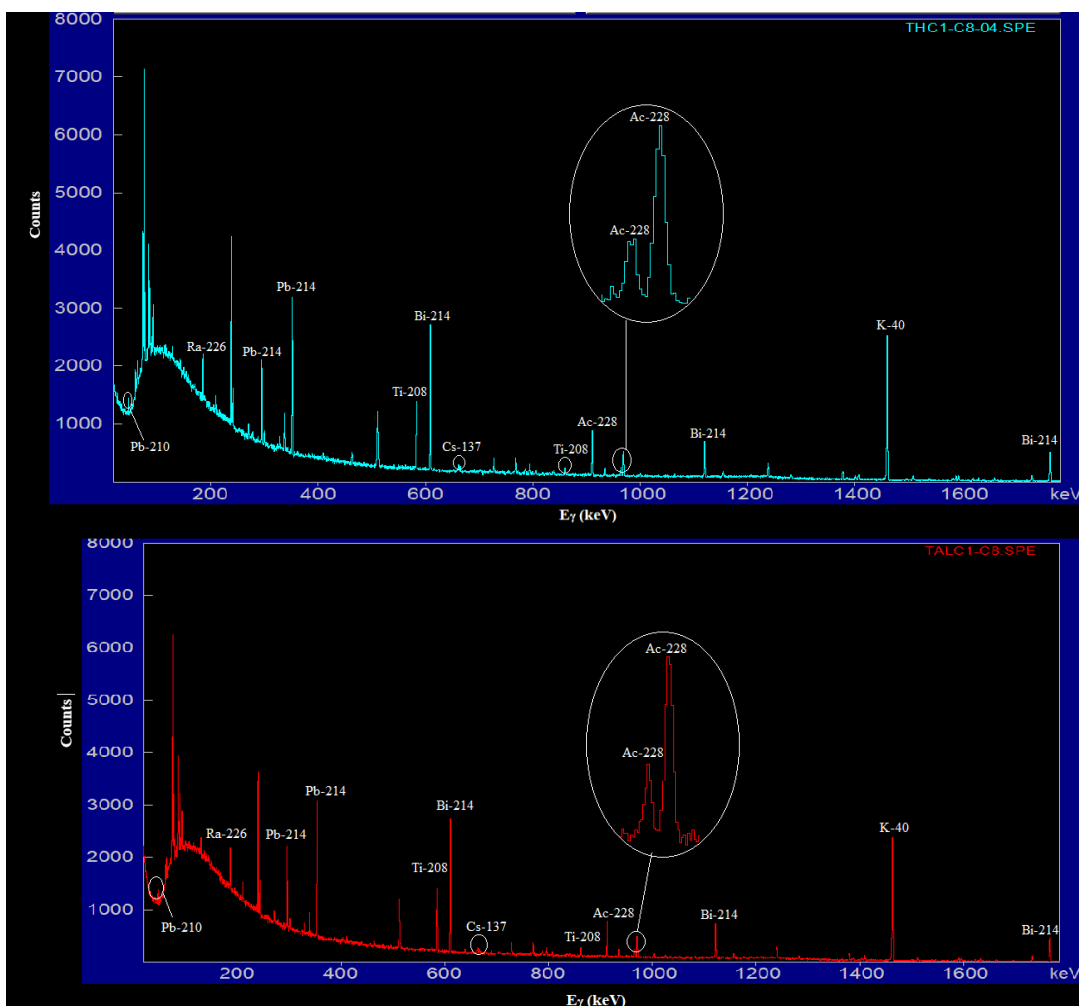
$t_i$ : η χρονολογία που αντιστοιχεί στην εκάστοτε κορυφή, λόγω της πρώτης του εμφάνισης ( $t_1=1954$ ), των πυρηνικών δοκιμών ( $t_2=1963$ ) και του ατυχήματος του Chernobyl ( $t_3=1963$ ).

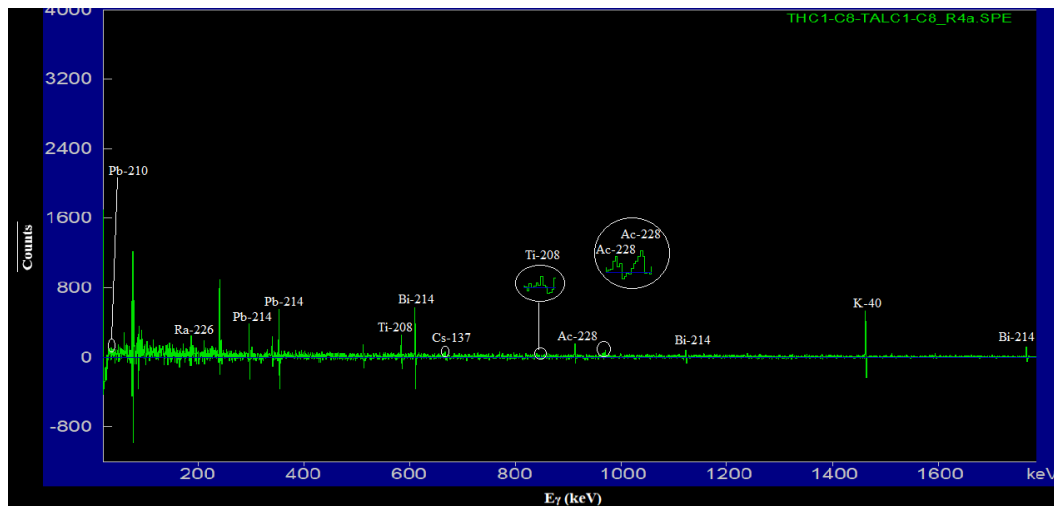
Έπειτα από την επίλυση της εξίσωσης (2.11) ανάλογα με τον αριθμό των κορυφών που απεικονίζονται στο γράφημα του υπό εξέταση κάθε φορά πυρήνα, ο μέσος ρυθμός ιζηματογένεσης υπολογίζεται από τη μέση τιμή των  $V_i$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αποτελέσματα

### 3.1 Ανάλυση φασμάτων ακτινοβολίας ακτίνων-γ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης ενεργότητας (Bq/kg) στα θαλάσσια ιζήματα του Κόλπου της Γέρας μέσω της φασματοσκοπίας-γ. Για κάθε μετρούμενο δείγμα λαμβάνεται ένα φάσμα στο οποίο συμπεριλαμβάνεται τόσο η ραδιενέργεια (φυσική ή τεχνητή) του δείγματος όσο και η ραδιενέργεια του υποβάθρου (π.χ. περιβάλλον εργαστηρίου, κοσμική ακτινοβολία). Κατά την ανάλυση του φάσματος η συνεισφορά του υποβάθρου αφαιρείται μέσω της καταγραφής ενός φάσματος υποβάθρου (μέτρηση μη-ραδιενεργού δείγματος από τον ανιχνευτή). Στη παρούσα εργασία προκειμένου να ληφθεί φάσμα υποβάθρου χρησιμοποιήθηκε αδρανές υλικό (σκόνη πούδρας) ίδιας γεωμετρίας (εκτεταμένη γεωμετρία) και παρόμοιας πυκνότητας με αυτή των δειγμάτων, με σκοπό τα ληφθούν υπ' όψη φαινόμενα ενδο-απορρόφησης των ακτίνων-γ (μέσα στο υλικό).





Εικόνα 3.1: Φάσμα δείγματος, φάσμα υποβάθρου και καθαρό φάσμα δείγματος, στην αντίστοιχη σειρά, για το δείγμα THC1, για χρόνο μέτρησης 24 h (86400 sec), με σημειωμένες τις κορυφές που αναλύθηκαν για κάθε ραδιονουκλίδιο.

Κάθε καταγραφόμενο φάσμα αποτελείται από φωτοκορυφές σε διαφορετικές ενέργειες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα υπάρχοντα ραδιενεργά στοιχεία στο δείγμα. Από τον αριθμό των γεγονότων που βρίσκεται σε κάθε φωτοκορυφή υπολογίζεται η συγκέντρωση της ενεργότητας σύμφωνα με τη σχέση (3.1). Οι αναλύσεις των φασμάτων (ταυτοποίηση ραδιονουκλιδίων και εμβαδομέτρηση της εκάστοτε φωτοκορυφής) πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό SPECTRW (Kalfas, 2016).

$$A = \frac{\text{counts}}{I_{\gamma} \cdot \text{eff} \cdot t \cdot m} \quad (3.1)$$

Όπου:

**A:** η συγκέντρωση ενεργότητας του ραδιονουκλιδίου (σε Bq/kg),

**counts:** τα γεγονότα που υπολογίστηκαν από την ανάλυση της φωτοκορυφής,

**$I_{\gamma}$ :** η ένταση της ακτίνας-γ (πιθανότητα εκπομπής)

**eff:** η απόλυτη απόδοση (ανιχνευτική ικανότητα) του ανιχνευτή για τη συγκεκριμένη ενέργεια,

**t:** ο χρόνος μέτρησης του δείγματος (σε sec) και

**m:** η μάζα του δείγματος που μετράται (σε kg)

Προκειμένου να μετρηθεί η συγκέντρωση ενεργότητας κάθε ραδιονουκλιδίου, αναλύθηκαν οι αντίστοιχες φωτοκορυφές με τη μέγιστη πιθανότητα εκπομπής ( $I_{\gamma}$ ). Η ανάλυση της κάθε φωτοκορυφής (εμβαδομέτρηση) συνοδεύεται από κάποια στατιστική αβεβαιότητα. Το υπό ανάλυση φάσμα έχει προκύψει αφαιρώντας το υπόβαθρο από το φάσμα του δείγματος. Οπότε κατά τη διαδικασία υπολογισμού των γεγονότων της κάθε φωτοκορυφής, η αβεβαιότητα του υπό ανάλυση φάσματος («καθαρό») υπολογίζεται από τη σχέση (3.2):

$$\delta \text{counts} = \sqrt{\delta \text{counts}_{BGR}^2 + \delta \text{counts}_{APX}^2} \approx 2 * \delta \text{counts}_{NET} \quad (3.2)$$

Όπου:

**$\delta \text{counts}$ :** η απόλυτη αβεβαιότητα στον υπολογισμό των γεγονότων κάθε φωτοκορυφής για το υπό ανάλυση φάσμα,

**$\delta \text{counts}_{BGR}$ :** η αβεβαιότητα των γεγονότων της αντίστοιχης φωτοκορυφής του υποβάθρου,

**δcounts<sub>Αρχ</sub>**: η αβεβαιότητα των γεγονότων που προκύπτει από την ανάλυση της κορυφής του αρχικού φάσματος και

**δcounts<sub>NET</sub>**: η αβεβαιότητα των γεγονότων έτσι όπως προκύπτει από την ανάλυση του «καθαρού» φάσματος.

**Πίνακας 3.1:** Οι κορυφές οι οποίες αναλύθηκαν, η ένταση της ακτίνας-γ και η ραδιενεργός σειρά που ανήκει το καθένα από τα ραδιονουκλίδια.

Ραδιονουκλίδιο	Ενέργεια (keV)	I <sub>γ</sub> (%)	Ραδιενεργός Σειρά
<sup>210</sup> Pb	46.5	4.06	<sup>238</sup> U-
<sup>214</sup> Pb	295.2	19.2	<sup>238</sup> U-
<sup>214</sup> Pb	351.9	37.1	<sup>238</sup> U-
<sup>214</sup> Bi	609.3	46.1	<sup>238</sup> U-
<sup>214</sup> Bi	1120.8	15	<sup>238</sup> U-
<sup>214</sup> Bi	1764.5	15.9	<sup>238</sup> U-
<sup>226</sup> Ra	186.2	3.51	<sup>238</sup> U
<sup>235</sup> U	185.7	57.2	<sup>235</sup> U
<sup>228</sup> Ac	911.2	26.6	<sup>232</sup> Th
<sup>228</sup> Ac	964.6	5.05	<sup>232</sup> Th
<sup>228</sup> Ac	969.0	16.23	<sup>232</sup> Th
<sup>208</sup> Tl	583.2	30.36	<sup>232</sup> Th
<sup>208</sup> Tl	860.6	4.47	<sup>232</sup> Th
<sup>137</sup> Cs	661.7	85.2	-
<sup>40</sup> K	1460.8	10.67	-

Τέλος αξίζει να αναφερθεί η μέθοδος εύρεσης της συγκέντρωσης της ενεργότητας του <sup>235</sup>U, η οποία είναι αποτέλεσμα ανάλυσης της κορυφής στα 186 keV στην οποία συνεισφέρουν τόσο το <sup>235</sup>U όσο και το <sup>226</sup>Ra. Με τη χρήση μέσου όρου των συγκεντρώσεων ενεργότητας του <sup>214</sup>Pb ( $A_{214Pb}$ ) και του <sup>214</sup>Bi ( $A_{214Bi}$ ), οι οποίες υπολογίστηκαν από τις αντίστοιχες φωτοκορυφές, βρέθηκε η συγκέντρωση ενεργότητας του μητρικού <sup>226</sup>Ra ( $A_{226Ra}$ ) θεωρητικά (η οποία μέσω της εξίσωσης 3.5 έγινε μετατροπή της σε αριθμό γεγονότων κορυφής με ενέργεια 186.21 keV). Από τα συνολικά γεγονότα ακτίνων -γ που αντιστοιχούσαν στη κορυφή 185 keV ( $cps_{185}$ ) (εξίσωση 3.7) αφαιρέθηκαν τα γεγονότα του <sup>226</sup>Ra, όπως υπολογίστηκαν μέσω της εξίσωσης (3.3), με το υπόλοιπο σύνολο γεγονότων της κορυφής 185 keV. Τα γεγονότα αυτά αντιστοιχούν στα γεγονότα του <sup>235</sup>U με κορυφή τα 185.7 keV ( $cps_{185.7}$ ). Οι υπολογισμοί που μόλις αναφέρθηκαν, παρουσιάζονται στις παρακάτω εξισώσεις ((3.3)-(3.8)):

$$A_{226Ra} = \frac{A_{214Bi} + A_{214Pb}}{2} \quad (3.3)$$

$$A_{226Ra} = \frac{cps_{226Ra}}{eff_{186} \cdot I_{\gamma-226Ra} \cdot m} \quad (3.4)$$

Επιλύοντας ως προς  $cps_{186.2}$  προκύπτει η ενεργότητα για το <sup>235</sup>U:

$$cps_{226Ra} = A_{226Ra} \cdot eff_{186} \cdot I_{\gamma-226Ra} \cdot m \quad (3.5)$$

$$cps_{total} = cps_{226Ra} + cps_{235U} \quad (3.6)$$

$$cps_{235U} = cps_{total} - cps_{226Ra} \quad (3.7)$$

$$A_{235U} = \frac{cps_{235U}}{eff_{186} \cdot I_{\gamma-235U} \cdot m} \quad (3.8)$$

Όπου:

**cps**: ο αριθμός των γεγονότων ανά μονάδα χρόνου για το κάθε ραδιοϊσότοπο,

**eff**: η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή στην κορυφή 186 keV,

**I<sub>γ</sub>**: η πιθανότητα εκπομπής του κάθε ραδιοϊσοτόπου και

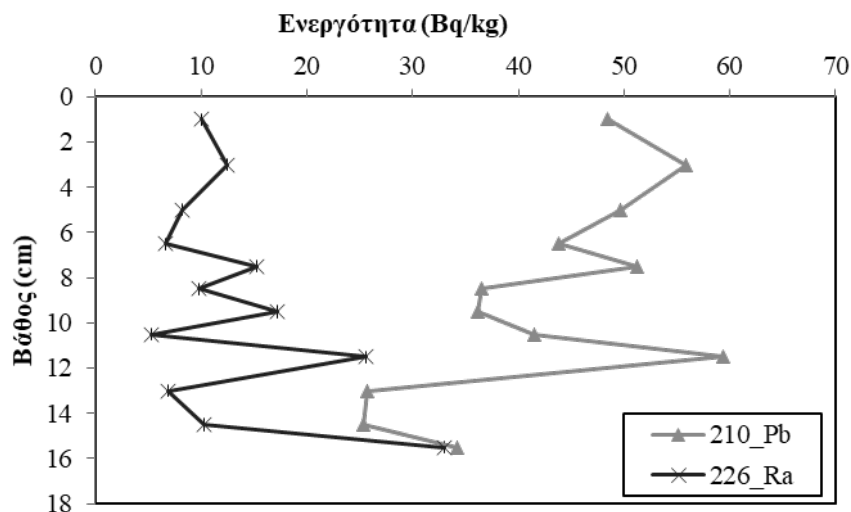
**m**: η μάζα του δείγματος.

### 3.2 Υπολογισμός ρυθμού ιζηματογένεσης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα μοντέλα ραδιοχρονολόγησης με βάση την κατακόρυφη διασπορά του <sup>210</sup>Pb και του <sup>137</sup>Cs σε πυρήνα ιζήματος.

#### 3.2.1 Υπολογισμός του ρυθμού ιζηματογένεσης με τη μέθοδο του <sup>210</sup>Pb

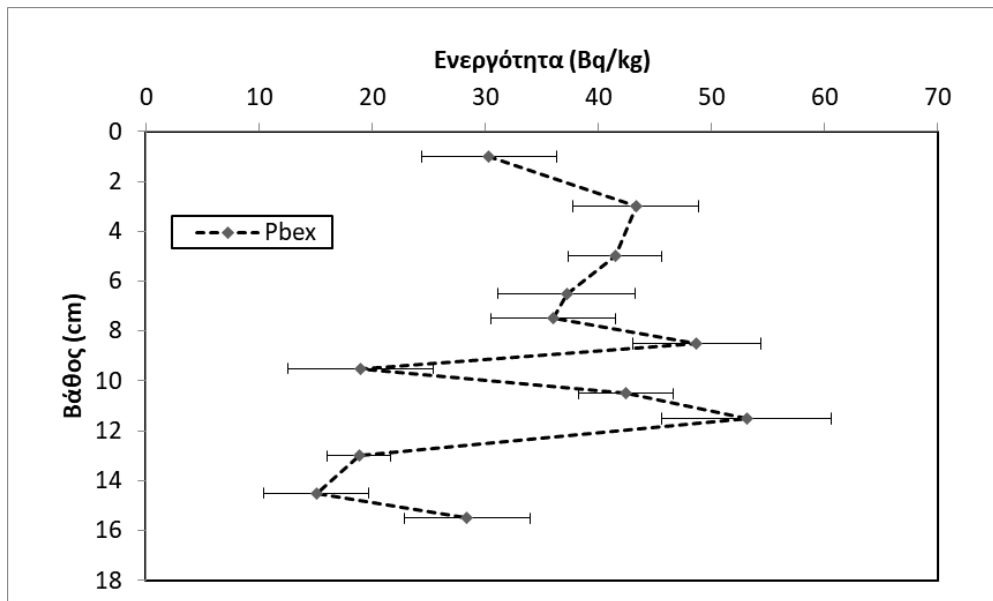
Παρακάτω παρουσιάζεται η κατακόρυφη κατανομή της ενεργότητας του <sup>210</sup>Pb και στη συνέχεια υπολογίζεται ο ρυθμός ιζηματογένεσης:



Γράφημα 3.1: Γραφική παράσταση της κατακόρυφης κατανομής του <sup>210</sup>Pb και <sup>226</sup>Ra στον πυρήνα.

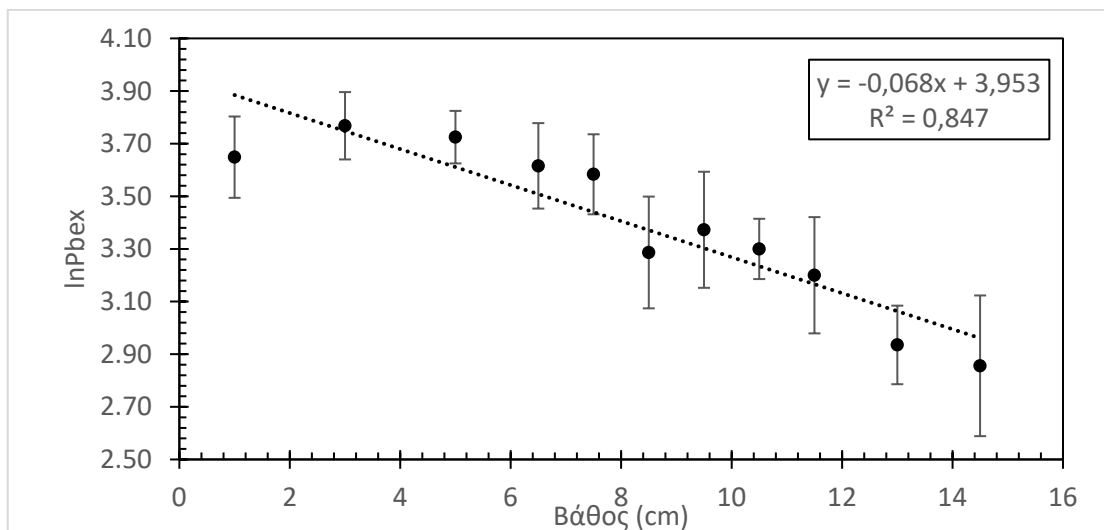
Στο Γράφημα 3.1 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες κατανομές της συγκέντρωσης ενεργότητας του <sup>210</sup>Pb και του <sup>226</sup>Ra. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του <sup>210</sup>Pb σε σχέση με το <sup>226</sup>Ra οφείλονται τόσο στην συνεισφορά του <sup>226</sup>Ra

(ραδιενεργός ισορροπία με  $^{210}\text{Pb}$ ) όσο και του  $^{222}\text{Rn}$  από το χερσαίο περιβάλλον και όχι μόνο (βλ. Υποκεφάλαιο 1.4). Το πλεόνασμα (excess or unsupported) του  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ) μπορεί να υπολογιστεί λοιπόν από την αφαίρεση της συγκέντρωσης ενεργότητας του  $^{226}\text{Ra}$  από την ολική ενεργότητα του  $^{210}\text{Pb}$  για κάθε δείγμα.



Γράφημα 3.2: Γραφική παράσταση της κατακόρυφης κατανομής του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  στον πυρήνα ιζήματος.

Από τον λογάριθμο του πλεονάσματος ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ) μπορεί να υπολογιστεί ο ρυθμός ιζηματογένεσης, όπως έχει αναφερθεί στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο (2.11.1) της παρούσας εργασίας.



Γράφημα 3.3: Γράφημα απεικόνισης της ενεργότητας του  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  σε λογαριθμική αναπαράσταση για τα σημεία του πυρήνα σε συνάρτηση με το βάθος.

Η τιμή του ρυθμού ιζηματογένεσης προκύπτει από τον υπολογισμό της κλίσης της ευθείας,  $\alpha = -0.068$  (Γραφήματος 3.3) και υπολογίζεται ως  $v=0.46$  cm/year.

Η απόκλιση η οποία υπάρχει αφορά στο ότι οι υποθέσεις (π.χ. σταθερή ποσότητα, σταθερός ρυθμός) του ραδιοχρονολογικού μοντέλου δεν ισχύουν σε όλο το μήκος του πυρήνα.



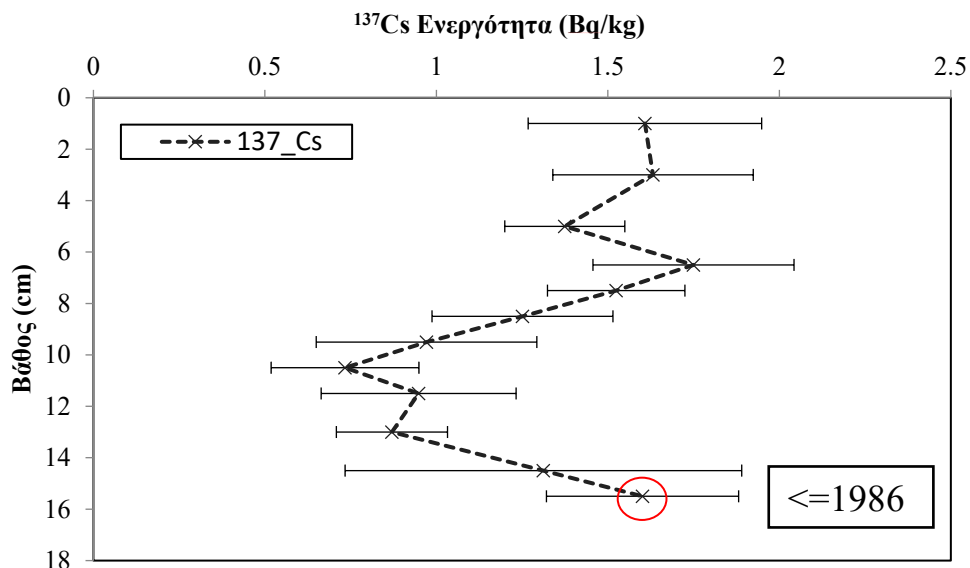
Προκειμένου να επαληθευτεί ο ρυθμός ιζηματογένεσης ο οποίος υπολογίστηκε από τον  $^{210}\text{Pb}$ , χρησιμοποιήθηκε ένα επιπλέον ραδιολογικό μοντέλο, το οποίο βασίζεται στο  $^{137}\text{Cs}$  (βλ. Υποκεφάλαιο 2.11.2).

### 3.2.2 Ποσοτική προσέγγιση του ρυθμού ιζηματογένεσης με βάση το $^{137}\text{Cs}$

Ένας τρόπος ποσοτικής προσέγγισης του ρυθμού ιζηματογένεσης στο πυθμένα είναι μέσω της ενεργότητας των δειγμάτων που περιέχουν τεχνητή ραδιενέργεια. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το  $^{137}\text{Cs}$  ως ιχνηθέτης του ρυθμού ιζηματογένεσης και εξετάζεται η κάθετη κατανομή της ενεργότητάς του.

Στο Γράφημα 3.4 απεικονίζεται η κάθετη κατανομή της ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  όπου σε βάθος 6.5 cm παρατηρείται μέγιστο το οποίο με μια πρώτη ματιά θα μπορούσε να αποδοθεί στο ατύχημα του Chernobyl (1986), ενώ μέγιστο παρατηρείται και σε βάθος των 15.5 cm το οποίο θα έλεγε κανείς ότι αντιστοιχεί στις πυρηνικές δοκιμές του 1963 (η θεώρηση αυτή λαμβάνει χώρα θεωρώντας ότι στα χαμηλότερα βάθη δεν θα λάβει χώρα αύξηση της συγκέντρωσης).

Αυτό το οποίο ισχύει στη πραγματικότητα είναι ότι επειδή το μήκος του πυρήνα είναι μικρό (~15 cm), υπάρχει πιθανότητα το  $^{137}\text{Cs}$  να εμφανίζεται π.χ. στα 16 cm, με την πρώτη κορυφή που εμφανίζεται στο γράφημα να αποτελεί κάποιο ξέπλυμα (π.χ. φερτό υλικό εξαιτίας έντονης βροχόπτωσης ή πλημμύρας στην περιοχή) αυξάνοντας τη συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  στα πρώτα εκατοστά του πυρήνα, εξού και η πρώτη κορυφή που παρατηρείται στο Γράφημα στα 6.5 cm. Συνεπώς το ατύχημα του Chernobyl (1986), εμφανίζεται την δεύτερη κορυφή η οποία αντιστοιχεί στα 15.5 cm.



Γράφημα 3.4: Κάθετη κατανομή της ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  στον πυρήνα ιζήματος.

Ο ρυθμός ιζηματογένεσης, όπως έχει αναφερθεί στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο (2.11.2) της παρούσας εργασίας, μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της σχέσης 2.11 και αντιστοιχεί σε  $v=0.48$  cm/year.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση του ρυθμού ιζηματογένεσης έχουμε από τον  $^{210}\text{Pb}$ :  $v=0.46 \text{ cm/year}$  ενώ από το  $^{137}\text{Cs}$ :  $v=0.48 \text{ cm/year}$  με τα αποτελέσματα να μην έχουν σημαντική απόκλιση μεταξύ τους. Παρατηρείται υψηλός ρυθμός ιζηματογένεσης, και με τις δυο μεθόδους, γεγονός το οποίο είναι λογικό από τη στιγμή που η υπό μελέτη περιοχή αποτελεί ένα δυναμικό ωκεανογραφικό σύστημα (συνεχείς εκροές θερμού νερού από τον πυθμένα της θάλασσας), το οποίο επηρεάζει την κατακρήμνιση των υλικών ή μπορεί και να φέρει επιπλέον υλικό.

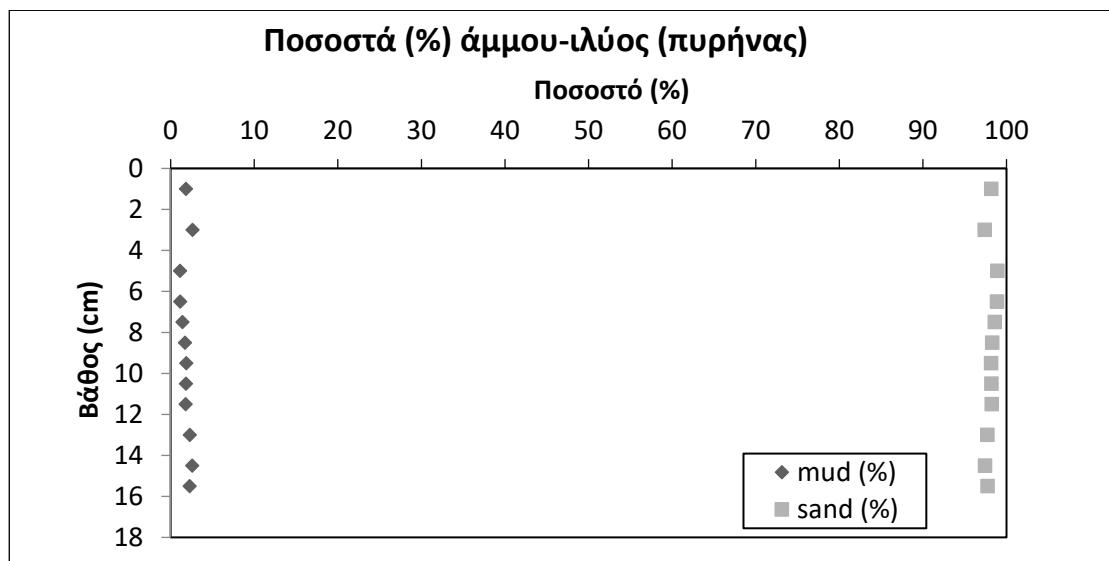
Από τις δύο μεθόδους που προαναφέρθηκαν, η ραδιοχρονολόγηση με βάση το  $^{137}\text{Cs}$ , μιας και βασίζεται μόνο σε δύο σημεία, εμπεριέχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα σε σχέση με αυτή του  $^{210}\text{Pb}$  που βασίζεται σε ένα πιο περιοδικό φαινόμενο (εκροή  $^{222}\text{Rn}$  και κατακρήμνιση  $^{210}\text{Pb}$ ) και άρα περισσότερα πειραματικά σημεία.

Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων με βάση το είδος των δειγμάτων, αρχικά για τα δείγματα του πυρήνα και στη συνέχεια για τα επιφανειακά δείγματα.

### 3.3 Αποτελέσματα του πυρήνα ιζήματος

#### 3.3.1 Αποτελέσματα κοκκομετρίας στον πυρήνα ιζήματος

Τα αποτελέσματα από την ανάλυση της κοκκομετρίας απεικονίζονται στο Γράφημα 3.5, όπου φαίνεται ότι ο πυρήνας ιζήματος αποτελείται σχεδόν εξολοκλήρου από χονδρόκοκκο υλικό (sand) (μέγεθος κόκκου > 63  $\mu\text{m}$ ) σε ποσοστό άνω του 97%, ενώ το λεπτόκοκκο υλικό βρίσκεται σε ποσοστά μικρότερα του 2.7%. Οι ποσοστιαίες τιμές των κατηγοριών άμμου-ιλύος βρίσκονται στο Παράρτημα 1, στον Πίνακα Π1.



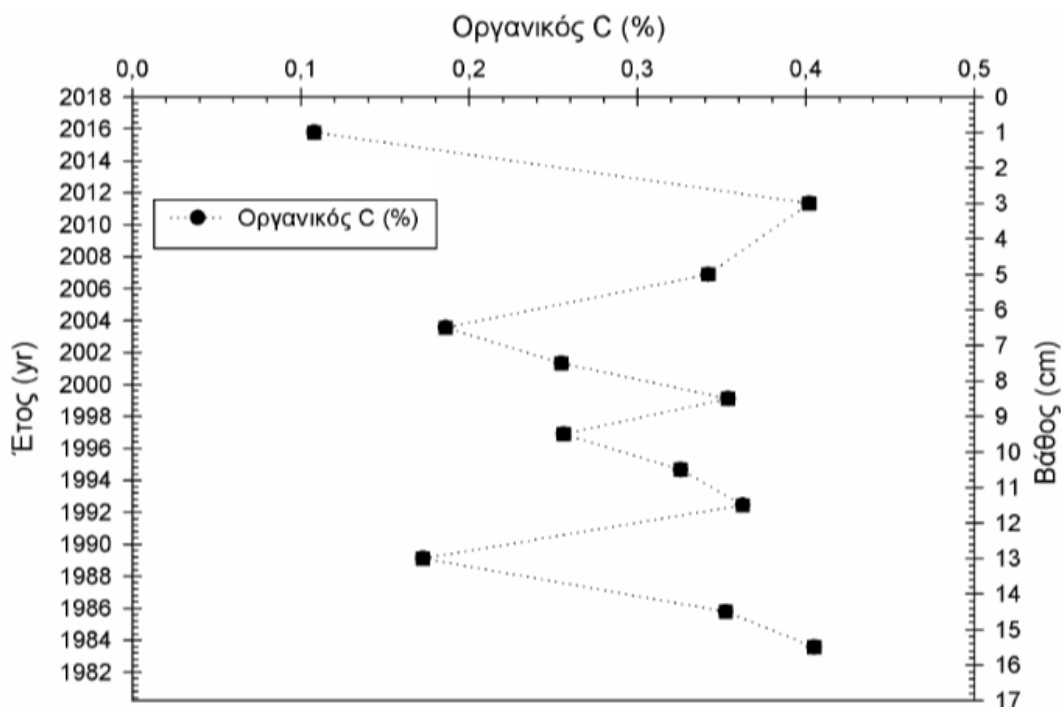
Γράφημα 3.5: Απεικόνιση ποσοστών (%) χονδρόκοκκου – λεπτόκοκκου υλικού που αντιστοιχεί στα δείγματα του πυρήνα ιζήματος.

Η μεγάλη περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκο υλικό οφείλεται στο ότι τα δείγματα του πυρήνα που αναλύθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία βρίσκονται σε σχετικά κοντινή απόσταση με την ακτή (~600m), σε όχι ιδιαίτερα μεγάλο βάθος (~6m) και μόλις 4m εκτός του κρατήρα (ανατολικά), οπότε οι επιρροές που δέχονται είναι πολύ μεγαλύτερες (π.χ. ρεύματα, φερτά υλικά από ποτάμια που εκβάλουν στον κόλπο κ.α.), σε σχέση με τα μακρινότερα σημεία και μεγαλύτερα βάθη τα οποία είναι λιγότερο εκτεθειμένα σε γεγονότα.

### 3.3.2 Αποτελέσματα προσδιορισμού του οργανικού άνθρακα στον πυρήνα ιζήματος

Ο οργανικός άνθρακας (TOC) είναι μια από τις παραμέτρους που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, δίνοντας πληροφορίες σχετικά με την παρουσία οργανικών συστατικών στο ίζημα.

Ο οργανικός άνθρακας βρίσκεται σε μικρό ποσοστό στο ίζημα του πυρήνα με το εύρος τιμών να είναι από 0.1 % στην επιφάνεια του πυρήνα (δείγμα THC1) έως 0.4 % (δείγμα THC2 και THC12). Οι ποσοστιαίες τιμές των συγκεντρώσεων από τις δύο ογκομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο για καθένα από τα δείγματα για τον οργανικό άνθρακα και ο μέσος όρος των δυο αυτών συγκεντρώσεων, διαδικασία η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου προσδιορισμού του οργανικού άνθρακα, βρίσκονται στο Παράρτημα 2, στον Πίνακα Π3, με το τυφλό δείγμα που παράχθηκε στην ογκομέτρηση να αντιστοιχεί σε  $V_1=21.9$  ml.



Γράφημα 3.6: Γράφημα απεικόνισης του μέσου όρου των συγκεντρώσεων του οργανικού άνθρακα στα δείγματα του πυρήνα.

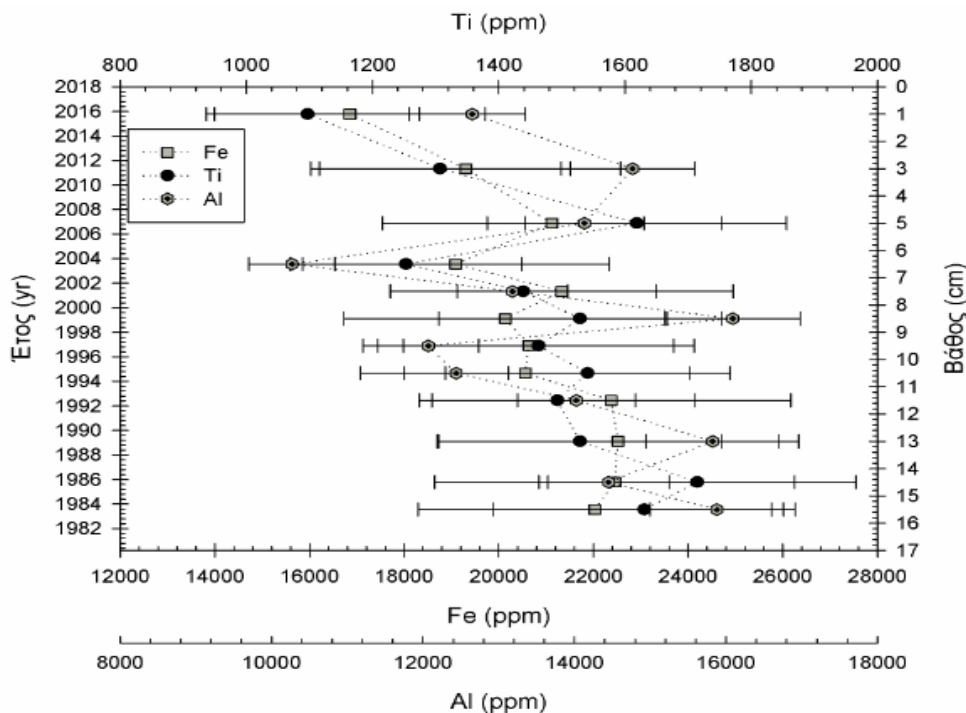
Από το Γράφημα 3.6 φαίνεται η συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα, ο οποίος αν και βρίσκεται σε πολύ μικρά ποσοστά, παρουσιάζει κάποιες διακυμάνσεις εμφανίζοντας ελάχιστα και μέγιστα όπως φαίνεται, κατά μήκος του πυρήνα. Τα ποσοστά του οργανικού άνθρακα είναι πάρα πολύ χαμηλά, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι ο

πυρήνας απαρτίζεται από χονδρόκοκκο υλικό το οποίο δεν τον συγκρατεί, σε αντίθεση με περισσότερο λεπτόκοκκα ιζήματα.

### 3.3.3 Συγκεντρώσεις κύριων στοιχείων στον πυρήνα ιζήματος

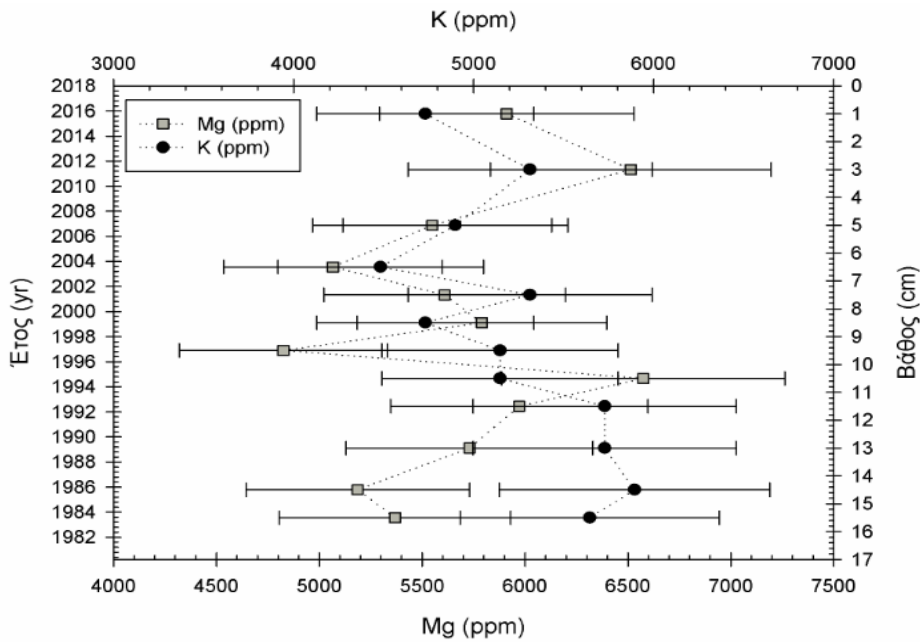
Οι συγκεντρώσεις των κύριων στοιχείων μετρήθηκαν μέσω της μεθόδου XRF, το σφάλμα της οποίας υπολογίστηκε με βάση τις τιμές που αναφέρονται στο πρωτόκολλο επικύρωσης της μεθόδου που έχει γίνει από το Εργαστήριο Ιζηματολογίας (PEM-08, 2017). Τα κύρια στοιχεία τα οποία αναλύθηκαν στην παρούσα μελέτη ήταν τα εξής: άργιλος Al, πυρίτιο Si, φώσφορος P, κάλιο K, ασβέστιο Ca, τιτάνιο Ti, σίδηρος Fe, νάτριο Na, μαγνήσιο Mg, θείο S, μαγγάνιο Mn και βάριο Ba.

Στα παρακάτω Γραφήματα (3.7-3.12) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κύριων στοιχείων για τον πυρήνα ιζήματος, όπου στον αριστερό άξονα απεικονίζονται οι χρονολογίες όπως υπολογίστηκαν από τον ρυθμό ιζηματογένεσης και στον δεξιό άξονα απεικονίζονται τα αντίστοιχα βάθη. Όλα τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων (ppm) φαίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα 3, στον Πίνακα Π5.



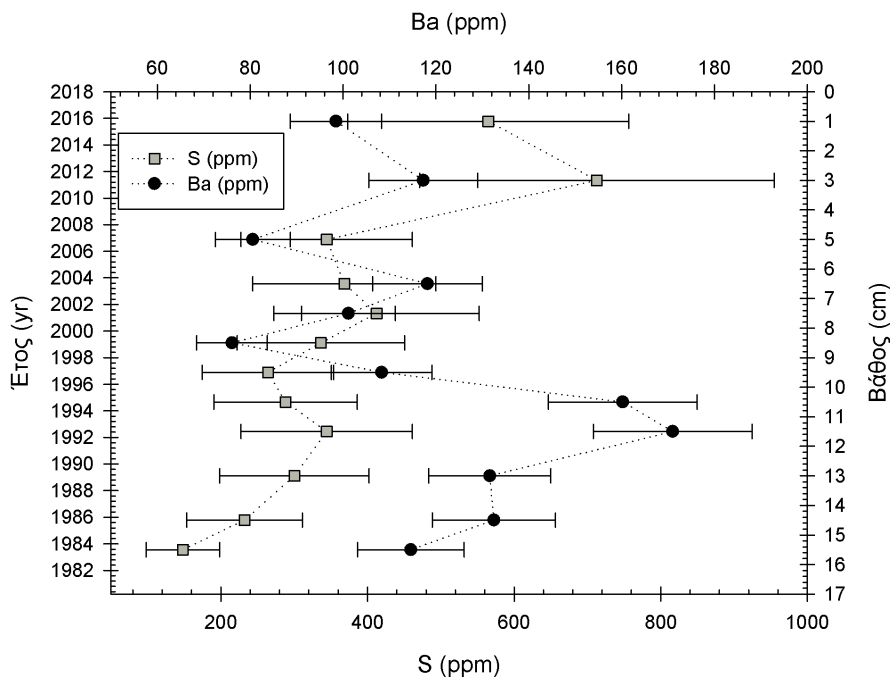
**Γράφημα 3.7:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων Fe, Ti και Al, συναρτήσει της χρονολόγησης και του βάθους στον πυρήνα ιζήματος.

Στο Γράφημα 3.7 παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία του Fe, Al και Ti, τα οποία δεν διαφοροποιούνται κατά βάθος και φαίνεται να έχουν μία ομοιογενή κατανομή, μέσα στα όρια των σφαλμάτων. Κάποιες κεντρικές τιμές διαφοροποιούνται μέσα στα όρια των σφαλμάτων και οριακά παρατηρούνται τοπικά μέγιστα στο Al και στο Ti στα σημεία 8.5 και 14.5 cm καθώς και τοπικό ελάχιστο στο Al στα 6.5 cm.



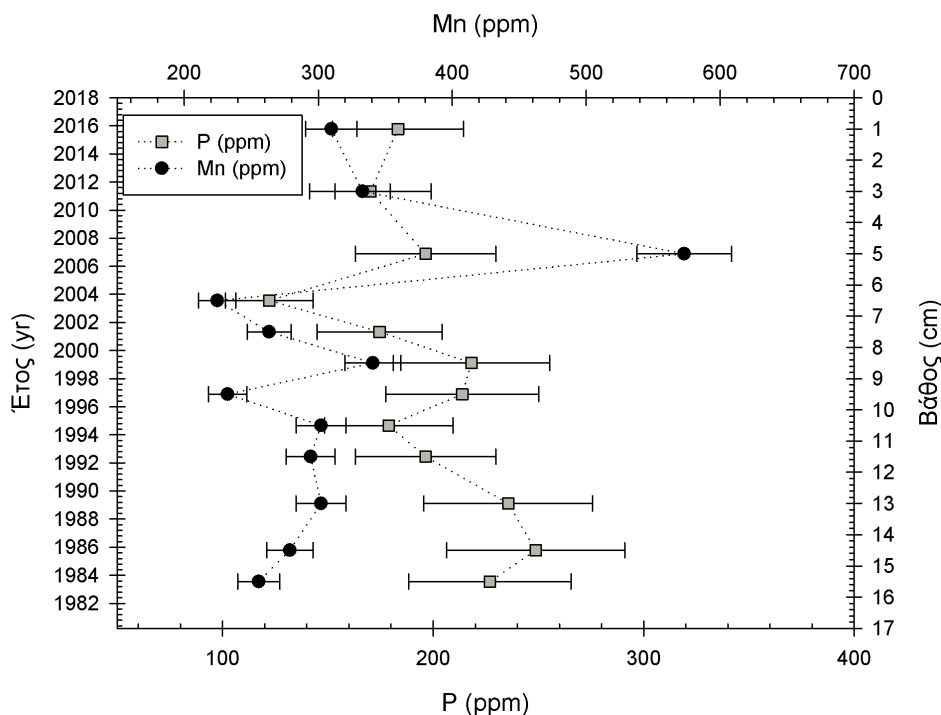
**Γράφημα 3.8:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων Mg και K, συναρτήσει της χρονολόγησης και του βάθους στον πυρήνα ιζήματος.

Στο Γράφημα 3.8 παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία του Mg και του K, τα οποία δεν διαφοροποιούνται κατά βάθος του πυρήνα έως τα 7.5 cm όπου φαίνεται να έχουν μία ομοιογενή κατανομή με μικρές διαφοροποιήσεις στις κεντρικές τιμές, μέσα στα όρια των σφαλμάτων. Από εκεί και έπειτα, τα κύρια στοιχεία φαίνεται να έχουν αντίθετη συμπεριφορά, με το μόνο σημείο στο οποίο τα δυο αυτά στοιχεία βρίσκονται εκτός των ορίων των σφαλμάτων να είναι εκείνο στα 14.5 cm. Οριακά παρατηρείται τοπικό μέγιστο στο Mg στα 10.5 cm καθώς και τοπικό ελάχιστο στα 9.5 cm.



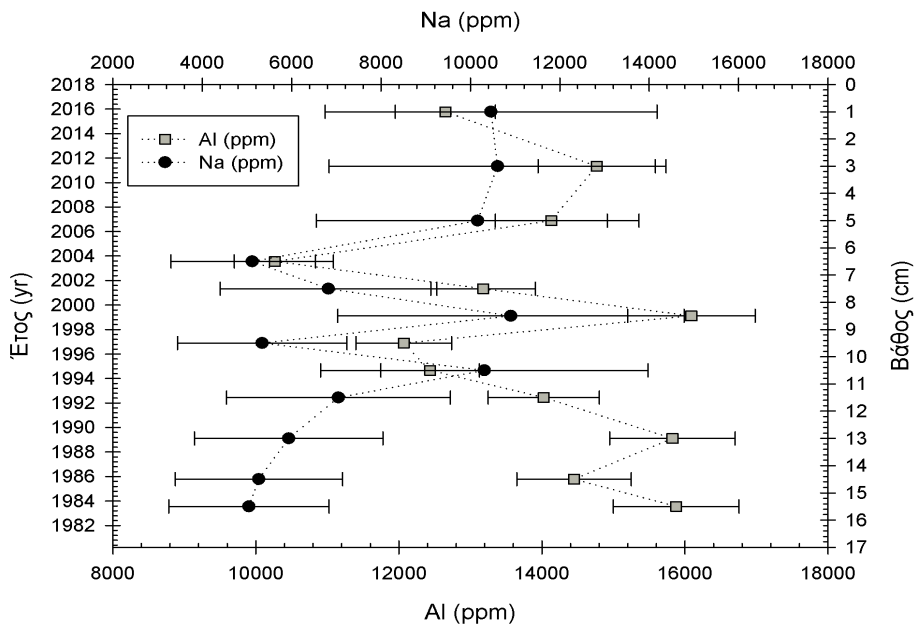
**Γράφημα 3.9:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων S και Ba, συναρτήσει της χρονολόγησης και του βάθους στον πυρήνα ιζήματος.

Στο Γράφημα 3.9 παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία του S και του Ba, τα οποία παρουσιάζουν ομοιογενή κατανομή στα 3 πρώτα σημεία με κάποιες διαφοροποιήσεις, μέσα στα όρια των σφαλμάτων. Από εκεί και πέρα, τα κύρια στοιχεία φαίνεται να έχουν ανομοιογενή κατανομή στα επόμενα 4 σημεία, ενώ έπειτα από τα 9.5 cm ενώ η κατανομή του S φαίνεται να ακολουθεί εκείνη του Ba, με τις τιμές των κύριων στοιχείων να βρίσκονται εκτός των ορίων των σφαλμάτων. Οριακά παρατηρείται τοπικό μέγιστο στο Ba στα 11.5 cm καθώς και τοπικό ελάχιστο στο S στα 15.5 cm..



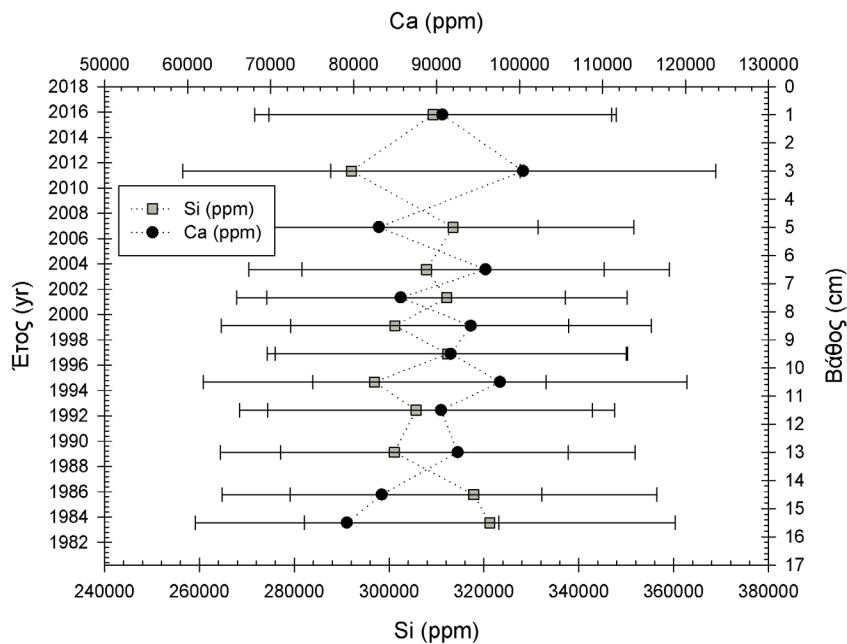
**Γράφημα 3.10:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων P και Mn, συναρτήσει της χρονολόγησης και του βάθους στον πυρήνα ιζημάτος.

Στο Γράφημα 3.10 παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία του P και του Mn, τα οποία παρουσιάζουν ομοιογενή κατανομή, με ορισμένες εξαιρέσεις στα σημεία 1 και 9,5 cm, ενώ εμφανίζουν διαφοροποιήσεις κατά βάθος του πυρήνα, με τις τιμές των κύριων αυτών στοιχείων να βρίσκονται εκτός των ορίων των σφαλμάτων στα περισσότερα σημεία. Έπειτα από τα 10.5 cm ενώ η κατανομή του S φαίνεται να ακολουθεί εκείνη του Ba, οι τιμές των κύριων στοιχείων βρίσκονται όλες εκτός των ορίων των σφαλμάτων. Παρατηρείται τοπικό μέγιστο στο Mn στα 5 cm καθώς και τοπικό ελάχιστο στα 6.5 cm.



**Γράφημα 3.11:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων Al και Na, συναρτήσει της χρονολόγησης και του βάθους στον πυρήνα ιζήματος.

Στο Γράφημα 3.11 παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία του Al και του Na, τα οποία δεν διαφοροποιούνται κατά βάθος του πυρήνα έως τα 10.5 cm όπου φαίνεται να έχουν μία ομοιογενή κατανομή με μικρές διαφοροποιήσεις στις κεντρικές τιμές, μέσα στα όρια των σφαλμάτων εκτός από τα σημεία 5 και 7. Από εκεί και έπειτα, τα κύρια στοιχεία φαίνεται να έχουν αντίθετη συμπεριφορά, με τις τιμές των κύριων στοιχείων να βρίσκονται εκτός των ορίων των σφαλμάτων. Παρατηρείται τοπικό μέγιστο στον Al στα 8.5 cm καθώς και τοπικό ελάχιστο στο Na στα 15.5 cm..

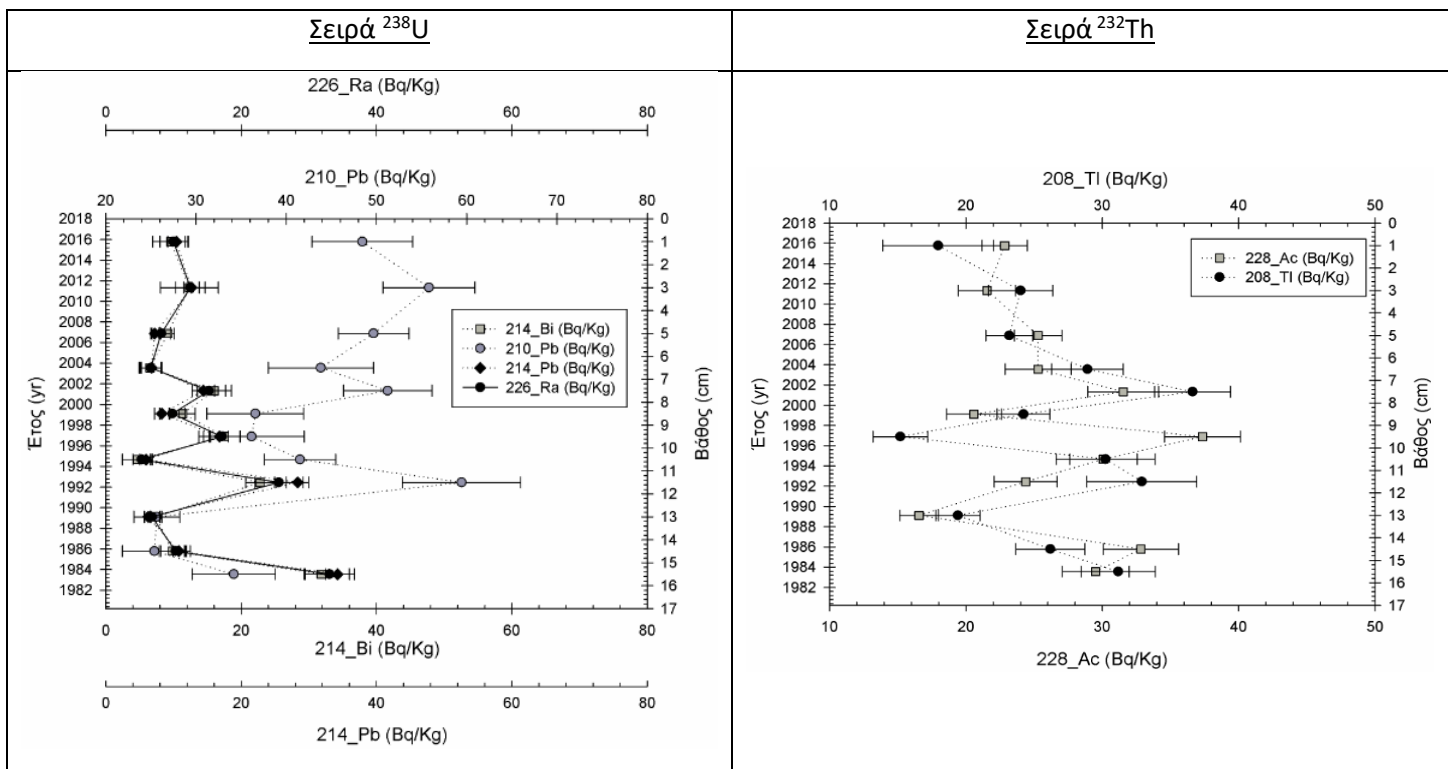


**Γράφημα 3.12:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων Si και Ca, συναρτήσει της χρονολόγησης και του βάθους στον πυρήνα ιζήματος.

Στο Γράφημα 3.12 παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία Si και Ca, τα οποία δεν διαφοροποιούνται κατά βάθος και φαίνεται να έχουν μία σχετικά ομοιογενή κατανομή με μικρές διακυμάνσεις, μέσα στα όρια των σφαλμάτων. Κάποιες κεντρικές τιμές διαφοροποιούνται μέσα στα όρια των σφαλμάτων και οριακά παρατηρείται τοπικό μέγιστο στο Ca στο σημείο των 3 cm καθώς και τοπικά ελάχιστα στο Ca στα 15.5 cm και στο Si στα 3 cm.

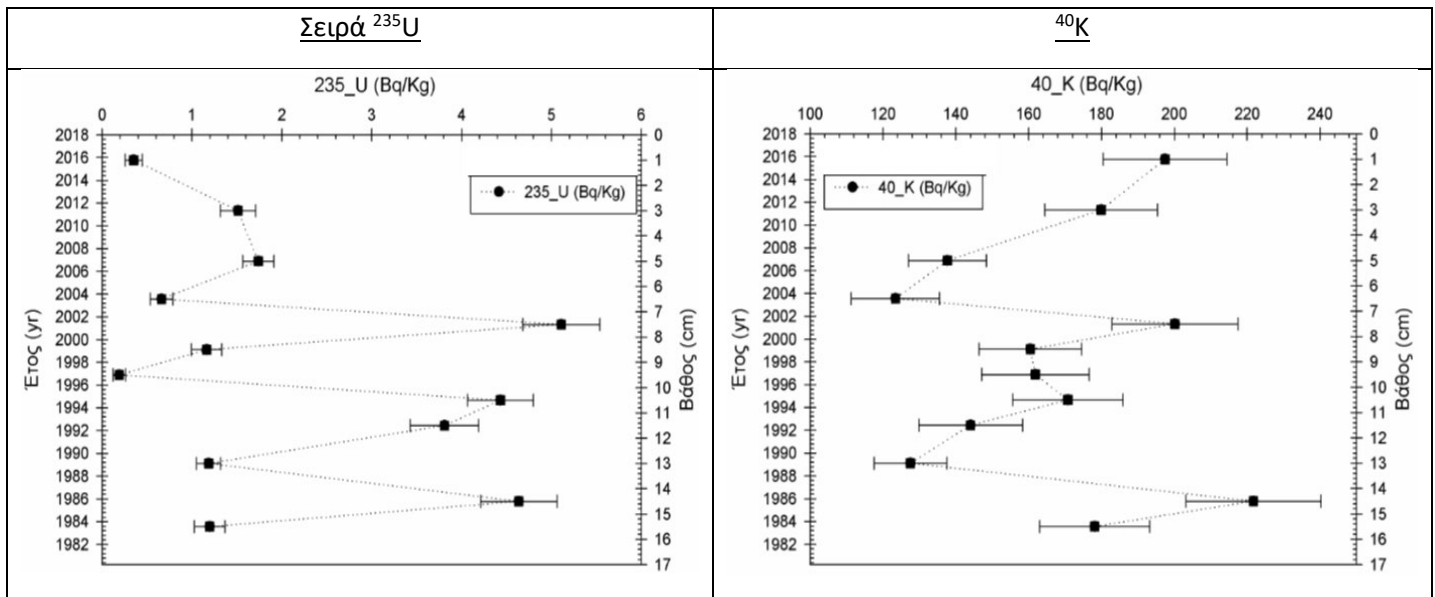
### 3.3.4 Συγκεντρώσεις ραδιενέργειας στον πυρήνα ιζήματος

Οι μετρήσεις ραδιενέργειας στα υπό εξέταση δείγματα του πυρήνα πραγματοποιήθηκαν στο ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. με ανιχνευτή ΗΡGe. Από τις μετρήσεις προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις ενεργότητας (σε Bq/kg ξηρού δείγματος) των φυσικών ραδιονουκλιδίων στη στήλη του ιζήματος, όπως επίσης και οι συγκεντρώσεις στο προφίλ του ιζήματος για το τεχνητό  $^{137}\text{Cs}$ . Συγκεκριμένα, τα  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  και  $^{210}\text{Pb}$  από την σειρά του  $^{238}\text{U}$ , τα  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{208}\text{Tl}$  από την σειρά  $^{232}\text{Th}$ , το  $^{235}\text{U}$  και το  $^{40}\text{K}$ . Στα Γραφήματα 3.13 και 3.14 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις ενεργότητας για τον πυρήνα ιζήματος, όπου στον αριστερό άξονα απεικονίζονται οι χρονολογίες όπως υπολογίστηκαν από τον ρυθμό ιζηματογένεσης και στον δεξιό άξονα απεικονίζονται τα αντίστοιχα βάθη.



Γράφημα 3.13: Κατακόρυφη διασπορά φυσικών ραδιονουκλιδίων της σειράς  $^{238}\text{U}$  και της σειράς  $^{232}\text{Th}$  στον πυρήνα ιζήματος.

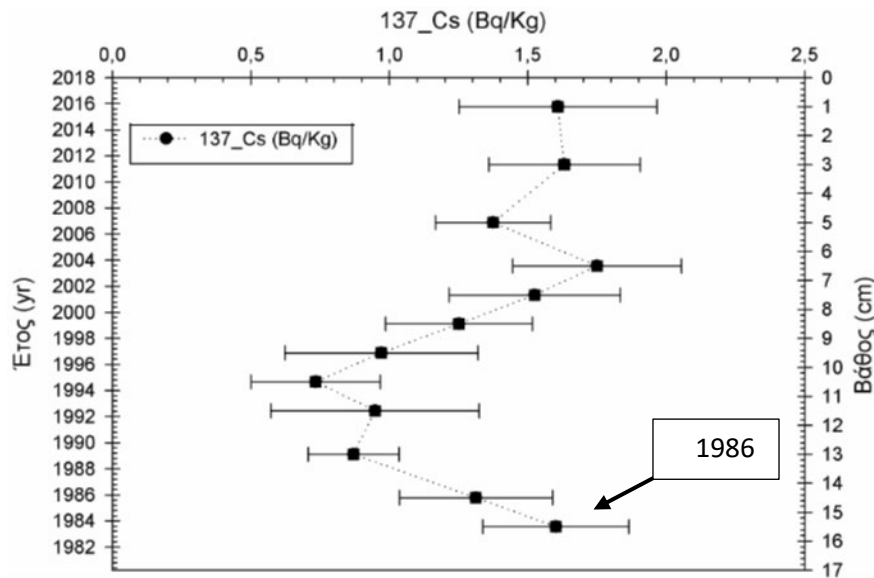




Γράφημα 3.14: Κατακόρυφη διασπορά φυσικών ραδιοουκλιδίων της σειράς  $^{238}\text{U}$  και του  $^{40}\text{K}$  στον πυρήνα ιζήματος.

Οι τιμές των ραδιοουκλιδίων της σειράς του  $^{238}\text{U}$ , με εξαίρεση το  $^{210}\text{Pb}$ , ήταν σε καλή ισορροπία μεταξύ τους με τις συγκεντρώσεις να παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις σε όλη την στήλη του ιζήματος, όντας σχετικά σταθερές. Οι τιμές των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  και  $^{214}\text{Bi}$  από το Γράφημα 3.13 φαίνεται να είναι παρόμοιες μεταξύ τους κατά βάθος του πυρήνα, με τις μικρές διαφοροποιήσεις που υπάρχουν να είναι μέσα στα όρια των σφαλμάτων. Οι τιμές του  $^{226}\text{Ra}$  κυμαίνονταν από  $5.31 \pm 1.29$  έως  $33.04 \pm 3.68$  Bq/kg, του  $^{214}\text{Pb}$  από  $6.0 \pm 0.9$  έως  $34.2 \pm 1.7$  Bq/kg, του  $^{214}\text{Bi}$  από  $4.7 \pm 2.2$  έως  $31.8 \pm 2.3$  Bq/kg ενώ του  $^{210}\text{Pb}$  από  $25.4 \pm 3.6$  έως  $59.4 \pm 6.5$  Bq/kg, τιμές σχεδόν διπλάσιες εξαιτίας του πλεονάσματος που υπάρχει στον  $^{210}\text{Pb}$ . Οι τιμές των ραδιοουκλιδίων της σειράς του  $^{232}\text{Th}$ , παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή κατά βάθος του πυρήνα ενώ βρίσκονται σε σχετικά καλή ισορροπία στο μεγαλύτερό τους μέρος με αρκετές διακυμάνσεις και διαφοροποιήσεις εντός των ορίων των σφαλμάτων, με εξαίρεση στα σημεία των 9.5, 11.5 και 14.5 cm. Οι τιμές του  $^{228}\text{Ac}$  κυμαίνονται από  $16.6 \pm 1.4$  έως  $37.3 \pm 2.8$  Bq/kg ενώ του  $^{208}\text{Tl}$  από  $15.2 \pm 2.0$  έως  $36.6 \pm 2.8$  Bq/kg τιμές παραπλήσιες όπως και ήταν αναμενόμενο όντας στην ίδια ραδιενεργό σειρά. Η μέση τιμή του  $^{235}\text{U}$  βρέθηκε στα  $2.2 \pm 0.2$  Bq/kg, με το εύρος τιμών να κυμαίνεται από  $0.2 \pm 0.1$  έως  $5.1 \pm 0.4$  Bq/kg, ενώ το  $^{40}\text{K}$  παρουσιάζει μέση τιμή στα  $166.9 \pm 14.5$  Bq/kg με εύρος τιμών από  $123.4 \pm 12.1$  έως  $221.7 \pm 18.5$  Bq/kg.

Οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν στο προφίλ του ιζήματος για το τεχνητό  $^{137}\text{Cs}$  (Γράφημα 3.15) κυμαίνονται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα και παρουσιάζουν εύρος τιμών από  $0.7 \pm 0.2$  έως  $1.7 \pm 0.3$  Bq/kg. Τα μέγιστα τιμών τα οποία εμφανίζονται αποδίδονται το πρώτο στο σημείο των 6.5 cm σε κάποιο ξέπλυμα της ευρύτερης περιοχής έπειτα από κάποιο έντονο γεγονός (π.χ. πλημμύρα) και το δεύτερο, στο βάθος των 15.5 cm στο ατύχημα του Chernobyl το 1986, όπου στην περίπτωση που υπήρχαν ακόμα 2-3 cm ιζήματος θα ήταν περισσότερο εμφανής η κορυφή που σχηματίζεται και τείνει να λάβει υψηλότερη τιμή.



Γράφημα 3.15: Κατακόρυφη διασπορά του  $^{137}\text{Cs}$  στον πυρήνα ιζήματος.

Όλα τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων της ραδιενέργειας (φυσικής και τεχνητής) στον πυρήνα ιζήματος φαίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα 4, στον Πίνακα Π9.

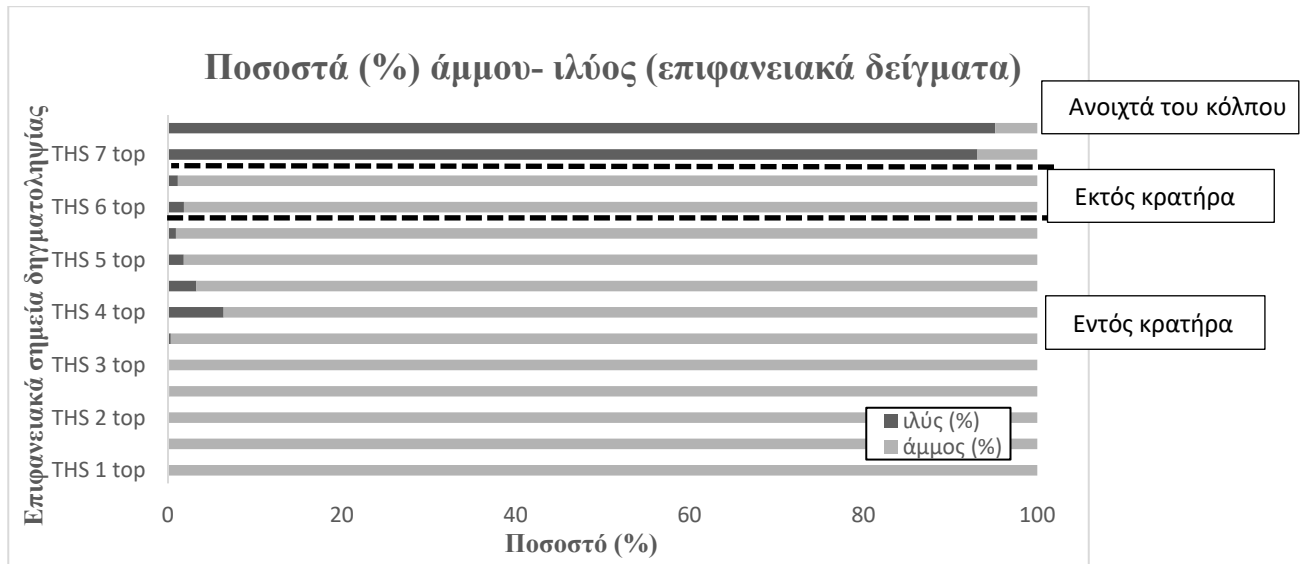
### 3.4 Αποτελέσματα των επιφανειακών ιζημάτων

#### 3.4.1 Αποτελέσματα κοκκομετρίας επιφανειακών ιζημάτων

Λήφθηκαν επιφανειακά δείγματα σε τρεις διαφορετικές περιοχές, (α) ακριβώς πάνω από την υδροθερμική πηγή, εντός του κρατήρα για τα οποία θα χρησιμοποιηθεί η ονοματολογία THS1 top- THS5 bot (β) εκτός του κρατήρα (στη θέση που λήφθηκε ο πυρήνας), το οποίο ονοματίστηκε THS6 top-bot και (γ) σε μεγάλη απόσταση από τη πηγή, ανοιχτά του κόλπου, όπου χρησιμοποιήθηκε η ονοματολογία THS7 top-bot. Το πιο απομακρυσμένο σημείο από την υδροθερμική πηγή (THS7) λήφθηκε ως σημείο αναφοράς το οποίο αντιπροσωπεύει την γενική κατάσταση του Κόλπου της Γέρας.

Στη περίπτωση των επιφανειακών δειγμάτων, η διαφορά χονδρόκοκκου – λεπτόκοκκου υλικού είναι ακόμα πιο έντονη απ' ότι στα δείγματα του πυρήνα (THC1-THC12). Εδώ τα ποσοστά του χονδρόκοκκου αγγίζουν ακόμα και το 100% έναντι 0% του λεπτόκοκκου υλικού σε ορισμένα δείγματα. Το μεγαλύτερο ποσοστό ιλύος (mud) παρατηρείται στο THS4 top και το αμέσως επόμενο στο THS4 bot, δείγμα το οποίο λήφθηκε από το πρανές του κρατήρα και αναμενόταν να εντοπιστούν ποσοστά άμμου καθώς από τον μακροσκοπικό ακόμα χαρακτηρισμό, φάνηκε να αποτελείται από αμμούχο ιλύ προς ιλύ με αρκετά βιογενή θραύσματα και έντονη μυρωδιά λόγω των βιογενών. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση της κοκκομετρίας απεικονίζονται στο Γράφημα 3.16, όπου φαίνεται ότι τα επιφανειακά δείγματα που λήφθηκαν εντός και εκτός του κρατήρα αποτελούνται σχεδόν εξολοκλήρου από χονδρόκοκκο υλικό (sand) (μέγεθος κόκκου > 63  $\mu\text{m}$ ) σε ποσοστά μεγαλύτερα από 93.6% και ίσο με 98.5% αντίστοιχα, ενώ το λεπτόκοκκο υλικό βρίσκεται σε ποσοστά μικρότερα των 6.4% και ίσο με 1.5% αντίστοιχα (εντός

και εκτός κρατήρα). Όσον αφορά το επιφανειακό δείγμα το οποίο λήφθηκε ανοιχτά του κόλπου (THS7) φαίνεται να απαρτίζεται στο μεγαλύτερο μέρος του σε ποσοστό 94.1% από λεπτόκοκκο υλικό και 5.9% από χονδρόκοκκο. Οι ποσοστιαίες τιμές των κατηγοριών άμμου-ιλύος βρίσκονται στο Παράρτημα 1, στον Πίνακα Π2.



**Γράφημα 3.16:** Απεικόνιση ποσοστών (%) χονδρόκοκκου – λεπτόκοκκου υλικού που αντιστοιχεί στα επιφανειακά ιζήματα εντός κρατήρα (top-bottom) και το ανώτερο και κατώτερο σημείο των δύο πυρήνων (εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου).

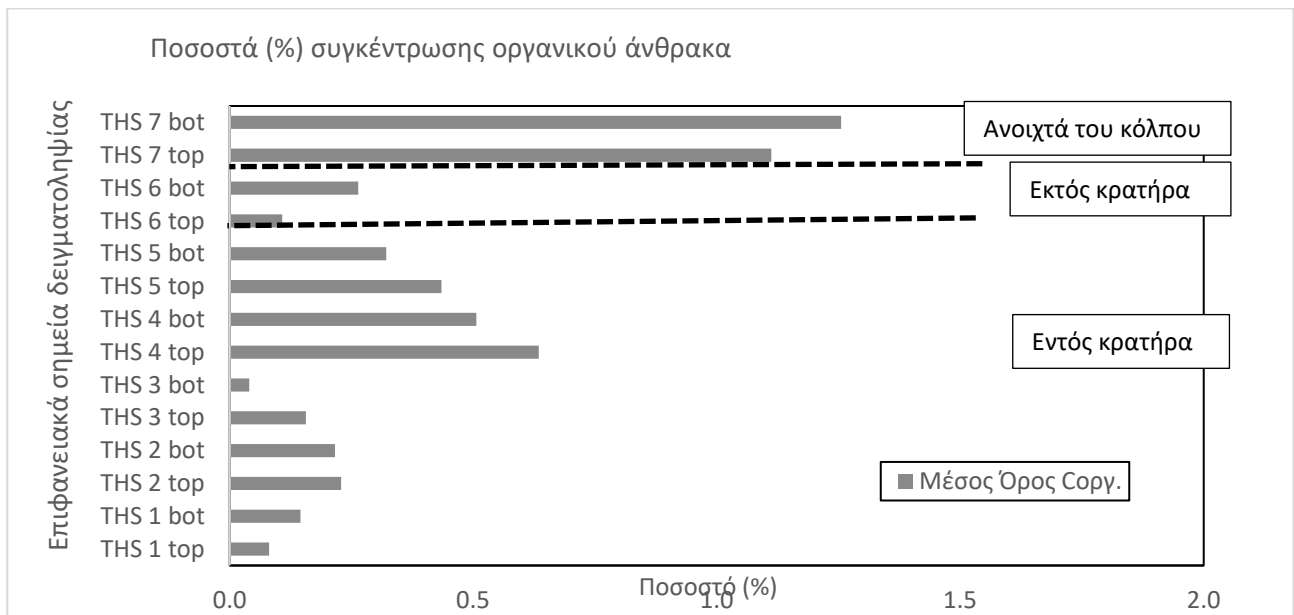
Όσον αφορά στα δείγματα που λήφθηκαν εντός του κόλπου -πάνω από τη πηγή ανάβλυσης-, είναι αναμενόμενη η χονδρόκοκκη σύστασή τους αρχικά διότι δέχονται επιρροές οι οποίες είναι αρκετά έντονες (π.χ. ρεύματα, φερτά υλικά από ποτάμια που εκβάλουν στον κόλπο κ.α.) εξαιτίας της σχετικά μικρής απόστασης από την ακτή (~600m) και του σχετικά μικρού βάθους δειγματοληψίας (~6m) σε σχέση με το δείγμα που λήφθηκε ανοιχτά του κόλπου (βάθος ~16m) το οποίο είναι λιγότερο εκτεθειμένο σε γεγονότα. Επιπλέον ισχύει ότι λόγω της συνεχής ανάβλυσης, το ίζημα δεν ηρεμεί με αποτέλεσμα πέρα από το ήδη υπάρχον που βρίσκεται σε συνεχή κίνηση, να προστίθεται μονίμως καινούριο υλικό το οποίο λόγω του ότι είναι κοντά στην ακτή φέρει περισσότερο χονδρόκοκκο ίζημα χωρίς να αφήνει το λεπτόκοκκο να κατακάθεται όντας έτσι αυτό σε μόνιμη αιώρηση. Στο πρηνές μάλιστα (THS4 top-bot) που βρέθηκε μεγαλύτερη ποσότητα λεπτόκοκκου απ' ότι στα υπόλοιπα επιφανειακά, οφείλεται στο ότι εκεί κυρίως κατακάθεται και συσσωρεύεται το "βαρύ" ίζημα μαζί με το λεπτόκοκκο που παγιδεύει, λόγω των έντονων διεργασιών όπου εξαιτίας της ανάβλυσης του νερού νέα ιζήματα έρχονται και κατακάθονται στην επιφάνεια.

### 3.4.2 Αποτελέσματα προσδιορισμού οργανικού άνθρακα στα επιφανειακά δείγματα

Όπως προαναφέρθηκε (Υποκεφάλαιο 3.3.2) ο οργανικός άνθρακας (TOC) παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη παρουσία οργανικών συστατικών στο ίζημα.

Ο οργανικός άνθρακας βρίσκεται σε μικρά ποσοστά στα επιφανειακά δείγματα, όπως και στον πυρήνα ιζήματος (Υποκεφάλαιο 3.3.2), με το εύρος τιμών να κυμαίνεται από 0.04%, τιμή η οποία αντιστοιχεί στο επιφανειακό δείγμα

THS 3 bot το οποίο λήφθηκε εντός του κρατήρα (ακριβώς πάνω από την πηγή ανάβλυσης), έως 1.26% τιμή που αντιστοιχεί στο THS 7 bot, δείγμα που λήφθηκε ανοιχτά του κόλπου.



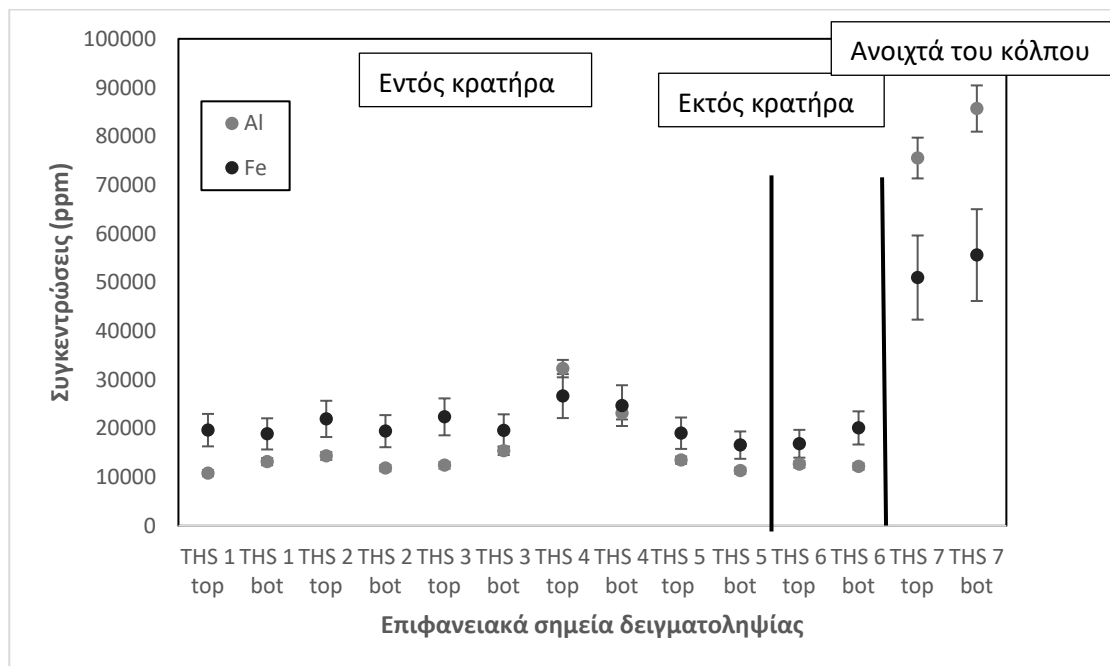
**Γράφημα 3.17:** Γράφημα απεικόνισης του μέσου όρου των συγκεντρώσεων του οργανικού άνθρακα στα επιφανειακά ιζήματα εντός κρατήρα (top-bottom) και το ανώτερο και κατώτερο σημείο των δύο πυρήνων (εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου).

Σύμφωνα με τους Förstner και Wittmann (1991) και τους Salomons και Förstner (1983), το λεπτόκοκκο υλικό παρουσιάζει μεγάλη συσχέτιση με τη συγκέντρωση της οργανικής ύλης ή του οργανικού άνθρακα, με τις επιφανειακές επιστρώσεις να έχουν την τάση να συγκεντρώνονται σε αυτό (το λεπτόκοκκο υλικό). Ο λόγος λοιπόν που το δείγμα THS 3 bot παρουσιάζει ελάχιστη τιμή συγκέντρωσης TOC είναι εξαιτίας των αναβλύσεων της υδροθερμικής πηγής, όπου το λεπτόκοκκο υλικό στο οποίο θα 'προσκολούνταν' ο οργανικός άνθρακας, μονίμως απομακρύνεται από τον κρατήρα ή αιωρείται (για αυτό και η μεγάλη θολερότητα στην εκεί περιοχή) με αποτέλεσμα να μην κατακάθεται και μαζί με αυτό να απομακρύνεται και ο οργανικός άνθρακας που 'προσκολλάται' σε αυτό. Αντίστοιχα το επιφανειακό δείγμα THS 7 bot (μέγιστη τιμή TOC) αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος του από λεπτόκοκκο υλικό με αποτέλεσμα τα οργανικά συστατικά να προσκολλώνται με μεγαλύτερη ευκολία στις επιφάνειές του, εξού και το αντίστοιχο αποτέλεσμα. Οι ποσοστιαίες τιμές των συγκεντρώσεων από τις δύο ογκομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο για καθένα από τα δείγματα για τον οργανικό άνθρακα και ο μέσος όρος των δυο αυτών συγκεντρώσεων –οι οποίες απεικονίζονται στο Γράφημα 3.17-, διαδικασία η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου προσδιορισμού του οργανικού άνθρακα, βρίσκονται στο Παράρτημα 2, στον Πίνακα Π4, με το τυφλό δείγμα που παράχθηκε στην ογκομέτρηση να αντιστοιχεί σε  $V_1=21.9$  ml.

### 3.4.3 Συγκεντρώσεις κύριων στοιχείων στα επιφανειακά ιζήματα

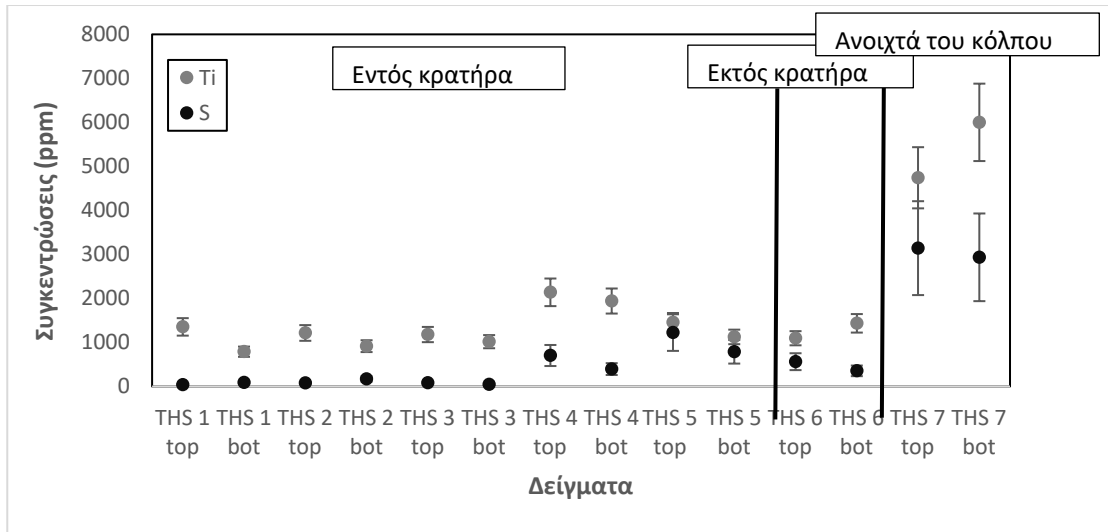
Όπως προαναφέρθηκε (Υποκεφάλαιο 3.3.3) οι συγκεντρώσεις των κύριων στοιχείων μετρήθηκαν μέσω της μεθόδου XRF.

Στα παρακάτω Γραφήματα (3.18-3.22) απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις των κύριων στοιχείων που μετρήθηκαν στα επιφανειακά δείγματα, τα οποία λήφθηκαν εντός – εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου. Όλα τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων (ppm) παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα 3, στον Πίνακα Π7.



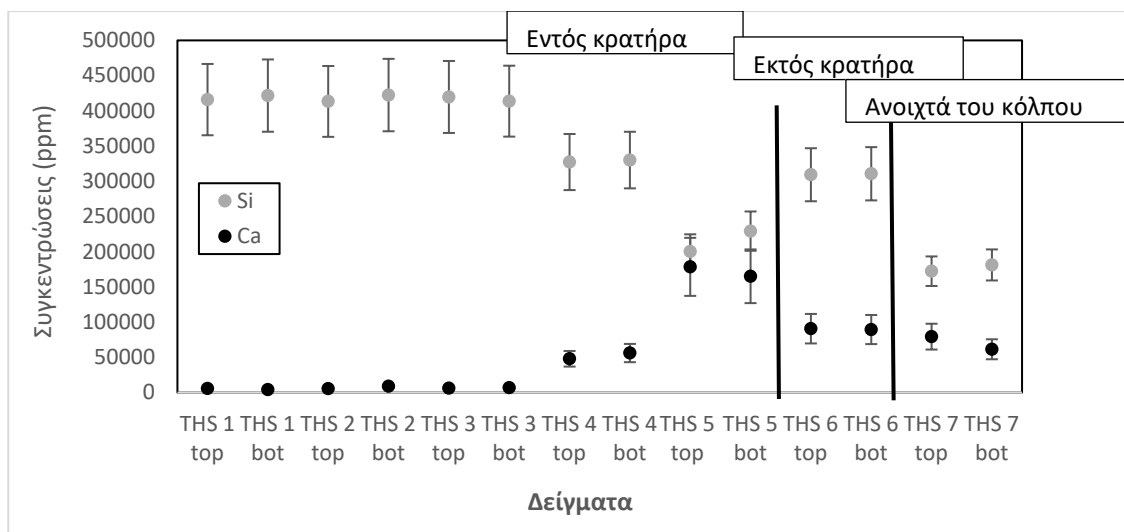
**Γράφημα 3.18:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων Al και Fe στα επιφανειακά ιζήματα εντός κρατήρα (top-bottom) και το ανώτερο και κατώτερο σημείο των δύο πυρήνων (εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου).

Οι συγκεντρώσεις του Al και Fe παρουσιάζουν παρόμοιες κατανομές σε όλα τα επιφανειακά δείγματα, όπου εντός και εκτός κρατήρα εμφανίζουν μία σταθερή τιμή της τάξης του 13710 και 19921 ppm αντιστοίχως (βγάζοντας εκτός το δείγμα THS 4 top –παρουσιάζει αντίθετη συμπεριφορά-). Οι μέγιστες συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών παρατηρούνται στο σημείο αναφοράς (δηλαδή ανοιχτά του κόλπου της Γέρας), μιας και αυτά τα δείγματα χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά ιλύος (~ 95%) σε σχέση με τα υπόλοιπα επιφανειακά δείγματα τα οποία είναι κατά κύριο λόγο αμμώδη (άνω του 93.6 %). Τέλος, κάποια τοπικά μέγιστα στις συγκεντρώσεις των προαναφερθέντων στοιχείων εμφανίζονται στο πρανές της υδροθερμικής πηγής (σημείο THS 4) και μπορεί να οφείλονται τόσο στον οργανικό άνθρακα (0.5-0.6%) όσο και στην παρουσία ιλύος (4-6%) στο σημείο αυτό σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα που βρίσκονται εντός-εκτός κρατήρα. Οι αυξημένες τιμές (συγκεντρώσεις μετάλλων, οργανικού άνθρακα και ιλύος) στο πρανές σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία εντός-εκτός κρατήρα, μπορεί να οφείλονται σε φαινόμενα ανάδευσης και κατακρήμνισης υλικού από την υδροθερμική πηγή.



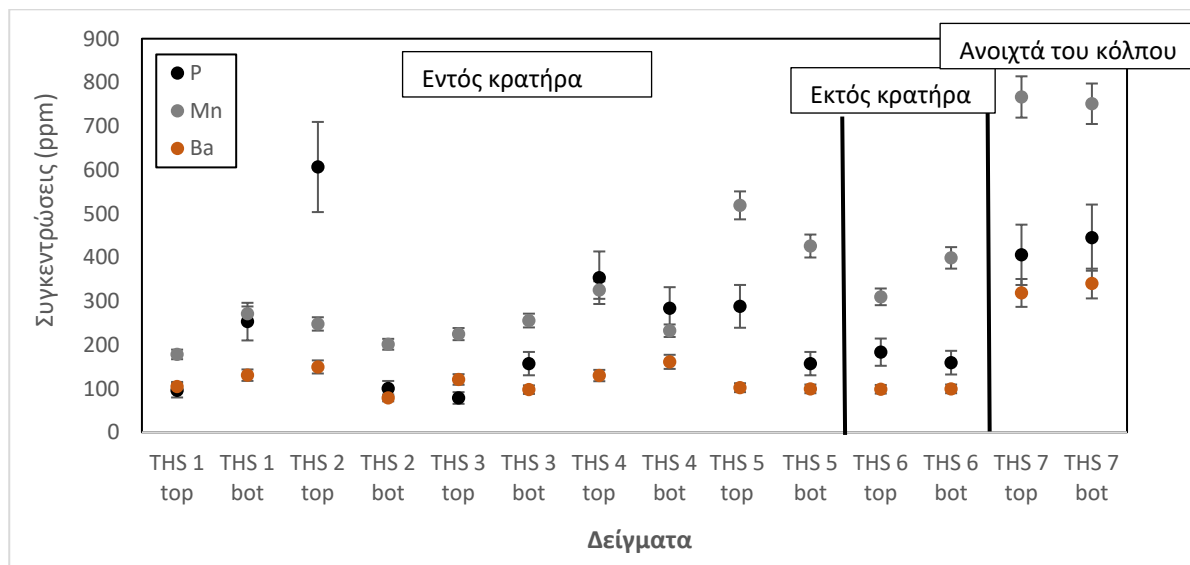
**Γράφημα 3.19:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων Ti και S στα επιφανειακά ιζήματα εντός κρατήρα (top-bottom) και το ανώτερο και κατώτερο σημείο των δύο πυρήνων (εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου).

Οι συγκεντρώσεις των Ti και S παρουσιάζουν παρόμοιες κατανομές σε όλα τα επιφανειακά δείγματα, με εκείνα εντός και εκτός κρατήρα να εμφανίζουν μία σταθερή τιμή της τάξης του 1307 και 379 ppm αντιστοίχως. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών παρατηρούνται στο σημείο αναφοράς (δηλαδή ανοιχτά του κόλπου της Γέρας), μιας και αυτά τα δείγματα χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά ιλύος (~ 95%) σε σχέση με τα υπόλοιπα επιφανειακά δείγματα τα οποία είναι κατά κύριο λόγο αμμώδη (άνω του 93.6 %). Τοπικό μέγιστο στη συγκέντρωση του Ti εμφανίζεται στο πρανές της υδροθερμικής πηγής (σημείο THS 4) και μπορεί να οφείλονται τόσο στον οργανικό άνθρακα (0.5-0.6%) όσο και στην παρουσία ιλύος (4-6%) στο σημείο αυτό σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα που βρίσκονται εντός-εκτός κρατήρα. Αντίστοιχα το S εμφανίζει τοπικό μέγιστο ακριβώς δίπλα από την υδροθερμική πηγή (σημείο THS 5). Η αυξημένες τιμές (συγκεντρώσεις μετάλλων, οργανικού άνθρακα και ιλύος) στο πρανές σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία εντός-εκτός κρατήρα, μπορεί να οφείλονται σε φαινόμενα ανάδευσης και κατακρήμνισης υλικού από την υδροθερμική πηγή.



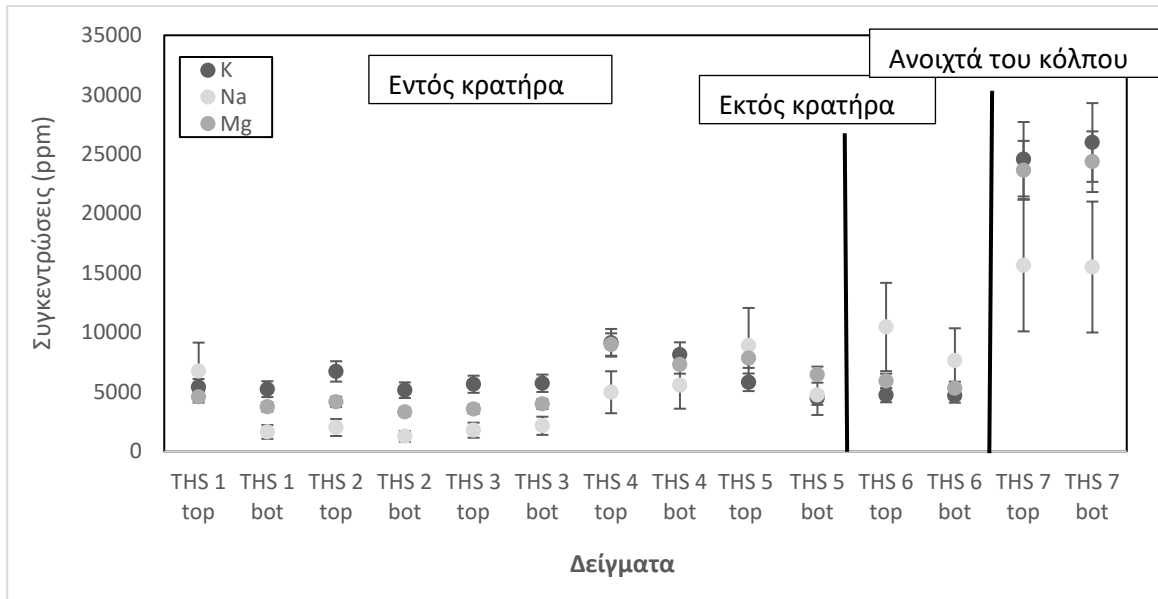
**Γράφημα 3.20:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων Si και Ca στα επιφανειακά ιζήματα εντός κρατήρα (top-bottom) και το ανώτερο και κατώτερο σημείο των δύο πυρήνων (εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου).

Οι συγκεντρώσεις των Si και Ca παρουσιάζουν αντίθετες κατανομές σε όλα τα επιφανειακά δείγματα εντός και εκτός κρατήρα χωρίς να εμφανίζουν κάποια σταθερή τιμή, ενώ το σημείο αναφοράς παρουσιάζει ελάχιστες συγκεντρώσεις για το Si και σχετικά χαμηλές για το Ca. Τοπικό μέγιστο για το Si παρατηρείται στο δείγμα το οποίο λήφθηκε ακριβώς πάνω από την υδροθερμική πηγή (σημείο THS 2 bot) ενώ για το Ca ακριβώς δίπλα από την υδροθερμική πηγή (σημείο THS 5). Οι μέγιστες συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών πιθανώς να οφείλονται στο φαινόμενο της ανάβλυσης από την υδροθερμική πηγή όπου πραγματοποιείται συνεισφορά κύριων στοιχείων. Το Si υπάρχει σε μεγάλα ποσοστά στο φλοιό της Γης οπότε μέσω των αναβλύσεων ενισχύεται η παρουσία του, ιδίως ακριβώς πάνω από την πηγή (σημείο THS 2), ενώ το Ca εμφανίζει μέγιστο ακριβώς δίπλα από την πηγή το οποίο ενδεχομένως προκύπτει λόγω του ότι το υλικό που αναδύεται εξαιτίας των αναβλύσεων εναποτίθεται αρχικά στο επίπεδο που υπάρχει δίπλα στη πηγή (σημείο THS 5).



**Γράφημα 3.21:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων P, Mn και Ba στα επιφανειακά ιζήματα εντός κρατήρα (top-bottom) και το ανώτερο και κατώτερο σημείο των δύο πυρήνων (εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου).

Οι συγκεντρώσεις των P, Mn και Ba παρουσιάζουν παρόμοιες κατανομές σε όλα τα επιφανειακά δείγματα, όπου εντός και εκτός κρατήρα εμφανίζουν μία σταθερή τιμή της τάξης του 171, 284 και 111 ppm αντιστοίχως (βγάζοντας εκτός τα δείγματα THS 4 bot και THS 5 top –παρουσιάζουν αντίθετη συμπεριφορά– όπως επίσης εκτός είναι και το THS 2 top για τον P –μεγάλη απόκλιση). Οι μέγιστες συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών παρατηρούνται στο σημείο αναφοράς (δηλαδή ανοιχτά του κόλπου της Γέρας), εφόσον αυτά τα δείγματα χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά ιλύος (~ 95%) σε σχέση με τα υπόλοιπα επιφανειακά δείγματα τα οποία είναι κατά κύριο λόγο αμμώδη (άνω του 93.6%). Τέλος, κάποια τοπικά μέγιστα στις συγκεντρώσεις του P και Ba εμφανίζονται στο πρηνές της υδροθερμικής πηγής (σημείο THS 4) και μπορεί να οφείλονται τόσο στον οργανικό άνθρακα (0.5-0.6%) όσο και στην παρουσία ιλύος (4-6%) στο σημείο αυτό σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα που βρίσκονται εντός-εκτός κρατήρα, ενώ το Mn εμφανίζει τοπικό μέγιστο ακριβώς δίπλα από την υδροθερμική πηγή (σημείο THS 5).



**Γράφημα 3.22:** Κατανομή συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων K, Na και Mg στα επιφανειακά ιζήματα εντός κρατήρα (top-bottom) και το ανώτερο και κατώτερο σημείο των δύο πυρήνων (εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου).

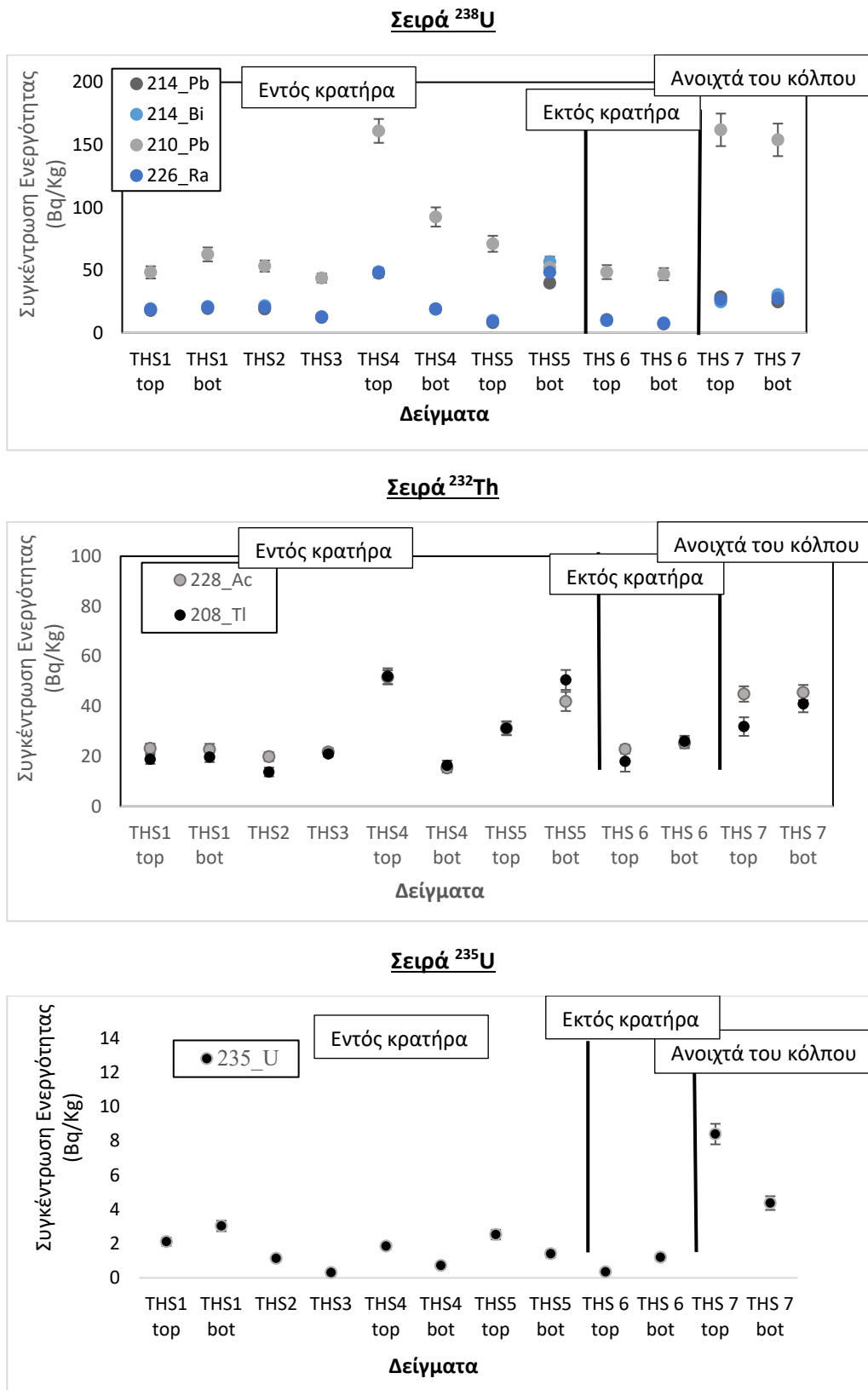
Οι συγκεντρώσεις των K, Na και Mg παρουσιάζουν παρόμοιες κατανομές σε όλα τα επιφανειακά δείγματα, όπου εντός και εκτός κρατήρα εμφανίζουν μία σταθερή τιμή της τάξης του 6278, 3014 και 5187 ppm αντιστοίχως (βγάζοντας εκτός τα δείγματα THS 1 top, THS 5 top και THS 6 –παρουσιάζουν αντίθετη συμπεριφορά-). Οι μέγιστες συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών παρατηρούνται στο σημείο αναφοράς (δηλαδή ανοιχτά του κόλπου της Γέρας), εφόσον αυτά τα δείγματα χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά ιλύος (~ 95%) σε σχέση με τα υπόλοιπα επιφανειακά δείγματα τα οποία είναι κατά κύριο λόγο αμμώδη (άνω του 93.6 %). Τέλος, κάποια τοπικά μέγιστα στις συγκεντρώσεις του K και Mg εμφανίζονται στο πρανές της υδροθερμικής πηγής (σημείο THS 4) και μπορεί να οφείλονται τόσο στον οργανικό άνθρακα (0.5-0.6%) όσο και στην παρουσία ιλύος (4-6%) στο σημείο αυτό σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα που βρίσκονται εντός-εκτός κρατήρα, ενώ το Mn εμφανίζει τοπικό μέγιστο εκτός του κρατήρα (σημείο THS 6 top) με το αμέσως επόμενο τοπικό μέγιστο να εντοπίζεται ακριβώς δίπλα από την υδροθερμική πηγή (σημείο THS 5).

#### 3.4.4 Συγκεντρώσεις ραδιενέργειας στα επιφανειακά ιζήματα

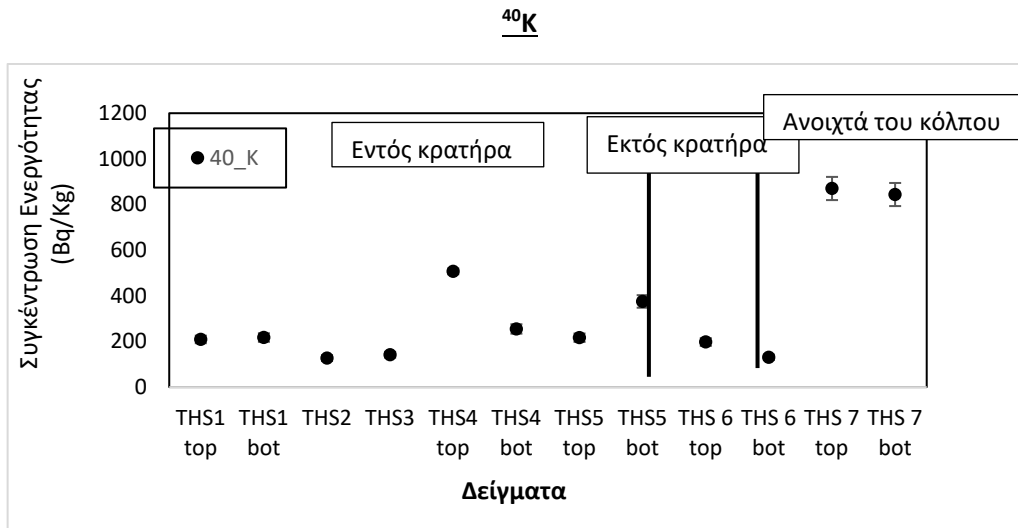
Οι μετρήσεις ραδιενέργειας των επιφανειακών δειγμάτων, όπως και εκείνων του πυρήνα (Υποκεφάλαιο 3.3.4), πραγματοποιήθηκαν στο ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. με τη χρήση του ανιχνευτή HPGe. Κάποια επιφανειακά δείγματα αποτελούνταν από αρκετά μικρή ποσότητα ιζήματος, οπότε προκειμένου να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα συγχωνεύτηκαν ποσότητες –top και bot- που αντιστοιχούσαν στο ίδιο σημείο δειγματοληψίας, συγκεκριμένα τα THS 2 και THS 3. Από τις μετρήσεις προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις ενεργότητας (σε Bq/kg ξηρού δείγματος) των φυσικών ραδιονουκλιδίων στα επιφανειακά δείγματα που λήφθηκαν εντός, εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου, όπως επίσης και οι συγκεντρώσεις στο ιζήμα αυτών για το τεχνητό  $^{137}\text{Cs}$ . Συγκεκριμένα, τα  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  και  $^{210}\text{Pb}$  από



την σειρά του  $^{238}\text{U}$ , τα  $^{228}\text{Ac}$  και  $^{208}\text{Tl}$  από την σειρά  $^{232}\text{Th}$ , το  $^{235}\text{U}$  και το  $^{40}\text{K}$ . Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των επιφανειακών αυτών δειγμάτων απεικονίζονται στα Γραφήματα 3.23 και 3.24.



Γράφημα 3.23: Διασπορά φυσικών ραδιοουκλιδίων της σειράς  $^{238}\text{U}$ , της σειράς  $^{232}\text{Th}$  και της σειράς  $^{235}\text{U}$  στα επιφανειακά ιζήματα εντός κρατήρα (top-bottom) και το ανώτερο και κατώτερο σημείο των δύο πυρήνων (εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου).



**Γράφημα 3.24:** Διασπορά φυσικού ραδιονουκλιδίου <sup>40</sup>K στα επιφανειακά ιζήματα εντός κρατήρα (top-bottom) και το ανώτερο και κατώτερο σημείο των δύο πυρήνων (εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου).

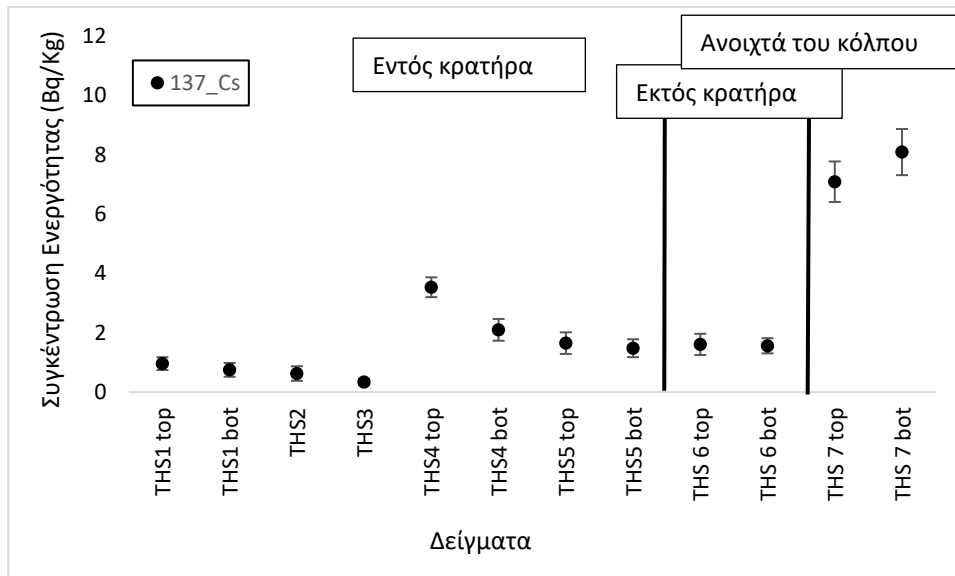
Οι τιμές των ραδιονουκλιδίων της σειράς του <sup>238</sup>U, με εξαίρεση το <sup>210</sup>Pb, φαίνεται να βρίσκονται σε καλή ισορροπία μεταξύ τους εμφανίζοντας μικρές διακυμάνσεις σε όλα τα επιφανειακά δείγματα παρουσιάζοντας μία σχετικά σταθερή εικόνα στον κόλπο της Γέρας. Οι τιμές των <sup>226</sup>Ra, <sup>214</sup>Pb και <sup>214</sup>Bi από το Γράφημα 3.23 φαίνεται να είναι παρόμοιες μεταξύ τους σε όλη την επιφάνεια του κόλπου απ' όπου συλλέχθηκαν δείγματα (εντός, εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου) εμφανίζοντας μια σταθερή τιμή της τάξης του  $22.25 \pm 2.84$ ,  $21.07 \pm 1.39$  και  $23.42 \pm 2.22$  Bq/kg αντίστοιχα, με τις μικρές διαφοροποιήσεις που υπάρχουν να είναι εντός των ορίων των σφαλμάτων. Οι τιμές του <sup>226</sup>Ra κυμαίνονταν από  $7.43 \pm 1.45$  έως  $48.05 \pm 3.73$  Bq/kg με το μέγιστο να παρατηρείται ακριβώς δίπλα από την υδροθερμική πηγή (σημείο THS 5 bot), του <sup>214</sup>Pb από  $7.01 \pm 1.05$  έως  $47.43 \pm 1.97$  Bq/kg με το μέγιστο να εμφανίζεται στο πρηνές της υδροθερμικής πηγής (σημείο THS 4 top) και του <sup>214</sup>Bi από  $7.85 \pm 1.29$  έως  $56.73 \pm 4.04$  Bq/kg τη μέγιστη τιμή να βρίσκεται ακριβώς δίπλα από την υδροθερμική πηγή επίσης (σημείο THS 5 bot). Οι τιμές του <sup>210</sup>Pb κυμαίνονται από  $43.63 \pm 3.68$  έως  $162 \pm 13$  Bq/kg, τιμές τουλάχιστον διπλάσιες, με εξαίρεση το σημείο THS 5 bot (όπου φαίνεται να είναι παραπλήσιες με εκείνες των υπόλοιπων τριών ραδιονουκλιδίων), εξαιτίας του πλεονάσματος που υπάρχει σε αυτόν, ενώ το μέγιστο που εμφανίζει αντιστοιχεί στο σημείο αναφοράς (δηλαδή ανοιχτά του κόλπου της Γέρας). Η μέση τιμή για τον <sup>210</sup>Pb στα επιφανειακά δείγματα είναι  $82.95 \pm 7.01$  Bq/kg.

Οι τιμές των ραδιονουκλιδίων της σειράς του <sup>232</sup>Th, εμφανίζουν μικρές διακυμάνσεις σε όλα τα επιφανειακά δείγματα παρουσιάζοντας μία σχετικά σταθερή εικόνα στον κόλπο της Γέρας. Οι τιμές των <sup>228</sup>Ac και <sup>208</sup>Tl από το Γράφημα 3.23 φαίνεται να είναι παρόμοιες μεταξύ τους σε όλη την επιφάνεια του κόλπου απ' όπου συλλέχθηκαν δείγματα (εντός, εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου) εμφανίζοντας μια σταθερή τιμή της τάξης του  $30.51 \pm 2.36$  και  $28.36 \pm 2.67$  Bq/kg αντίστοιχα, με τις μικρές διαφοροποιήσεις που υπάρχουν να είναι εντός των ορίων των σφαλμάτων, με εξαίρεση τα σημεία δειγματοληψίας THS 2, THS 5 bot και THS 7 top. Οι τιμές του <sup>228</sup>Ac κυμαίνονται από  $15.31 \pm 1.74$  έως  $51.65 \pm 2.75$  Bq/kg ενώ του <sup>208</sup>Tl από  $13.74 \pm 1.77$  έως  $52 \pm 3.21$  Bq/kg τιμές παραπλήσιες όπως

και ήταν αναμενόμενο εφόσον βρίσκονται στην ίδια ραδιενεργό σειρά. Τα τοπικά μέγιστα και των δυο φυσικών ραδιονουκλιδίων ( $^{228}\text{Ac}$  και  $^{208}\text{Tl}$ ) εμφανίζονται στο πρανές της υδροθερμικής πηγής (σημείο THS 4 top).

Η μέση τιμή του  $^{235}\text{U}$  βρέθηκε στα  $2.28 \pm 0.23$  Bq/kg, με το εύρος τιμών να κυμαίνεται από  $0.31 \pm 0.07$  έως  $8.40 \pm 0.6$  Bq/kg με το μέγιστο που εμφανίζει να αντιστοιχεί στο σημείο αναφοράς (δηλαδή ανοιχτά του κόλπου της Γέρας, σημείο THS 7). Τα υψηλά ποσοστά  $^{235}\text{U}$  στο σημείο αναφοράς πιθανόν να οφείλονται στο ότι τα δείγματα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά ιλύος (~ 95%) σε σχέση με τα υπόλοιπα επιφανειακά δείγματα τα οποία είναι κατά κύριο λόγο αμμώδη (άνω του 93.6 %).

Η μέση τιμή του  $^{40}\text{K}$  βρέθηκε στα  $340.87 \pm 22.42$  Bq/kg, με το εύρος τιμών να κυμαίνεται από  $127.1 \pm 12.73$  έως  $870.15 \pm 85.8$  Bq/kg με τη μέγιστη τιμή να αντιστοιχεί στο σημείο αναφοράς (δηλαδή ανοιχτά του κόλπου της Γέρας, σημείο THS 7). Τα υψηλά ποσοστά του  $^{40}\text{K}$  στο σημείο αναφοράς πιθανόν να οφείλονται στο ότι τα δείγματα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά ιλύος (~ 95%) σε σχέση με τα υπόλοιπα επιφανειακά δείγματα τα οποία είναι κατά κύριο λόγο αμμώδη (άνω του 93.6 %).



**Γράφημα 3.25:** Διασπορά της ενεργότητας του  $^{137}\text{Cs}$  στα επιφανειακά ιζήματα εντός κρατήρα (top-bottom) και το ανώτερο και κατώτερο σημείο των δύο πυρήνων (εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου)..

Οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν στα ιζήματα των επιφανειακών δειγμάτων για το τεχνητό  $^{137}\text{Cs}$  κυμαίνονται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα σε όλη την επιφάνεια του κόλπου από όπου λήφθηκαν δείγματα (εντός εκτός κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου). Οι τιμές του  $^{137}\text{Cs}$  κυμαίνονται από  $0.34 \pm 0.11$  έως  $8.09 \pm 0.78$  Bq/kg, με τη μέγιστη τιμή να αντιστοιχεί στο σημείο αναφοράς (δηλαδή ανοιχτά του κόλπου της Γέρας, σημείο THS 7), ενώ η μέση τιμή υπολογίστηκε στα  $2.48 \pm 0.35$  Bq/kg. Τα υψηλά ποσοστά του  $^{137}\text{Cs}$  στο σημείο αναφοράς πιθανόν να οφείλονται στο ότι τα δείγματα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά ιλύος (~ 95%), σε σχέση με τα υπόλοιπα επιφανειακά δείγματα τα οποία είναι κατά κύριο λόγο αμμώδη (άνω του 93.6 %), με το  $^{137}\text{Cs}$  να προσκολλάται κατά κύριο λόγο στις επιφάνειες αυτών (των λεπτόκοκκων ιζημάτων).

Όλα τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων της ραδιενέργειας (φυσικής και τεχνητής) των επιφανειακών δειγμάτων φαίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα 4, στον Πίνακα Π10.

### 3.5 Σύγκριση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας με άλλες μελέτες

Όσον αφορά στις συγκεντρώσεις της φυσικής ραδιενέργειας στη περιοχή του κόλπου της Γέρας, έως και σήμερα δεν έχουν δημοσιευθεί δεδομένα συγκεντρώσεων ενεργότητας ραδιονουκλιδίων με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η απευθείας σύγκριση των τιμών στη συγκεκριμένη περιοχή. Παρόλα αυτά μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των συγκεντρώσεων ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων τα οποία μελετήθηκαν στην εργασία αυτή, με συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων οι οποίες δίνονται ως δεδομένα από μελέτες που έχουν διεξαχθεί στον κόσμο γενικά και στην Ελλάδα συγκεκριμένα. Κάποιες από τις συγκρινόμενες περιοχές δέχονται την επιρροή ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Ο κόλπος της Γέρας μπορεί να συγκαταλεχθεί σε αυτές τις περιοχές μιας και δέχεται την επίδραση των οικιστικών αποβλήτων και δεχόταν για πολλά χρόνια την επίδραση του βυρσοδεψείου. Τα διεθνή επίπεδα συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων εκφράζουν τα μέγιστα και τα ελάχιστα όρια ραδιενέργειας που έχουν μετρηθεί παγκοσμίως, παρ' όλα αυτά επίπεδα ραδιενέργειας που να εκφράζουν το βαθμό επικινδυνότητας της κάθε περιοχής δεν έχουν έως τώρα θεσπιστεί, με αποτέλεσμα η σύγκριση των τιμών της παρούσας εργασίας, να διεξάγεται με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε παγκόσμια κλίμακα (UNSCEAR, 2000).

Παρακάτω στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις ενεργότητας οι οποίες αποτυπώθηκαν στη παρούσα έρευνα στο θαλάσσιο ιζημα του πυρήνα και των επιφανειακών δειγμάτων αντίστοιχα, σε σύγκριση με μετρημένες τιμές από βιβλιογραφική έρευνα.

**Πίνακας 3.2:** Ενδεικτικός πίνακας συγκεντρώσεων ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων σε ιζημα για την Ελλάδα και τον κόσμο.

		<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>40</sup> K	
		(Bq/kg)				
Κόλπος Γέρας (Πυρήνας Ιζήματος)	min		15	5	123	Παρούσα εργασία
	max		37	33	222	
Κόλπος Γέρας (Επιφανειακά ιζήματα)	min		14	7	127	
	max		52	48	870	
Στρατώνι - Κόλπος Ιερισσού	min		22	19	696	(Παππά, 2014)
	max		33	97	419	
Θερμαϊκός Κόλπος	min		19	26	350	(Ελευθερίου, 2014)
	max		60	68	542	
Κόλπος Πατρών- λιμάνι	min	14	17	16	327	(Papaefthymiou et al., 2007)
	max	33	34	37	763	
Σαρωνικός Κόλπος	min		5	2	61	(Ελευθερίου, 2014)
	max		23	64	377	
Ελλάδα	min	1	1	1	12	(UNSCEAR, 2000)
	max	240	190	240	1570	
Παγκόσμιος μέσος	min	16	11	17	140	(UNSCEAR, 2000)
	max	110	64	60	850	

Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων που καταγράφηκαν στον πυρήνα ιζήματος που λήφθηκε από τον κόλπο της Γέρας, παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή του  $^{232}\text{Th}$  που βρέθηκε στον πυρήνα βρίσκεται σε παρόμοια επίπεδα με τον κόλπο της Ιερισσού (Παππά, 2014) και των Πατρών (Ελευθερίου, 2014). Επιπλέον αυτή είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή του Σαρωνικού κόλπου και πολύ μικρότερη από εκείνη του Θερμαϊκού κόλπου (Ελευθερίου, 2014) και ιδιαίτερα από το μέγιστο των μετρήσεων που έχουν γίνει σε όλη την Ελλάδα (UNSCEAR, 2000) αλλά και εκείνο του Παγκόσμιου μέσου (UNSCEAR, 2000). Η μέγιστη τιμή του  $^{226}\text{Ra}$  που μετρήθηκε στον πυρήνα φαίνεται να είναι σε παρόμοια επίπεδα μόνο με τον κόλπο των Πατρών (Papaefthymiou et al., 2007), ενώ σε σχέση με τις υπόλοιπες μετρήσεις του Πίνακα 3.2 είναι κατά πολύ χαμηλότερο, με την μεγαλύτερη απόκλιση που υπάρχει να είναι εκείνη από το μέγιστο των μετρήσεων που έχουν γίνει σε όλη την Ελλάδα (UNSCEAR, 2000). Η μέγιστη τιμή που μετρήθηκε στον πυρήνα και αφορά το  $^{40}\text{K}$ , βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με καθεμία από τις υπόλοιπες μετρήσεις του Πίνακα 3.2, με την μεγαλύτερη απόκλιση να είναι επίσης εκείνη από το μέγιστο των μετρήσεων που έχουν γίνει σε όλη την Ελλάδα (UNSCEAR, 2000).

Από τις συγκεντρώσεις ενεργότητας των φυσικών ραδιονουκλιδίων που καταγράφηκαν στα επιφανειακά δείγματα που λήφθηκαν σε διάφορες περιοχές γύρω από την υδροθερμική πηγή, δηλαδή εντός του κρατήρα, εκτός του κρατήρα και ανοιχτά του κόλπου της Γέρας, παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή του  $^{232}\text{Th}$  που βρέθηκε στα επιφανειακά δείγματα (THS4 top) βρίσκεται σε παρόμοια επίπεδα με τον Θερμαϊκό κόλπο (Ελευθερίου, 2014) όπως επίσης και με το μέγιστο των μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί παγκοσμίως (UNSCEAR, 2000). Σε υψηλότερα επίπεδα, από τη μέγιστη τιμή του  $^{232}\text{Th}$  φαίνεται να είναι η μέγιστη τιμή των μετρήσεων που έχουν γίνει σε όλη την Ελλάδα (UNSCEAR, 2000), ενώ σε χαμηλότερα επίπεδα βρίσκονται τα μέγιστα του κόλπου της Ιερισσού (Παππά, 2014), των Πατρών (Papaefthymiou et al., 2007) και του Σαρωνικού (Ελευθερίου, 2014). Όσον αφορά τη μέγιστη τιμή του  $^{226}\text{Ra}$  που μετρήθηκε στα επιφανειακά δείγματα (THS4 top), είναι παρόμοια με εκείνη του κόλπου των Πατρών (Papaefthymiou et al., 2007), ενώ παρουσιάζει χαμηλότερο μέγιστο από εκείνα του κόλπου της Ιερισσού (Παππά, 2014), του Θερμαϊκού (Ελευθερίου, 2014), του Σαρωνικού (Ελευθερίου, 2014) και των μεγίστων από μετρήσεις που έχουν γίνει σε όλη την Ελλάδα και παγκόσμια (UNSCEAR, 2000). Η μέγιστη τιμή του  $^{40}\text{K}$  που βρέθηκε στα επιφανειακά δείγματα (THS top) είναι παρόμοια με τη μέγιστη τιμή των μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί παγκόσμια (UNSCEAR, 2000) και εκείνη του κόλπου των Πατρών (Papaefthymiou et al., 2007). Σε υψηλότερα επίπεδα, από τη μέγιστη τιμή του  $^{40}\text{K}$  που μετρήθηκε στα επιφανειακά δείγματα, φαίνεται να είναι η μέγιστη τιμή των μετρήσεων που έχουν γίνει σε όλη την Ελλάδα (UNSCEAR, 2000), ενώ σε χαμηλότερα επίπεδα από την πρώτη είναι ο κόλπος Ιερισσού (Παππά, 2014), ο Θερμαϊκός (Ελευθερίου, 2014) και ο Σαρωνικός (Ελευθερίου, 2014).

Εξετάζοντας τις συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων που καταγράφηκαν στον πυρήνα ιζήματος που λήφθηκε από τον κόλπο της Γέρας σε σχέση με εκείνες των επιφανειακών δειγμάτων, παρατηρείται ότι ενώ παρουσιάζουν παρόμοια ελάχιστα, οι μέγιστες τιμές των επιφανειακών δειγμάτων, είναι σε κάθε περίπτωση ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) του Πίνακα 3.2, βρίσκονται σε υψηλότερα επίπεδα, ιδίως εκείνες του  $^{40}\text{K}$ .

### 3.6 Σύγκριση των συγκεντρώσεων ορισμένων κύριων στοιχείων με άλλες μελέτες

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των κύριων στοιχείων στον πυρήνα ιζήματος και στα επιφανειακά δείγματα της παρούσας εργασίας, καθώς και αντίστοιχες συγκεντρώσεις από διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε από τους Sioulas and Anagnostou (1989) στην ίδια περιοχή μελέτης (Κόλπος της Γέρας), παρατηρείται ότι ο σίδηρος (Fe) κυμαίνεται σε παρόμοια επίπεδα σε σύγκριση με τα δείγματα του πυρήνα και με τα επιφανειακά δείγματα που λήφθηκαν από τον κρατήρα (εντός, εκτός) και ανοιχτά του κόλπου. Από την άλλη πλευρά το μαγγάνιο (Mn) της παρούσας εργασίας (πυρήνας και επιφανειακά) παρουσιάζει μειωμένες τιμές, κατά 4 φορές για τον πυρήνα και 3 για τα επιφανειακά, σε σχέση με εκείνες που μετρήθηκαν από τους Sioulas and Anagnostou (1989).

**Πίνακας 3.3:** Συγκεντρωτικός πίνακας συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων στην περιοχή του Κόλπου της Γέρας (για τα δείγματα του πυρήνα ιζήματος και των επιφανειακών δειγμάτων). Οι τιμές οι οποίες αναγράφονται παρουσιάζουν τις μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων για κάθε μια μελέτη.

	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Mn	
	(ppm)							
Κόλπος Γέρας (Πυρήνας Ιζήματος)	13800	307600	5200	90400	1500	20700	310	Παρούσα εργασία
Κόλπος Γέρας (Επιφανειακά Δείγματα)	24600	326200	8700	57600	1900	25200	370	
Κόλπος Γέρας	-	-	-	-	-	23800	1300	Sioulas and Anagnostou (1989)
Κόλπος Ελευσίνας	30167	-	-	-	-	27300	1100	Sioulas et al. (1990)
Νότιος Ευβοϊκός Κόλπος	48200	89300	20800	36500	2400	44100	940	Karageorgis (1992)
Βόρειος Ευβοϊκός Κόλπος	-	-	-	144400	-	36400	4000	Voutsinou- Taliadouri and Varnavas (1993)

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε από τους Sioulas and Anagnostou (1989) στην ίδια περιοχή μελέτης (Κόλπος της Γέρας), παρατηρείται ότι ο σίδηρος (Fe) κυμαίνεται σε παρόμοια επίπεδα σε σύγκριση με τα δείγματα του πυρήνα και με τα επιφανειακά δείγματα που λήφθηκαν από τον κρατήρα (εντός, εκτός) και ανοιχτά του κόλπου. Από την άλλη πλευρά το μαγγάνιο (Mn) της παρούσας εργασίας (πυρήνας και επιφανειακά) παρουσιάζει μειωμένες τιμές, κατά 4 φορές για τον πυρήνα και 3 για τα επιφανειακά, σε σχέση με εκείνες που μετρήθηκαν από τους Sioulas and Anagnostou (1989).

Γενικά οι τιμές των κύριων στοιχείων των υπό μελέτη ιζημάτων, είναι χαμηλότερες από κάθε άλλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας όπως φαίνεται από τους Sioulas and Anagnostou (1989), Sioulas et al. (1990), Karageorgis (1992), Voutsinou-Taliadouri and Varnavas (1993). Συγκεκριμένα ο άργιλος (Al) στον κόλπο (δείγματα πυρήνα και επιφανειακά) παρουσιάζει μειωμένες συγκεντρώσεις κατά 64% από τον κόλπο της Ελευσίνας (Sioulas et al., 1990) και 40% από τον Ν. Ευβοϊκό Κόλπο (Karageorgis, 1992). Το κάλιο (K) όπως και το τιτάνιο (Ti) στον κόλπο (δείγματα πυρήνα και επιφανειακά) εμφανίζουν μικρότερες τιμές κατά 33% για το K και 70% για το Ti αντίστοιχα, του Ν. Ευβοϊκού Κόλπου (Karageorgis, 1992). Ο σίδηρος (Fe) στον κόλπο (δείγματα πυρήνα και επιφανειακά) παρουσιάζει τιμές που αντιστοιχούν περίπου στο 96.6% των τιμών που προέκυψαν από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Sioulas and Anagnostou (1989) στην ίδια περιοχή μελέτης (Κόλπος της Γέρας), στο 84% των τιμών που προέκυψαν από τη μελέτη που έγινε από τους Sioulas et al. (1990) στον κόλπο της Ελευσίνας, στο 52% των τιμών που προέκυψαν από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον Karageorgis (1992) στον Ν. Ευβοϊκό κόλπο και στο 63% των τιμών που προέκυψαν από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Voutsinou-Taliadouri and Varnavas (1993) στον Β. Ευβοϊκό κόλπο. Το μαγγάνιο (Mn) στον κόλπο (δείγματα πυρήνα και επιφανειακά) παρουσιάζει τιμές συγκεντρώσεων που αντιστοιχούν στο 26% των τιμών που βρέθηκαν από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Sioulas and Anagnostou (1989) στην ίδια περιοχή μελέτης (Κόλπος της Γέρας), στο 31% των τιμών που μετρήθηκαν από τη μελέτη που έγινε από τους Sioulas et al. (1990) στον κόλπο της Ελευσίνας, στο 36% των τιμών που προέκυψαν από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον Karageorgis (1992) στον Ν. Ευβοϊκό κόλπο και στο 8% των τιμών που προέκυψαν από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Voutsinou-Taliadouri and Varnavas (1993) στον Β. Ευβοϊκό κόλπο.

Το πυρίτιο (Si) όπως επίσης και το ασβέστιο (Ca) στον κόλπο (δείγματα πυρήνα και επιφανειακά) είναι τα μοναδικά τα οποία εμφανίζουν υψηλότερες τιμές κατά 28% για το Si και 49% για το Ca αντίστοιχα, του Ν. Ευβοϊκού Κόλπου (Karageorgis, 1992), ενώ το Ca στον κόλπο (δείγματα πυρήνα και επιφανειακά) παρουσιάζει παράλληλα μειωμένες συγκεντρώσεις κατά 51% από τον Β. Ευβοϊκό κόλπο (Voutsinou-Taliadouri and Varnavas, 1993).

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις των κύριων στοιχείων, στα επιφανειακά δείγματα της παρούσας εργασίας, είναι ιδιαίτερα αυξημένες σε ορισμένα στοιχεία, εξαιτίας του επιφανειακού δείγματος που λήφθηκε ανοιχτά του κόλπου (THS top-bot) το οποίο αποτελούταν σχεδόν εξολοκλήρου από λεπτόκοκκο υλικό. Αυτό εμφανίζει αρκετά υψηλότερες συγκεντρώσεις από τα επιφανειακά δείγματα που λήφθηκαν εντός και εκτός του κρατήρα, τα οποία αποτελούνταν στο μεγαλύτερο αν όχι σε όλο το μέρος τους από χονδρόκοκκο υλικό. Ο λόγος είναι ότι τα κύρια στοιχεία προσροφώνται ιδιαίτερα από λεπτόκοκκα ιζήματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συζήτηση και Συμπεράσματα

### 4.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν αρχικά η μελέτη των ραδιολογικών και μεταλλικών παραμέτρων της θερμής πηγής στην ηφαιστειογενή περιοχή του κόλπου της Γέρας, όπου έχει διαπιστωθεί από προηγούμενες μελέτες ότι τεκτονικές ασυνέχειες κάτω από τον πυθμένα αποτελούν οδούς επιλεκτικής διαφυγής ρευστών. Επιπλέον στόχος ήταν ο υπολογισμός του ρυθμού ιζηματογένεσης/εναπόθεσης με τη χρήση του φυσικού ραδιονουκλιδίου  $^{210}\text{Pb}$  και του τεχνητού  $^{137}\text{Cs}$ , η εύρεση της ποσότητας του οργανικού άνθρακα στα υπό εξέταση ιζήματα του κόλπου της Γέρας, και τέλος η σύγκριση των συγκεντρώσεων των μετάλλων (κύρια στοιχεία) και των ραδιενεργών του περιβάλλοντος της υδροθερμικής πηγής με εκείνο του υποβάθρου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με εργαστηριακές μεθόδους φασματοσκοπίας ακτίνων-γ, οξειδωσης και XRF ανάλογα με τα ζητούμενα κάθε φορά.

Από τη μελέτη της **φυσικής ραδιενέργειας** στα δείγματα ιζημάτων του κόλπου της Γέρας οι τιμές που λήφθηκαν έδειξαν τα εξής:

- Τα μέγιστα των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων που μετρήθηκαν στα επιφανειακά δείγματα εμφανίζουν υψηλότερες τιμές (συγκεντρώσεις) από τα δείγματα του πυρήνα. Πιθανή αιτία είναι οι αναβλύσεις της σημειακής πηγής οι οποίες επηρεάζουν το ίζημα κοντά σε αυτή.
- Το  $^{226}\text{Ra}$  εμφανίζει μέγιστη ενεργότητα  $48\pm 5$  Bq/kg η οποία φαίνεται να είναι κατά 50% υψηλότερη από περιοχές υποβάθρου στην Ελλάδα. Το  $^{232}\text{Th}$  εμφανίζει μέγιστη ενεργότητα  $52\pm 5$  Bq/kg και είναι κατά 60% υψηλότερο από περιοχές υποβάθρου στην Ελλάδα. Οι τιμές αυτές αποδίδονται στην ορυκτολογία του κόλπου της Γέρας.
- Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων της σειράς του  $^{226}\text{Ra}$ , βρέθηκαν χαμηλότερες από τις συγκεντρώσεις ενεργότητας άλλων περιοχών στην Ελλάδα σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2, με εξαίρεση εκείνες του κόλπου των Πατρών (Papaefthymiou et al., 2007). Σε σχέση με τα μέγιστα των μετρήσεων που έχουν γίνει γενικά στην Ελλάδα (UNSCEAR, 2000) ο κόλπος της Γέρας παρουσιάζει αρκετά χαμηλές τιμές, ενώ ταυτόχρονα δεν ξεπερνούν τις μέγιστες τιμές που αντιστοιχούν σε μετρήσεις που έχουν γίνει παγκοσμίως (UNSCEAR, 2000).
- Η συγκέντρωση ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων της σειράς του  $^{232}\text{Th}$  στα δείγματα του πυρήνα και τα επιφανειακά είναι χαμηλότερη από τα μέγιστα των μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί σε όλη την Ελλάδα και παγκοσμίως (UNSCEAR, 2000).
- Τα μέγιστα των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων στα επιφανειακά δείγματα ανοιχτά του κόλπου είναι υψηλότερα από τα υπό εξέταση επιφανειακά δείγματα εντός και εκτός κρατήρα (εξαίρεση η σειρά του  $^{232}\text{Th}$ ). Αυτό πιθανόν οφείλεται στη διαφορετική κοκκομετρική σύσταση που παρουσιάζουν αναμεταξύ τους, καθώς που συλλέχτηκαν ανοιχτά του κόλπου και αποτελούνταν κατά κύριο λόγο από λεπτόκοκκο υλικό.
- Τα επίπεδα της φυσικής ραδιενέργειας του  $^{40}\text{K}$  ανήκουν σε χαμηλό εύρος τιμών συγκριτικά με τις μέγιστες τιμές από μετρήσεις που έχουν γίνει σε όλη την Ελλάδα (UNSCEAR, 2000). Όσον αφορά τα μέγιστα των μετρήσεων



που έχουν πραγματοποιηθεί παγκοσμίως (UNSCEAR, 2000) το  $^{40}\text{K}$  φαίνεται να εμφανίζει ελάχιστα υψηλότερη τιμή στα επιφανειακά δείγματα, γεγονός το οποίο πιθανόν να οφείλεται στις αναβλύσεις της σημειακής πηγής οι οποίες επηρεάζουν την γύρω περιοχή.

- Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας του πυρήνα ιζήματος και των επιφανειακών δειγμάτων στην παρούσα εργασία ήταν σχετικά χαμηλές συγκρινόμενες με άλλες περιοχές της Ελλάδας και με το μέγιστο που αντιστοιχεί σε μετρήσεις που έχουν γίνει παγκοσμίως, γεγονός το οποίο δηλώνει ότι ο ραδιολογικός κίνδυνος για τους ανθρώπους και τους οργανισμούς που κατοικούν στην περιοχή είναι αμελητέος. Παρόλα αυτά, απαιτείται εκτενέστερη χαρτογράφηση της ευρύτερης περιοχής μιας και η Λέσβος βρίσκεται πάνω στο ηφαιστειακό τόξο και ενδέχεται να περιέχει υψηλά ποσοστά φυσικής ραδιενέργειας.

Από τις μετρήσεις του **οργανικού άνθρακα** στα δείγματα ιζημάτων του κόλπου της Γέρας οι τιμές που λήφθηκαν έδειξαν τα εξής:

Για τον πυρήνα ιζήματος:

- Δεν φαίνεται να υπάρχει σημαντική επιβάρυνση στον κόλπο της Γέρας από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, εφόσον οι μεταβολές στη συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα είναι μικρές.
- Κατά μήκος του πυρήνα παρατηρείται πλήθος αυξομειώσεων σε πολύ μικρά ποσοστά, οι οποίες το πιθανότερο είναι να προκύπτουν από τις επιρροές που δέχεται λόγω των αναβλύσεων στον κρατήρα.
- Παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές συγκεντρώσεων από τα επιφανειακά δείγματα σε ορισμένα σημεία, το οποίο πιθανόν να οφείλεται στην απόσταση που υπάρχει από τη σημειακή πηγή ανάβλυσης.

Για τα επιφανειακά δείγματα:

- Τα ποσοστά συγκέντρωσης του οργανικού άνθρακα, όσον αφορά τα δείγματα εντός – εκτός κρατήρα είναι χαμηλά, με τα υψηλότερα να είναι εκείνα στο πρανές (THS 4) και ακριβώς δίπλα από τη σημειακή πηγή (THS 5). Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στο λεπτόκοκκο υλικό που είναι εναποθετημένο εκεί λόγω των αναβλύσεων καθιστώντας αδύνατη τη καθίζηση σε άλλο σημείο του κρατήρα (αιωρείται). Αυτό επιβεβαιώνεται και από και τις αναλογίες άμμου-ιλύος που βρέθηκαν από τις αναλύσεις της κοκκομετρίας σύμφωνα με τις οποίες τα δείγματα στο πρανές (THS4) και ακριβώς δίπλα από τη σημειακή πηγή (THS5) εμφανίζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού (4-6%) σε σχέση με τα υπόλοιπα εντός – εκτός κρατήρα δείγματα (<2%).
- Οι συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα στο σημείο αναφοράς, το οποίο βρίσκεται ανοιχτά του κόλπου (THS 7), είναι αρκετά υψηλότερες από τα δείγματα που λήφθηκαν εντός και εκτός κρατήρα. Η μεγάλη αυτή διαφορά πιθανόν να οφείλεται στη διαφορετική κοκκομετρική σύσταση των δειγμάτων, με το σημείο αναφοράς να απαρτίζεται στο μεγαλύτερο μέρος του από λεπτόκοκκο υλικό (>93%). Ο οργανικός άνθρακας παρουσιάζει υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης σε λεπτόκοκκα ιζήματα.

Από τη μελέτη των **κύριων στοιχείων** στα δείγματα του κόλπου της Γέρας οι τιμές που λήφθηκαν έδειξαν τα εξής:

- Σε γενικές γραμμές οι τιμές των κύριων στοιχείων των υπό μελέτη ιζημάτων (με εξαίρεση το Si και το Ca) φαίνεται να είναι σε κάθε περίπτωση χαμηλότερες από κάθε άλλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε διάφορες

περιοχές της Ελλάδας (Πίνακας 3.3), οι οποίες επηρεάζονται έντονα από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (π.χ. οικιστικά απόβλητα και βιομηχανία). Αυτό σημαίνει ότι ο Κόλπος της Γέρας δεν έχει επηρεαστεί σημαντικά από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες που φιλοξενούσε όσο αφορά στα κύρια στοιχεία.

- Οι μέγιστες τιμές των κύριων στοιχείων που μετρήθηκαν στα επιφανειακά δείγματα είναι υψηλότερες από εκείνες που μετρήθηκαν στα δείγματα του πυρήνα, με εξαίρεση τα Mn και Ba. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη συνεισφορά κύριων στοιχείων στο ίζημα μέσω των αναβλύσεων της σημειακής πηγής.
- Από παλαιότερη μελέτη στη περιοχή του κόλπου της Γέρας (Sioulas and Anagnostou, 1989), παρατηρείται πολύ μικρή μείωση των συγκεντρώσεων του Fe στον πυρήνα ιζήματος, ενώ σημαντικά φαίνεται να μειώθηκε το Mn τόσο στα δείγματα του πυρήνα όσο και στα επιφανειακά. Η αιτία των μειώσεων αυτών με το πέρασ των ετών πιθανόν είναι το βυρσοδεψείο που υπήρχε στη περιοχή έως το 1980 όπου έκλεισε.
- Συγκρίνοντας τα επιφανειακά δείγματα, το Si εμφανίζει από τις υψηλότερες τιμές σε κάθε περίπτωση γεγονός που οφείλεται στο ότι υπάρχει σε μεγάλα ποσοστά στο φλοιό της Γης οπότε όσον αφορά στον κρατήρα, μέσω των αναβλύσεων ενισχύεται η παρουσία του.
- Το επιφανειακό δείγμα (THS 7) που λήφθηκε ανοιχτά του κόλπου της Γέρας παρουσιάζει υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης από τα δείγματα εντός και εκτός κρατήρα. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως οφείλεται στη διαφορετική κοκκομετρική σύσταση των δειγμάτων.
- Τα κύρια στοιχεία δείχνει να έχουν την τάση να συγκεντρώνονται σε λεπτόκοκκα ιζήματα, με εξαίρεση το Si και το Ca τα οποία δεν φαίνεται να παρουσιάζουν κάποια συσχέτιση με τη παρουσία ιλύος.

Τέλος ο **ρυθμός ιζηματογένεσης** υπολογίζεται στα  $v=0.46 - 0.48$  cm/year, τιμή η οποία οφείλεται στην υψηλή δραστηριότητα της περιοχής μελέτης λόγω των αναβλύσεων και της μικρής σχετικά απόστασης από την παράκτια περιοχή.

## 4.2 Μελλοντικές ενέργειες

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας συνοπτικά ήταν η μελέτη της φυσικής ραδιενέργειας, του οργανικού άνθρακα και των κύριων στοιχείων της θερμής πηγής, όπως επίσης και ο υπολογισμός του ρυθμού ιζηματογένεσης στον κόλπο της Γέρας. Το γεγονός ότι η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε πρώτη φορά στην περιοχή του κόλπου της Γέρας συνεπάγεται την έλλειψη βιβλιογραφικών δεδομένων προκειμένου να πραγματοποιηθούν συγκρίσεις στη περιοχή, όπως επίσης θέτει και πλήθος νέων ερωτημάτων και παρατηρήσεων τα οποία χρήζουν περαιτέρω μελέτης.

Προκειμένου να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα στον κόλπο της Γέρας θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί έρευνα για τον προσδιορισμό όλων των παραμέτρων που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία (φυσική ραδιενέργεια, οργανικός άνθρακας και κύρια στοιχεία), σε νερό, ίζημα και έδαφος στο παρόν. Επίσης εκτός από τα κύρια στοιχεία που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, προτείνεται να πραγματοποιηθεί μια εκτενέστερη μελέτη

των ιχνοστοιχείων που απαντώνται στην περιοχή έτσι ώστε να εξαχθούν λεπτομερέστερα συμπεράσματα για την ρύπανση καθώς και τις βιογεωχημικές διεργασίες της περιοχής. Επιπλέον, παρά το γεγονός ότι ο ραδιολογικός κίνδυνος για τους ανθρώπους και τους οργανισμούς που κατοικούν στην περιοχή είναι αμελητέος, συστήνεται εκτενέστερη χαρτογράφηση της ευρύτερης περιοχής, εφόσον η Λέσβος βρίσκεται πάνω στο ηφαιστειακό τόξο και ενδέχεται να περιέχει υψηλά ποσοστά φυσικής ραδιενέργειας. Τέλος, προτείνεται περιβαλλοντική παρακολούθηση ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με σκοπό να διασφαλίζεται ο έλεγχος αλλά και να προστατεύονται οι οργανισμοί που διαβιούν στην περιοχή του κόλπου της Γέρας.

## 5. Βιβλιογραφία

### Ξένη Βιβλιογραφία

**Appleby P. G. and Oldfield F. (1983)** The assessment of  $^{210}\text{Pb}$  data from sites with varying sediment accumulation rates. *Hydrobiologia* 103, 29-35.

**Arhonditsis G., Eleftheriadou M., Karydis M., Tsirtsis, G., (2003).** Eutrophication risk assessment in coastal embayments using simple statistical models. *Marine Pollution Bulletin* 46: 1174–1178.

**Arhonditsis G., Tsirtsis G., Angelidis M., Karydis, M., (2000a).** Quantification of the effects of nonpoint nutrient sources to coastal marine eutrophication: applications to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean Sea. *Ecological Modelling* 129: 209–227.

**Arhonditsis, G., Giourga, C., & Loumou, A. (2000).** Ecological patterns and comparative nutrient dynamics of natural and agricultural Mediterranean-type ecosystems. *Environmental Management*, 26(5), 527–537.

**Arhonditsis, G., Giourga, C., Loumou, A., & Koulouri, M. (2002).** Quantitative assessment of agricultural runoff and soil erosion using mathematical modeling: Applications in the Mediterranean region. *Environmental Management*, 30(3), 434–453.

**Arnaud F., Magand M. A. (2006)** Radionuclide dating ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) of recent lake sediments in a highly active geodynamic setting (Lakes Puychue and Icalma-Chilean Lake District). *Sci. Total Environ.* 366, 837-850.

**Barlas Simsek, F., Cagatay, M.N. (2014)** Geochronology of lake sediments using  $^{210}\text{Pb}$  with double energetic window method by LSC: An application to Lake Van. *Applied Radiation and Isotopes*, 93, 126-133.

**Beks, J.P., (2000).** Storage and distribution of plutonium,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in North Sea sediments. *Continental Shelf Research*, 20, 1941-1964.

**Binford M. W. (1990)** Calculation and uncertainty analysis of 21 dates for PIRLA project lake cores. *J. Paleolimnol.* 3, 253-268.

**Brugam R. B. (1978)** Pollen indicators of land-use change in Southern Connecticut. *Quatern. Res.* 9, 394-362.

**Carroll J. and Lerche I. (2003)** *Sedimentary Processes: Quantification Using Radionuclides*. Elsevier, Oxford, pp. 272.

**Cottingham, W.N., Greenwood, D.A., (1992).** Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική. Μετάφραση: Καλλίμαχος Σαρηγιάννης. Τυπωθήτω, Αθήνα.

**Crozaz G., Picciotto E. and de Breuck W. (1964)** Antarctic snow chronology with  $^{210}\text{Pb}$ . *J. Geophys. Res.* 69, 2597–2604.

**Cundy, A.B. and Croudace, I.W., (1995).** Physical and chemical associations of radionuclides and trace metals in estuarine sediments: an example from Poole harbour, Southern England. *Journal of Environmental Radioactivity* 29, 191-211.

**DDEP – DATA DECAY EVALUATION PROJECT.** LNE- LNHB/CEA – Table de radionuclides  $^{210}\text{Pb}$ . Available from: <[http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm)> (updated 20th August 2010).

**Diaz-Asencio M., Alonso-Hernandez C., Bolan~os-Alvarez Y., Gomez-Batista M., Pinto V., Morabito R., Hernandez-Albernas J., Eriksson M. and Sanchez-Cabeza J. A. (2009).** One century sedimentary record of Hg and Pb pollution in the Sagua estuary (Cuba) derived from  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  chronology. *Mar. Pollut. Bull.* 59, 108–115.

**Dominik J., Mangini A. and Muller G. (1981).** Determination of recent deposition rates in Lake Constance with radioisotopic methods. *Sedimentology* 28, 653–677.

**Förstner U., Salomons W., 1984.** Trace elements speciation in surface waters: interactions with particulate matter. Leppard G. (ed). National Water Research institute, Burlington, Canada, 245 pp.

**Förstner U., Wittmann G T W. (1983).** Metal pollution in the aquatic environment, Springer-Verlag, Berlin.

**Fowler, S.W., Buat-Menard, P., Yokohama, Y., Ballestra, S., Holm, E. & Van Nguyen, H., (1987).** Rapid removal of Chernobyl fallout from Mediterranean surface waters by biological activity. *Nature*, 329, 56-58.

**Froehlich, K., (Ed.) 2009.** Environmental Radionuclides: Tracers and Timers of Terrestrial Processes, In: Baxter, M.S. (Ed.), *Radioactivity in the Environment*, Volume 16, Elsevier, Vienna.

**Garcia-Orellana, J, J.M. Pates, P. Masqué, J.M. Bruach, J.A. Sanchez-Cabeza, (2009).** Distribution of artificial radionuclides in deep sediments of the Mediterranean Sea. *Science of the total Environment* 407, pp. 887-898.

**Garcia-Orellana J., Gracia E., Vizcaino A., Masque P., Olid C., Martinez- Ruiz F., Pinero E., Sanchez-Cabeza J. A. and Danobeitia J. (2006)** Identifying instrumental and historical earthquake records in the SW Iberian Margin using  $^{210}\text{Pb}$  turbidite dating. *Geophys. Res. Lett.* 33, L24601.

**Gascó, C., Antón, M.P., Pozuelo, M., Meral, J., González, A.M., Papucci, C., Delfanti, R., (2002).** Distribution of Pu, Am and Cs in margin sediments from the western Mediterranean (Spanish coast). *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 59, pp. 75-89.

**Gaudette, H.E., Flight, W.R., Toner, L., Folger, D.W., (1974).** An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *J Sediment Res* 44, 249-253.

**Goldberg E. D. (1963)** Geochronology with  $^{210}\text{Pb}$ . In *Radioactive Dating. Proceedings of a Symposium.* International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 21–131.

**Goldberg E. D., Gamble E., Grin J. J. and Koide M. (1977)** Pollution history of Narragansett Bay as recorded in its sediments. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* 5, 549–561.

**Heldal, H.E., Varskog, P., Føzn, L., (2002).** Distribution of selected anthropogenic radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$ ) in marine sediments with emphasis on the Spitsbergen-Bear Island area. *The Science of Total Environment*, Vol. 293, pp. 233-245.

**Kalfas, C.A., (2011).** Proceedings for 20th conference of the Hellenic Nuclear Physics Society, 27-28 May 2011, Athens, Greece.

**Karageorgis, A.P., (1992).** Mineralogical - Geochemical & Stratigraphic study of the Holocene cover in the marine area between Attica-Euboea-N. Cyclades. PhD Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Greece (in Greek).

**Kaste J. M., Friedland A. J. and Sturup S. (2003)** Using stable and radioactive isotopes to trace atmospherically deposited Pb in montane forest soils. *Environ. Sci. Technol.* 37, 3560–3567.

**Kim G., Hussain N., Church T. M. and Carey W. L. (1997)** The fallout isotope Bi-207 in a Delaware salt marsh: a comparison with  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  as a geochronological tool. *Sci. Total Environ.* 196, 31–41.

**Kirchner, G. 1998.** Modeling the Migration of Fallout Radionuclides in Soil Using a Transfer Function Model. *Health physics* 74, 78-85.

**Knoll, G.F., 1989.** Radiation Detection and Measurement, Third Edition. John Wiley and Sons, New York.

**Koide M., Bruland K.W. and Goldberg E. D. (1973)**  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  and  $^{210}\text{Pb}$  geochronologies in marine and lake sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 37, 1171–1181.

**Krishnaswamy S., Lal D., Martin J. and Meybeck M. (1971)** Geochronology of lake sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 11, 407–414.

**Lambrakis, N. J., & Stamatis, G. N. (2008).** Contribution to the study of thermal waters in Greece: Chemical patterns and origin of thermal water in the thermal springs of Lesvos. *Hydrological Processes*, 22(2), 171–180.

**Ligero, R.A., Barrera, M., Casas-Ruiz, M., (2005).** Levels of  $^{137}\text{Cs}$  in muddy sediments on the seabed in the Bay of Cádiz (Spain). Part I. Vertical and spatial distribution of activities. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 80, pp. 75-86.

**Lilley, J., 2001.** Nuclear Physics Principals and Applications. John Wiley and Sons, Chichester.

**Marmier, P., Sheldon, E., 1969.** Physics of nuclei and particles, Volume I. Academic Press, New York.

**Marshall W. A., Gehrels W. R., Garnett M. H., Freeman S. P. H. T., Maden C. and Xu S. (2007)** The use of 'bomb spike' calibration and high-precision AMS C-14 analyses to date saltmarsh sediments deposited during the past three centuries. *Quatern. Res.* 68, 325–337.

**Oktay S. D., Santschi P. H., Moran J. E. and Sharma P. (2000)** The 129iodine bomb pulse recorded in Mississippi River Delta sediments: results from isotopes of I, Pu, Cs, Pb and C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 989–996.

**Palanques A., Sanchez-Cabeza J. A., Masque P. and Leon L. (1998)** Historical record of heavy metals in a highly contaminated mediterranean deposit: the Besos prodelta. *Mar. Chem.* 61, 209–217.

**Papaefthymiou H., Papatheodorou G., Moustakli A., Christodoulou D. b, Geraga M., (2007).** Natural radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  distributions and their relationship with sedimentological processes in Patras Harbour, Greece. *Journal of Environmental Radioactivity* 94, pp. 55-74.

**Radakovitch, O., Charmasson, S., Arnaud, M., Bouisset, P., 1999.**  $^{210}\text{Pb}$  and caesium accumulation in the Rhône Delta sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Research* 16, 363378.

**Robbins J. A. (1978)** Geochemical and geophysical applications of radioactive lead isotopes. In *Biochemistry of Lead* (ed. J. O. Nriagu). Elsevier, Amsterdam, pp. 85 -393.

**Robbins J. A. and Edgington D. N. (1975)** Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$ . *Geochim. Cosmochim. Acta* 39, 285–304.

**Ruiz-Fernandez A. C., Hillaire-Marcel C., de Vernal A., Machain-Castillo M. L., Vasquez L., Ghaleb B., Aspiazua-Fabian J. A. and Paez-Osuna F. (2009)** Changes of coastal sedimentation in the Gulf of Tehuantepec, South Pacific Mexico, over the last 100 years from short-lived radionuclide measurements. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 82(3), 525–536.

**Sanchez-Cabeza J. A., Garcia-Talavera M., Costa E., Pena V., Garcia-Orellana J., Masque P. and Nalda C. (2007)** Regional calibration of erosion radiotracers  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{136}\text{Cs}$ : atmospheric fluxes to soils Northern Spain. *Environ. Sci. Technol.* 41, 1324–1330.

**Sanchez-Cabeza J. A., Ani-Ragolta I. and Masque P. (2000)** Some considerations of the  $^{210}\text{Pb}$  constant rate of supply (CRS) dating model. *Limnol. Oceanogr.* 45, 990–995.

**Sanchez-Cabeza, J.A., Masqué, P., Ani-Ragolta, I., Merino, J., Frignani, M., Alvisi, F., Palanques, A., Puig, P., 1999.** Sediment accumulation rates in the southern Barcelona continental margin (NW Mediterranean Sea) derived from  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  chronology. *Progress in Oceanography* 44, 313-33.

**Schottler S. P. and Engstrom D. R. (2006)** A chronological assessment of Lake Okeechobee (Florida) sediments using multiple dating markers. *J. Paleolimnol.* 36, 19–36.

**Scoullou, M., Bachas, L., & Dasenakis, M. (1980).** Preliminary study of the pollution of Geras Gulf. Techn. Report. Lab. of Inorganic Chemistry. University of Athens. (In Greek).

**Sioulas, A., Anagnostou, C., & Kersten, M. (1990).** Heavy metals in the modern sediments of Elefsis gulf, as an index of anthropogenous impact in the marine environment of the area. 2nd Chemistry Congress of Greece and Cyprus, Athens, vol. 1, pp. 280–285.

**Sioulas, A., Anagnostou, Ch. (1989).** Heavy metals in sediments of Geras gulf. Congress of Environmental Science and Technology, Ed. Lekkas Th., Lesvos, Greece, pp. 508-518 (in Greek)

**Semizhon, T., Röllin, S., Spasova, Y., Klemm E., 2010.** Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment. *Journal of Environmental Radioactivity* 101, 385-402.

**Smith J. N. and Walton A. (1980)** Sediment accumulation rates and geochronologies measured in the Saguenay Fjord using the <sup>210</sup>Pb dating method. *Geochim. Cosmochim. Acta* 44, 225–240.

**Tamvaki, N., & Tsirtsis, G. (2005).** Integrated modelling in coastal lagoons watershed modelling - Gulf of Gera case study.

**Theocharis, A., & Georgopoulos, D. (1984).** Study of the physical parameters of the gulf of Gera in Lesvos. First Panhellenic Symposium of Oceanography and Fisheries, Athens, Greece (In Greek).

**Tsirtsis, G., Kitsiou, D., Nitis, T., & Avagianou, E. (2003).** Synthesis Report Gulf of Gera. DITTY Project Synthesis Report 2003, University of the Aegean, Lesvos, Greece.

**Tuttle M. P., Ruffman A., Anderson T. and Jeter H. (2004)** Distinguishing tsunami from storm deposits in Eastern North America: the 1929 Grand Banks Tsunami versus the 1991 Halloween Storm. *Seismol. Res. Lett.* 75, 117–131.

**UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation),2000.** Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Annexes, (New York: United Nations).

**van den Bergh G. D., Boer W., de Haas H., van Weering Tj C. E. and van Wijhe R. (2003)** Shallow marine tsunami deposits in Teluk Banten NW Java, Indonesia., generated by the 1883 Krakatau eruption. *Mar. Geol.* 197, 13–34.

**von Gunten L., Grosjean M., Beer J., Grob P., Morales A. and Urrutia R. (2009)** Age modeling of young non-varved lake sediments: methods and limits. Examples from two lakes in Central Chile. *J. Paleolimnol.* 42, 401–412.

**Walling, D.E., and He., Q., 1999.** Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality* 28, 611-622.

### Ελληνική Βιβλιογραφία

**Αναγνώστου, Χ., & Σιούλας, Α. (1989).** Η ιζηματολογία του κόλπου της Γέρας (Λέσβος) και η ανθρωπογενής επίδραση στον γεωχημικό κύκλο της περιοχής. *Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.*, XXIII/1, 193–207.

**Αρχοντίσης Γ.Β., (1998).** Ποσοτική Εκτίμηση του Θαλάσσιου Ευτροφισμού από τις μη Σημειακές Πηγές Ρύπανσης. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

**Ασημακόπουλος, Π.Α., 2005.** Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική, 2η Έκδοση. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Ιωάννινα.

**Γεώργα, Ε., 2016.** Ραδιο – ιχνηθέτηση των υποβρύχιων αναβλύσεων στην περιοχή Θέρμα Λέσβου. Πτυχιακή εργασία. Τ.Ω.Θ.Β.Ε, Σχολή Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

**Γαζής, Ε.Ν., (2002).** «Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα



- Ε.Κ.Θ.Ε., (1986).** 1η Τεχνική Έκθεση Προγράμματος «Οικολογική Μελέτη Κόλπου Γέρας».
- Ελευθερίου, Γ. 2014.** Εκτίμηση και Χωροχρονική διασπορά ραδιοδουκλιδίων στο υδάτινο περιβάλλον. Διδακτορική Διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Φυσικής.
- Θεοχάρης Α. και Γεωργόπουλος Δ., (1986).** Μελέτη φυσικών παραμέτρων κόλπου Γέρας
- Κατσικάτσος, Γ., Ματαράγκας, Δ, Μιγκίρος, Γ., & Τριανταφύλλης, Μ. (1993).** Γεωλογική μελέτη στη νήσο Λέσβο. Αθήνα.
- Κολοβογιάννης Β. και Τσιρτσής Γ., (2015).** Διερεύνηση της Υδροδυναμικής Κυκλοφορίας ενός Παράκτιου Οικοσυστήματος με χρήση Τρισδιάστατου Αριθμητικού Ομοιώματος: Εφαρμογή του POM στον Κόλπο Γέρας, Λέσβος. (8ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας & Αλιείας)
- Κρασακοπούλου Ε. (2004).** «Εργαστηριακές Ασκήσεις Χημικής Ωκεανογραφίας». Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- Μανούτσογλου, Ε., Χασιώτης, Θ., Βελεγράκης, Α., & Χατζηλίας, Ν. (2015).** Ακουστική διασκόπηση του μαλακού υποστρώματος στον κόλπο της Γέρας, Λέσβος. 11ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας & Αλιείας, Μυτιλήνη, Λέσβος, Ελλάδα, σελ. 1021-1024.
- Μαραγκός Φ. (2017).** Βαθμονόμηση ανιχνευτή φασματοσκοπίας-γ μεσαίας διακριτικής ικανότητας (CeBr<sub>3</sub>) για εργαστηριακές μετρήσεις δειγμάτων ιζήματος [Εργασία]. - Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017.
- Μιχαλοπούλου- Πετροπούλου, Β. (2014).** Μελέτη επιπέδων ραδιενέργειας και συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων σε παράκτιες περιοχές του Λαυρίου. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Παπάκης, Ν. (1966).** Γεωλογική και γεωχημική μελέτη των μεταλλικών πηγών Θερμής Μυτιλήνης. Αδημοσίευτη Έκθεση Ι.Γ.Μ.Ε. Αθήνα.
- Παππά, Φ., (2014).** Μελέτη και διασπορά ραδιο-τοξικών μετάλλων από ανθρωπογενείς δραστηριότητες σε παράκτια ζώνη της Χαλκιδικής. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- PEM-08, (2017).** Πρωτόκολλο επικύρωσης μεθόδου για τον προσδιορισμό κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων στο σύστημα XRF PW-2400, Κωδικός: PEM-08, Αρ. Έκδοσης: 1.1, Ημερομηνία Έκδοσης: 11/07/2017.
- Σαϊτάνης Σ. (2019).** Μελέτη υποθαλάσσιων αναβλύσεων στην περιοχή Θέρμα Λέσβου με επιτόπιες καταγραφικές μεθόδους (in situ), Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Τ.Ω.Θ.Β.Ε, Σχολή Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- Φυτιάνος, Κ., & Σαμανίδου, Β. (1988).** Η Ρύπανση των Θαλασσών. University Studio Press.



## Παράρτημα

**Παράρτημα 1:** Πίνακες ποσοστιαίων τιμών των κατηγοριών άμμου-ιλύος*Πίνακας Π1: Πίνακας αποτελεσμάτων κοκκομετρικής ανάλυσης των δειγμάτων του πυρήνα (THC 1-THC 12).*

Δείγμα	Βάθος (cm)	ιλύς (%)	άμμος (%)
THC 1	1	1.8	98.2
THC 2	3	2.6	97.4
THC 3	5	1.1	98.9
THC 4	6.5	1.1	98.9
THC 5	7.5	1.4	98.6
THC 6	8.5	1.7	98.3
THC 7	9.5	1.9	98.1
THC 8	10.5	1.8	98.2
THC 9	11.5	1.8	98.2
THC 10	13	2.3	97.7
THC 11	14.5	2.6	97.4
THC 12	15.5	2.3	97.7

*Πίνακας Π2: Πίνακας αποτελεσμάτων κοκκομετρικής ανάλυσης των επιφανειακών δειγμάτων (THS 1-THS 7).*

Δείγμα	ιλύς (%)	άμμος (%)
THS 1 top	0	100
THS 1 bot	0	100
THS 2 top	0.1	99.9
THS 2 bot	0.1	99.9
THS 3 top	0.1	99.9
THS 3 bot	0.3	99.7
THS 4 top	6.4	93.6
THS 4 bot	3.3	96.7
THS 5 top	1.8	98.2
THS 5 bot	0.9	99.1
THS 6 top	1.8	98.2
THS 6 bot	1.1	98.9
THS 7 top	93.1	6.9
THS 7 bot	95.1	4.9

**Παράρτημα 2: Πίνακες ποσοστιαίων τιμών των συγκεντρώσεων του οργανικού άνθρακα**

*Πίνακας Π3: Πίνακας αποτελεσμάτων των ογκομετρήσεων και των συγκεντρώσεων του οργανικού άνθρακα στον πυρήνα ιζημάτος.*

Δείγματα	Βάθος (cm)	1η Ογκομέτρηση (ml)	2η Ογκομέτρηση (ml)	%Corg. 1η Ογκομέτρηση	%Corg. 2η Ογκομέτρηση	Μέσος Όρος Corg.
THC1	1	21.4	21.6	0.14	0.08	0.11
THC2	3	20.6	20.2	0.34	0.46	0.40
THC3	5	20.4	20.9	0.41	0.27	0.34
THC4	6.5	21.5	20.9	0.11	0.27	0.19
THC5	7.5	21.3	20.6	0.16	0.35	0.25
THC6	8.5	20.5	20.7	0.38	0.33	0.35
THC7	9.5	20.9	21	0.27	0.24	0.26
THC8	10.5	20.9	20.5	0.27	0.38	0.33
THC9	11.5	20.5	20.5	0.37	0.36	0.36
THC10	13	21.5	21	0.10	0.24	0.17
THC11	14.5	20.5	20.6	0.36	0.34	0.35
THC12	15.5	20.3	20.4	0.42	0.39	0.40

*Πίνακας Π4: Πίνακας αποτελεσμάτων των ογκομετρήσεων και των συγκεντρώσεων του οργανικού άνθρακα στα επιφανειακά δείγματα.*

Δείγματα	1η Ογκομέτρηση (ml)	2η Ογκομέτρηση (ml)	%Corg. 1η Ογκομέτρηση	%Corg. 2η Ογκομέτρηση	Μέσος Όρος Corg.
THS 1 top	21.7	21.5	0.05	0.11	0.08
THS 1 bot	21.5	21.2	0.10	0.19	0.15
THS 2 top	21.1	20.9	0.20	0.25	0.23
THS 2 bot	21.2	21	0.19	0.24	0.22
THS 3 top	21.3	21.3	0.16	0.15	0.16
THS 3 bot	21.9	21.6	0.00	0.08	0.04
THS 4 top	19.5	19.6	0.65	0.62	0.63
THS 4 bot	19.8	20	0.54	0.48	0.51
THS 5 top	20.2	20.3	0.45	0.42	0.43
THS 5 bot	20.8	20.5	0.28	0.36	0.32
THS 6 top	21.4	21.6	0.14	0.08	0.11
THS 6 bot	20.95	20.9	0.26	0.27	0.26
THS 7 top	17.9	18	1.18	1.04	1.11
THS 7 bot	17.5	17.2	1.19	1.32	1.26

**Παράρτημα 3: Πίνακες αποτελεσμάτων των συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων (ppm)**

*Πίνακας Π5: Πίνακας συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων των δειγμάτων του πυρήνα ιζηματοσ, τα οποία αναλύθηκαν με τη μέθοδο φθορισμού ακτίνων Χ.*

Δείγμα	Βάθος (cm)	Al (ppm)		Si (ppm)		P (ppm)		K (ppm)		Ca (ppm)		Ti (ppm)	
THC 1	1	12649	± 701	309257	± 37637	183	± 31	4732	± 603	90708	± 20944	1097	± 161
THC 2	3	14766	± 818	292052	± 35543	170	± 29	5313	± 677	100429	± 23189	1307	± 191
THC 3	5	14131	± 783	313464	± 38149	196	± 33	4898	± 624	83059	± 19178	1619	± 237
THC 4	6.5	10267	± 569	307854	± 37466	122	± 21	4483	± 572	95926	± 22149	1253	± 184
THC 5	7.5	13178	± 730	312155	± 37989	175	± 30	5313	± 677	85704	± 19789	1439	± 211
THC 6	8.5	16089	± 891	301216	± 36658	218	± 37	4732	± 603	94139	± 21737	1529	± 224
THC 7	9.5	12067	± 668	312295	± 38006	214	± 36	5147	± 656	91708	± 21175	1463	± 214
THC 8	10.5	12437	± 689	296914	± 36134	179	± 30	5147	± 656	97641	± 22545	1541	± 226
THC 9	11.5	14025	± 777	305657	± 37198	196	± 33	5728	± 730	90565	± 20911	1493	± 219
THC 10	13	15824	± 877	301075	± 36641	236	± 40	5728	± 730	92566	± 21374	1529	± 224
THC 11	14.5	14448	± 800	317812	± 38678	249	± 42	5894	± 751	83417	± 19261	1715	± 251
THC 12	15.5	15877	± 880	321225	± 39093	227	± 39	5645	± 720	79199	± 18287	1631	± 239

Δείγμα	Βάθος (cm)	Fe (ppm)		Na (ppm)		Mg (ppm)		S (ppm)		Mn (ppm)		Ba (ppm)	
THC 1	1	16853	± 2857	10460	± 3715	5911	± 619	565	± 192	310	± 19	98	± 6
THC 2	3	19301	± 3271	10608	± 3768	6514	± 682	713	± 242	333	± 21	117	± 12
THC 3	5	21119	± 3580	10163	± 3610	5549	± 581	344	± 117	573	± 35	81	± 8
THC 4	6.5	19091	± 3236	5119	± 1818	5066	± 530	368	± 125	225	± 14	118	± 12
THC 5	7.5	21329	± 3615	6825	± 2424	5609	± 587	412	± 140	263	± 16	101	± 10
THC 6	8.5	20140	± 3414	10905	± 3873	5790	± 606	336	± 114	341	± 21	76	± 8
THC 7	9.5	20629	± 3497	5341	± 1897	4825	± 505	264	± 90	232	± 14	108	± 11
THC 8	10.5	20559	± 3485	10312	± 3663	6574	± 688	288	± 98	302	± 19	160	± 16
THC 9	11.5	22378	± 3793	7047	± 2503	5971	± 625	344	± 117	294	± 18	171	± 17
THC 10	13	22517	± 3817	5935	± 2108	5730	± 600	300	± 102	302	± 19	132	± 13
THC 11	14.5	22448	± 3805	5267	± 1871	5187	± 543	232	± 79	279	± 17	132	± 13
THC 12	15.5	22028	± 3734	5045	± 1792	5368	± 562	148	± 50	256	± 16	115	± 11

*Πίνακας Π6: Μέγιστα και ελάχιστα συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων στα δείγματα του πυρήνα ιζηματοσ.*

Κύριο στοιχείο (ppm)	min	max	Βάθος (max) (cm)
Al	10267	16089	8.5
Si	292052	321225	15.5
P	122	249	14.5
K	4483	5894	14.5
Ca	79199	100429	3
Ti	1097	1715	14.5
Fe	16853	22517	13
Na	5045	10905	13
Mg	4825	6574	10.5
S	148	713	3
Mn	225	573	5
Ba	76	171	11.5

**Πίνακας Π7:** Πίνακας συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων των επιφανειακών δειγμάτων, τα οποία αναλύθηκαν με τη μέθοδο φθορισμού ακτίνων Χ.

Δείγμα	Al (ppm)		Si (ppm)		P (ppm)		K (ppm)		Ca (ppm)		Ti (ppm)	
THS 1 top	10797	± 598	415942	± 50620	96	± 16	5396	± 688	5718	± 1320	1355	± 198.495
THS 1 bot	13178	± 730	421646	± 51314	253	± 43	5230	± 667	4217	± 974	791	± 115.935
THS 2 top	14342	± 795	413371	± 50307	607	± 103	6724	± 857	5504	± 1271	1217	± 178.294
THS 2 bot	11855	± 657	422394	± 51405	100	± 17	5147	± 656	8863	± 2047	917	± 134.379
THS 3 top	12437	± 689	419682	± 51075	79	± 13	5645	± 720	6219	± 1436	1181	± 173.025
THS 3 bot	15401	± 853	413745	± 50353	157	± 27	5728	± 730	6862	± 1584	1019	± 149.311
THS 4 top	32284	± 1789	327302	± 39833	353	± 60	9132	± 1164	47963	± 11075	2140	± 313.552
THS 4 bot	23128	± 1281	330108	± 40174	284	± 48	8135	± 1037	56112	± 12956	1942	± 284.568
THS 5 top	13496	± 748	200327	± 24380	288	± 49	5811	± 741	178485	± 41212	1457	± 213.426
THS 5 bot	11326	± 627	229219	± 27896	157	± 27	4483	± 572	165118	± 38126	1127	± 165.12
THS 6 top	12649	± 701	309257	± 37637	183	± 31	4732	± 603	90708	± 20944	1097	± 160.728
THS 6 bot	12199	± 676	310659	± 37807	159	± 27	4690	± 598	89492	± 20664	1436	± 210.352
THS 7 top	75523	± 4184	172324	± 20972	406	± 69	24572	± 3133	79414	± 18337	4742	± 694.733
THS 7 bot	85684	± 4747	181206	± 22053	445	± 76	25984	± 3313	61472	± 14194	6001	± 879.176

Δείγμα	Fe (ppm)		Na (ppm)		Mg (ppm)		S (ppm)		Mn (ppm)		Ba (ppm)	
THS 1 top	19650	± 3331	6751	± 2398	4584	± 480	40	± 14	178	± 11	105	± 10
THS 1 bot	18881	± 3200	1632	± 580	3739	± 392	92	± 31	271	± 17	131	± 13
THS 2 top	21958	± 3722	2003	± 711	4162	± 436	80	± 27	248	± 15	150	± 15
THS 2 bot	19441	± 3295	1261	± 448	3317	± 347	172	± 58	201	± 12	79	± 8
THS 3 top	22378	± 3793	1780	± 632	3559	± 373	84	± 29	225	± 14	121	± 12
THS 3 bot	19580	± 3319	2151	± 764	3981	± 417	48	± 16	256	± 16	98	± 10
THS 4 top	26643	± 4516	4970	± 1765	8987	± 941	705	± 239	325	± 20	130	± 13
THS 4 bot	24685	± 4184	5564	± 1976	7298	± 764	396	± 134	232	± 14	161	± 16
THS 5 top	19021	± 3224	8902	± 3162	7841	± 821	1225	± 416	519	± 32	102	± 10
THS 5 bot	16573	± 2809	4748	± 1686	6454	± 676	789	± 268	426	± 26	99	± 10
THS 6 top	16853	± 2857	10460	± 3715	5911	± 619	565	± 192	310	± 19	98	± 10
THS 6 bot	20105	± 3408	7641	± 2714	5308	± 556	356	± 121	399	± 25	99	± 10
THS 7 top	50979	± 8641	15653	± 5560	23643	± 2475	3144	± 1066	767	± 47	319	± 32
THS 7 bot	55594	± 9423	15504	± 5507	24367	± 2551	2936	± 996	751	± 46	340	± 34

**Πίνακας Π8:** Μέγιστα και ελάχιστα συγκεντρώσεων των κύριων στοιχείων στα επιφανειακά δείγματα.

Κύριο στοιχείο (ppm)	min	max	Δείγμα (max)
<b>Al</b>	10797	85684	THS7 bot
<b>Si</b>	172324	422394	THS2 bot
<b>P</b>	79	607	THS2 top
<b>K</b>	4483	25984	THS7 bot
<b>Ca</b>	4217	178485	THS5 top
<b>Ti</b>	791	6001	THS7 bot
<b>Fe</b>	16573	55594	THS7 bot
<b>Na</b>	1261	15653	THS7 top
<b>Mg</b>	3317	24367	THS7 bot
<b>S</b>	40	3144	THS7 top
<b>Mn</b>	178	767	THS7 top
<b>Ba</b>	79	340	THS7 bot

**Παράρτημα 4: Πίνακες αποτελεσμάτων των συγκεντρώσεων της ραδιενέργειας (Bq/Kg)**

Πίνακας Π9: Πίνακας συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των δειγμάτων του πυρήνα ιζηματοσ, τα οποία αναλύθηκαν με τη μέθοδο HPGe.

Δείγμα	<sup>210</sup> Pb (Bq/Kg)	<sup>214</sup> Pb (Bq/Kg)	<sup>214</sup> Bi (Bq/Kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/Kg)	<sup>235</sup> U (Bq/Kg)	<sup>228</sup> Ac (Bq/Kg)	<sup>208</sup> Tl (Bq/Kg)	<sup>137</sup> Cs (Bq/Kg)	<sup>40</sup> K (Bq/Kg)
THC1	48.43 ± 5.58	10.44 ± 1.25	9.58 ± 2.63	10.01 ± 2.02	0.35 ± 0.09	22.84 ± 1.66	17.96 ± 4.07	1.61 ± 0.36	197.43 ± 16.95
THC2	55.80 ± 5.10	12.66 ± 1.14	12.36 ± 4.27	12.51 ± 2.15	1.51 ± 0.20	21.55 ± 2.10	24.01 ± 2.35	1.63 ± 0.27	179.88 ± 15.45
THC3	49.67 ± 3.91	7.24 ± 0.58	9.17 ± 0.98	8.21 ± 1.35	1.74 ± 0.17	25.29 ± 1.74	23.18 ± 1.72	1.37 ± 0.21	137.68 ± 10.68
THC4	43.83 ± 5.83	6.78 ± 1.51	6.53 ± 1.60	6.66 ± 1.56	0.66 ± 0.13	25.30 ± 2.42	28.91 ± 2.63	1.75 ± 0.30	123.44 ± 12.10
THC5	51.24 ± 4.89	14.43 ± 1.65	16.04 ± 2.53	15.24 ± 2.46	5.11 ± 0.43	31.52 ± 2.60	36.61 ± 2.77	1.52 ± 0.31	200.14 ± 17.32
THC6	36.57 ± 5.36	8.29 ± 1.09	11.35 ± 1.84	9.82 ± 1.88	1.16 ± 0.17	20.59 ± 2.01	24.22 ± 1.94	1.25 ± 0.26	160.45 ± 14.12
THC7	36.16 ± 5.84	16.81 ± 1.34	17.55 ± 2.27	17.18 ± 2.70	0.19 ± 0.07	37.34 ± 2.78	15.19 ± 2.01	0.97 ± 0.35	161.84 ± 14.73
THC8	41.52 ± 3.94	5.96 ± 0.94	4.66 ± 2.19	5.31 ± 1.29	4.43 ± 0.37	30.08 ± 2.47	30.23 ± 3.63	0.73 ± 0.23	170.75 ± 15.20
THC9	59.42 ± 6.55	28.35 ± 1.64	22.79 ± 2.14	25.57 ± 3.61	3.81 ± 0.38	24.38 ± 2.31	32.89 ± 4.03	0.95 ± 0.38	144.07 ± 14.21
THC10	25.67 ± 2.55	6.27 ± 0.52	7.41 ± 0.85	6.84 ± 1.19	1.19 ± 0.13	16.57 ± 1.41	19.41 ± 1.61	0.87 ± 0.16	127.54 ± 9.98
THC11	25.39 ± 3.55	10.81 ± 0.82	9.84 ± 1.93	10.32 ± 2.16	4.64 ± 0.43	32.84 ± 2.76	26.19 ± 2.54	1.31 ± 0.28	221.71 ± 18.51
THC12	34.18 ± 4.62	34.24 ± 1.75	31.84 ± 2.34	33.04 ± 3.68	1.20 ± 0.17	29.51 ± 2.45	31.16 ± 2.72	1.60 ± 0.26	178.10 ± 15.06

Πίνακας Π10: Πίνακας συγκεντρώσεων ραδιενέργειας των επιφανειακών δειγμάτων, τα οποία αναλύθηκαν με τη μέθοδο HPGe.

Δείγμα	<sup>210</sup> Pb (Bq/Kg)	<sup>214</sup> Pb (Bq/Kg)	<sup>214</sup> Bi (Bq/Kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/Kg)	<sup>235</sup> U (Bq/Kg)	<sup>228</sup> Ac (Bq/Kg)	<sup>208</sup> Tl (Bq/Kg)	<sup>137</sup> Cs (Bq/Kg)	<sup>40</sup> K (Bq/Kg)
THS1 top	48.20 ± 4.87	17.79 ± 1.12	19.22 ± 2.14	18.50 ± 2.66	2.11 ± 0.24	23.18 ± 1.92	18.83 ± 1.84	0.96 ± 0.22	208.91 ± 16.56
THS1 bot	62.57 ± 5.56	19.26 ± 1.33	20.96 ± 2.25	20.11 ± 2.89	3.03 ± 0.31	22.72 ± 2.27	19.72 ± 2.03	0.75 ± 0.23	217.18 ± 18.72
THS2	53.20 ± 4.50	18.92 ± 1.00	21.56 ± 1.64	20.24 ± 2.46	1.13 ± 0.15	19.87 ± 1.76	13.74 ± 1.77	0.63 ± 0.25	127.10 ± 12.73
THS3	43.63 ± 3.68	12.19 ± 0.70	12.78 ± 1.36	12.49 ± 1.77	0.31 ± 0.07	21.70 ± 1.60	20.94 ± 1.12	0.34 ± 0.11	141.86 ± 12.41
THS4 top	161.15 ± 9.54	47.43 ± 1.97	48.66 ± 2.70	48.05 ± 3.73	1.85 ± 0.17	51.65 ± 2.75	52.00 ± 3.21	3.54 ± 0.33	506.99 ± 12.41
THS4 bot	92.43 ± 7.67	18.96 ± 1.19	18.90 ± 2.25	18.93 ± 2.98	0.72 ± 0.14	15.31 ± 1.74	16.39 ± 1.92	2.10 ± 0.37	254.74 ± 20.53
THS5 top	71.02 ± 6.39	8.11 ± 0.67	9.80 ± 1.16	8.95 ± 1.92	2.53 ± 0.28	31.18 ± 2.59	31.23 ± 2.80	1.65 ± 0.36	216.42 ± 18.47
THS5 bot	52.00 ± 5.41	39.64 ± 2.11	56.73 ± 4.04	48.18 ± 5.32	1.41 ± 0.22	41.94 ± 3.82	50.56 ± 3.96	1.48 ± 0.30	375.29 ± 27.48
THS 6 top	48.43 ± 5.58	10.44 ± 1.25	9.58 ± 2.63	10.01 ± 2.02	0.35 ± 0.09	22.84 ± 1.66	17.96 ± 4.07	1.61 ± 0.36	197.43 ± 16.95
THS 6 bot	46.75 ± 4.87	7.01 ± 1.05	7.85 ± 1.29	7.43 ± 1.45	1.20 ± 0.15	25.30 ± 2.08	26.05 ± 2.17	1.56 ± 0.26	130.56 ± 11.39
THS 7 top	162.00 ± 13.00	28.57 ± 2.48	24.65 ± 2.52	26.61 ± 3.27	8.40 ± 0.60	44.92 ± 3.07	31.90 ± 3.72	7.09 ± 0.68	870.15 ± 50.80
THS 7 bot	154.00 ± 13.00	24.57 ± 1.75	30.39 ± 2.60	27.48 ± 3.58	4.37 ± 0.40	45.50 ± 3.03	40.98 ± 3.37	8.09 ± 0.78	843.76 ± 50.63



