



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-  
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΧΡΙΣΤΟΓΛΟΥ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΟΙ ΥΔΡΙΤΕΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΕΣ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2020





ΑΝΤΩΝΙΟΣ Γ. ΧΡΙΣΤΟΓΛΟΥ  
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5201

ΟΙ ΥΔΡΙΤΕΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΕΣ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-  
Κοιτασματολογίας  
Εργαστήριο Κοιτασματολογίας

**Επιβλέπων**

Καθηγητής Γεωργακόπουλος Ανδρέας



© Αντώνιος Γ. Χρίστογλου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΟΙ ΥΔΡΙΤΕΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

– Διπλωματική Εργασία

© Antonios G. Christoglou, School of Geology, Dept. of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, 2020

All rights reserved.

METHANE HYDRATES: FORMATION AND EMERGING TECHNOLOGIES –

*Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

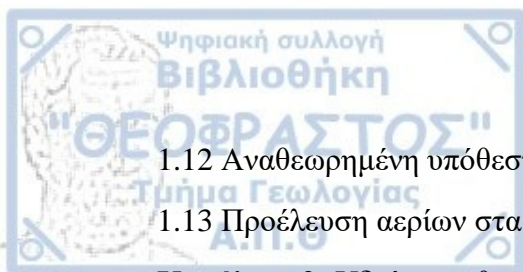
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: <https://worldoceanreview.com/en/wor-1/energy/methane-hydrates/>



Περιεχόμενα:

Ευχαριστίες.....	07
Περίληψη.....	08
Abstract.....	09
Εισαγωγή.....	10
<b>Κεφάλαιο 1:</b> Ορισμοί – γενικά στοιχεία – περιοχές με υδρίτες μεθανίου στην παγκόσμια βιβλιογραφία.....	11
1.1 Τι ονομάζουμε υδρίτες μεθανίου.....	12
1.2 Δομή υδριτών.....	12
1.3 Δημιουργία των υδριτών μεθανίου σε θαλάσσια ιζήματα.....	13
1.4 Υδρίτες μεθανίου σε πετρώματα ξενιστές.....	15
1.5 Μοντέλο τριχοειδούς ανάπτυξης των υδριτών μεθανίου σε πορώδες μέσο.....	15
1.6 Μετανάστευση υδριτών μεθανίου στην υποθαλάσσια ζώνη ισορροπίας.....	15
1.7 Ηφαιστεια λάσπης και υδρίτες μεθανίου.....	19
1.8 Ηφαιστεια λάσπης ανά τον κόσμο.....	20
1.9 Ανατομία ηφαιστειών λάσπης με βάση την πυρινοληψία LEG160.....	21
1.10.1 Ηφαιστεια λάσπης στο Μεσογειακό τόξο και σύγκριση τους.....	24
1.10.2 Ηφαιστεια λάσπης στα Νησιά Μπαρμπάντος.....	26
1.10.3 Ηφαιστεια λάσπης στη Μαύρη Θάλασσα.....	26
1.10.4 Ηφαιστεια λάσπης στις βαθιές αποθέσεις της Α. Μεσογείου στο Δέλτα του Νείλου.....	27
1.10.5 Ηφαιστεια λάσπης στα Αλεούτια Νησιά στο περιθώριο της Αλάσκας.....	28
1.10.6 Ηφαιστεια λάσπης στην Βρετανική Κολομβία.....	28
1.10.7 Ηφαιστεια λάσπης στο περιθώριο της Κασκαδίας [Cascadia].....	29
1.10.8 Ηφαιστεια λάσπης στην Κόστα Ρίκα.....	29
1.10.9 Ηφαιστεια λάσπης στη Βόρεια Κολομβία, στον Παναμά και στο Εκουαδόρ.....	29
1.10.10 Ηφαιστεια λάσπης στην Γροιλανδία και στον Βόρειο Ατλαντικό.....	30
1.10.11 Ηφαιστεια λάσπης στο Μαρόκο.....	31
1.10.12 Λοιπές περιοχές ηφαιστειών λάσπης.....	31
1.11 Παλαιότερα μοντέλα δημιουργίας ηφαιστειών λάσπης και διαπυρισμού στη Μεσογειακή τάφρο.....	31



1.12 Αναθεωρημένη υπόθεση δημιουργίας των ηφαιστειών λάσπης.....	33
1.13 Προέλευση αερίων στα ηφαίστεια λάσπης.....	38
<b>Κεφάλαιο 2:</b> Υδρίτες μεθανίου στην Ελλάδα, τεκτονική εξέλιξη του Ελλαδικού χώρου και γεωλογική κίνηση της Ν/Α. Μεσογείου.....	41
2.1 Ηφαίστεια λάσπης και υδρίτες μεθανίου στο σύμπλεγμα βουνών Αναξίμανδρος.....	42
2.2 Παλαιότερες και πρόσφατες έρευνες στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος.....	45
2.3 Ηφαίστειο Λάσπης Άμστερνταμ.....	49
2.4 Ηφαίστειο λάσπης Καζάν.....	55
2.5 Ηφαίστειο λάσπης Κούλα.....	58
2.6 Ηφαίστειο λάσπης Αθήνα.....	65
2.7 Ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη.....	71
2.8 Λιθο-Βιοστρωματογραφική ανάλυση των υλικών λάσπης και κλαστών στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος.....	80
2.9 Εκτίμηση όγκου μεθανίου και ισορροπία υδριτών στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος.....	82
2.10 Φυσικές ιδιότητες ιζημάτων και ιζηματογενείς διεργασίες στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος.....	84
2.11 Προέλευση του υποβάθρου της Ανατολικής Μεσογείου.....	93
2.12 Εστιακοί σεισμικοί μηχανισμοί στο νότιο Αιγαίο και Κύπρο.....	94
<b>Κεφάλαιο 3:</b> Δυνητική αξιολόγηση υδριτών μεθανίου.....	96
3.1 Σημασία και αποθέματα υδριτών μεθανίου.....	97
3.2 Κλιματική αλλαγή και επίδραση των υδριτών μεθανίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.....	99
3.3 Θετικές χρήσεις των υδριτών και αποθήκευση αερίων.....	102
3.4 Τεχνικές εκμετάλλευσης του μεθανίου από τους υδρίτες.....	103
3.5 Οικονομικοί και πολιτικοί παράγοντες.....	106
Συμπεράσματα.....	109
Βιβλιογραφία.....	111



*Αφιερωμένη στους γονείς και τον αδερφό μου,  
οι οποίοι με στήριζαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.*

*Ευχαριστώ τους καθηγητές μου,  
για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσαν,  
Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Γεωργακόπουλο,  
για τις χρήσιμες συμβουλές του και την βοήθειά του.*



### Περίληψη:

Η πτυχιακή αυτή εργασία έχει ως στόχο να μελετήσει το τι ακριβώς είναι οι υδρίτες μεθανίου, το πως δημιουργούνται, σε ποιες περιοχές εντοπίζονται με ιδιαίτερη αναφορά στο χώρο της Ανατολικής Μεσογείου, τι τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί γύρω από αυτούς και τέλος τι αντίκτυπο μπορεί να έχουν για την οικονομία και τον πετρελαϊκό κλάδο. Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι γενικοί και εισαγωγικοί όροι που περιγράφουν τους υδρίτες αλλά και το τι ακριβώς είναι τα ηφαιστεια λάσπης, που εντοπίζονται με βάση την παγκόσμια βιβλιογραφία και το πως συνδέονται με τους υδρίτες μεθανίου. Το δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας επικεντρώνεται στον τρόπο δημιουργίας του τόξου της Ανατολικής Μεσογείου, γίνεται εκτενής ανάλυση για το σύμπλεγμα των ηφαιστειών λάσπης Αναξίμανδρος και την σύνδεσή τους με τους υδρίτες μεθανίου και περιγράφει τις τεκτονικές κινήσεις στον Ελλαδικό χώρο. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η περιβαλλοντική επίδραση του μεθανίου στην ατμόσφαιρα και ο ρόλος που διαδραματίζει στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη, οι υπάρχουσες τεχνικές ανάκτησης των υδριτών, ενώ τέλος αναλύονται οι οικονομικοί και πολιτικοί παράγοντες που αναμένεται να επιδράσουν στη μελλοντική έρευνα και εκμετάλλευση των αποθεμάτων υδριτών του πλανήτη.





### Abstract:

This bachelor thesis aims in studying what are the hydrates methane, how are they being created, in which regions are they concentrated with special mention to Eastern Mediterranean space, what technologies have been created around them and what can be their impact on the economy and oil industry. The first chapter analyses the general and introductory terminology that describes the hydrates, what are the mud volcanos, which are being identified based on the international bibliography, and how are they connected with the hydrates methane. The second chapter of the thesis focus on the creation of the Eastern Mediterranean Arc thoroughly analyses Anaximander's mud volcanos complex and their connection with methane hydrates and describes the tectonic movements in the Greek space. Finally, the third chapter analyses methane's environmental impact on the atmosphere and its role in the global warming phenomenon, the hydrates recovering existing techniques, as well as the economic and political factors that are expected to influence the future exploration and exploitation of the hydrates reserves of the planet.



### Εισαγωγή:

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μια αύξηση της έρευνας πάνω στους υδρίτες μεθανίου. Η έρευνα δεν επικεντρώνεται μόνο στο πως δημιουργούνται οι υδρίτες μεθανίου και τις προοπτικές τους που αφορούν την βιομηχανία του πετρελαίου, αλλά έχει εξελιχθεί ως μια καινοτόμα αναδυόμενη ενεργειακή και τεχνολογική παράμετρος, η οποία αξίζει την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας. Οι υδρίτες είναι στερεές μορφές σαν κρύσταλλοι πάγου και αποτελούνται από μείγμα νερού και ελαφριών αερίων όπως μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο. Το μεθάνιο κυριαρχεί ανάμεσα σε αυτά τα αέρια και γενικότερα εμφανίζει καλύτερες ενεργειακές προοπτικές σε σχέση με όλα τα αέρια υδρογονανθράκων που βρίσκονται στα ιζηματογενή πετρώματα. Το μεθάνιο χαρακτηρίζεται ως το ενεργειακό καύσιμο του μέλλοντος, ενώ όλο και περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται γύρω από αυτό στις περιοχές όπου εντοπίζεται, όπως στα υποθαλάσσια ηπειρωτικά περιθώρια στα λεγόμενα ηφαιστεια λάσπης και στην στεριά κάτω από τα 'πέρμαφροστ' [<https://www.nrdc.org/stories/permafrost-everything-you-need-know#sec-what-is>]. Τις τελευταίες δεκαετίες ανακαλύπτονται όλο και περισσότερες υποθαλάσσιες περιοχές με δομές που χαρακτηρίζονται ως υποθαλάσσια ηφαιστεια λάσπης και πολλά από αυτά συνδέονται άμεσα με την ύπαρξη των υδριτών μεθανίου. Έρευνες σαν και αυτές χρηματοδοτούμενες από την Ε.Ε. που έχουν ως επίκεντρο την Ανατολική Μεσόγειο, αποκάλυψαν την ύπαρξη τέτοιων δομών και στον Ελληνικό θαλάσσιο χώρο κοντά στο πρίσμα συσσώρευσης (accretionary prism), με την ύπαρξη του συμπλέγματος υποθαλάσσιων ηφαιστειών Αναξίμανδρος και την μελέτη των ηφαιστειών λάσπης Άμστερνταμ, Κούλα, Καζάν, Αθήνα και Θεσσαλονίκη, όπου ορισμένα από αυτά εμφανίζουν περιεκτικότητα υδριτών μεθανίου μέσα στα στρώματά τους. Τα ηφαιστεια λάσπης έχουν τραβήξει την προσοχή των επιστημόνων καθώς εμφανίζονται, εκτός από τη Μεσόγειο, σχεδόν σε ολόκληρο τον πλανήτη. Το γεγονός αυτό μπορεί μελλοντικά να καταστήσει τους υδρίτες ως μια ενεργειακή λύση, ώστε ορισμένα κράτη να καταφέρουν να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες και να επαναπροσδιορίσουν την παγκόσμια οικονομία. Ωστόσο, για την ώρα, η διαθέσιμη τεχνογνωσία για την έρευνα και την εκμετάλλευσή τους βρίσκεται σε αρχικά στάδια, παρά την ανάγκη για απεμπλοκή από την χρήση υδρογονανθράκων και την χρήση πιο καθαρών πηγών ενέργειας. Τέλος είναι σημαντικό πέρα από την χρήση των υδριτών ως ενεργειακή πηγή, να συνυπολογιστεί και πιθανή επίπτωση της απελευθέρωσης του μεθανίου στην ατμόσφαιρα και ο ρόλος που διαδραματίζει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Θεωρείται βέβαιο ότι όσο οι πετρελαϊκές εταιρίες θα αναγκάζονται να στραφούν σε μη συμβατικά κοιτάσματα εξαιτίας της εξάντλησης των συμβατικών, οι υδρίτες μεθανίου θα έρχονται όλο και περισσότερο στο προσκήνιο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ορισμοί – γενικά στοιχεία – περιοχές με υδρίτες μεθανίου στην παγκόσμια βιβλιογραφία

### 1.1 Τι ονομάζουμε υδρίτες μεθανίου.

Οι υδρίτες μεθανίου είναι φυσικοί σχηματισμοί που αποτελούνται από μεγάλες ποσότητες μεθανίου και νερού με τη μορφή κρυστάλλων πάγου. Το μεθάνιο περικλείεται από τα μόρια του νερού και εγκλωβίζεται στη μοριακή του δομή. Οι υδρίτες είναι μη στοιχειομετρικές ενώσεις, αποτελούμενες από ένα τρισδιάστατο δικτυωτό πλέγμα μορίων νερού, στο οποίο τα αντίστοιχα μόρια του μεθανίου και του διοξειδίου του άνθρακα εντοπίζονται σε ισορροπία στο κενό εξαιτίας των ελκτικών και απωθητικών ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Οι υδρίτες μεθανίου περιέχουν, πέρα από το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα, οξυγόνο, άζωτο, και άλλα σπάνια αέρια σε μικρότερες περιεκτικότητες.

Η σύνθεση του μορίου ενός υδρίτη  $(\text{CH}_4)_4 (\text{H}_2\text{O})_{23}$  αποτελείται από 1 γραμμομόριο μεθανίου για κάθε 5,75 γραμμομόρια νερού. Η παρατηρούμενη πυκνότητα είναι  $0.9 \text{ gr/cm}^3$  που σημαίνει ότι καθώς αυτή είναι μικρότερη του νερού, οι υδρίτες θα επέπλεαν στην επιφάνεια της θάλασσας εάν δεν ήταν δεσμευμένοι σε κάποια ιζηματογενή γεωλογική δομή.

### 1.2 Δομή υδριτών

Οι ένυδρες ενώσεις μεθανίου σχηματίζονται κατά την επαφή τους με το νερό και το φυσικό αέριο σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης. Ανήκουν σε μια ευρύτερη οικογένεια πολυμερών που ονομάζονται clathrates, τα οποία είναι περικλειόμενα συστατικά όπου τα φιλοξενούμενα μόρια εντοπίζονται στο κελί του ξενιστή ή σε ένα πλέγμα του ξενιστή τους (Atwood, 2012). Τα στερεά που σχηματίζονται από τη συνένωση των μορίων ενός είδους ονομάζονται G και ενώνονται σε κρυσταλλικά πλέγματα από μόρια άλλου τύπου που ονομάζονται H και είναι οι ξενιστές. Τα G μόρια χρειάζονται ώστε να διαμορφώνουν μια σταθερή σχέση μεταξύ των δεσμών καθώς έλξη μεταξύ διαφορετικών μορίων θα προκαλούσε αστάθεια και χημική διαταραχή με απόρροια να είχαμε την μη ή την απελευθέρωση του υδρογόνου. Όπως προαναφέρθηκε οι υδρίτες εντοπίζονται με κρυστάλλους πάγου με αποτέλεσμα τα μόρια των G σε φυσιολογικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας να βρίσκονται σε αέρια φάση και να εντοπίζονται στα διάκενα του νερού και του πάγου. Έτσι δικαιολογείται η παρουσία χημικών στοιχείων όπως το He, Kr, Ar, Br, Xe, Cl, I, As,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{SF}_6$  και  $\text{CO}_2$ . Η μορφή που μπορεί να έχει ο υδρίτης είναι η μορφή I, ή II, ή H. Σε συνθήκες ψύξης του καθαρού νερού ο υδρίτης κρυσταλλώνεται σε εξαγωνική συμμετρία ενώ για την περίπτωση ψύξης με  $\text{H}_2\text{C}$  η εξαγωνική συμμετρία παραμένει μόνο για την μορφή H ενώ για τις μορφές I και II παρουσιάζεται κυβική συμμετρία.

Στην μορφή τύπου I, ο υδρίτης στην αέρια φάση του περιέχει 46 μόρια νερού διατεταγμένα σε δύο δωδεκαεδρικά και έξι τετραεδρικά κενά με τα μόρια του νερού να καταλαμβάνουν τα κενά διαστήματα των κελιών φιλοξενώντας 8 μόρια G με διάμετρο  $8,5^{\text{A}}$

Στην μορφή τύπου II, ο υδρίτης στην αέρια φάση του αποτελείται από 136 μόρια νερού διατεταγμένα σε δεκαέξι δωδεκαεδρικά και οχτώ εξαεδρικά κενά. Αυτά μπορούν να διατεταχθούν με 24 μόρια G.



Τέλος στην μορφή τύπου Η στην αέρια φάση ο υδρίτης μπορεί να περιέχει 34 μόρια νερού διατεταγμένα σε τρία πενταγωνικά δωδεκαεδρικά κενά, σε δύο δωδεκαεδρικά κενά και ένα εικοσαεδρικό κενό.

Οι υδρίτες μεθανίου δεν είναι στοιχειομετρικές ενώσεις με αποτέλεσμα οι δομές που σχηματίζονται μεταξύ των συστατικών τους να μην είναι σταθερές. Όλοι οι δεσμοί στις ένυδρες ουσίες αερίου είναι δεσμοί υδρογόνου. Το νερό είναι υπεύθυνο για την σταθερότητα μεταξύ των ένυδρων ουσιών του αερίου υπό την μορφή του δωδεκαεδρικού συστήματος με τα ελεύθερα μόρια του νερού σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η παροδική ύπαρξη ενός δωδεκαέδρου στο νερό διευκολύνει τον σχηματισμό ένυδρων ουσιών αερίου.

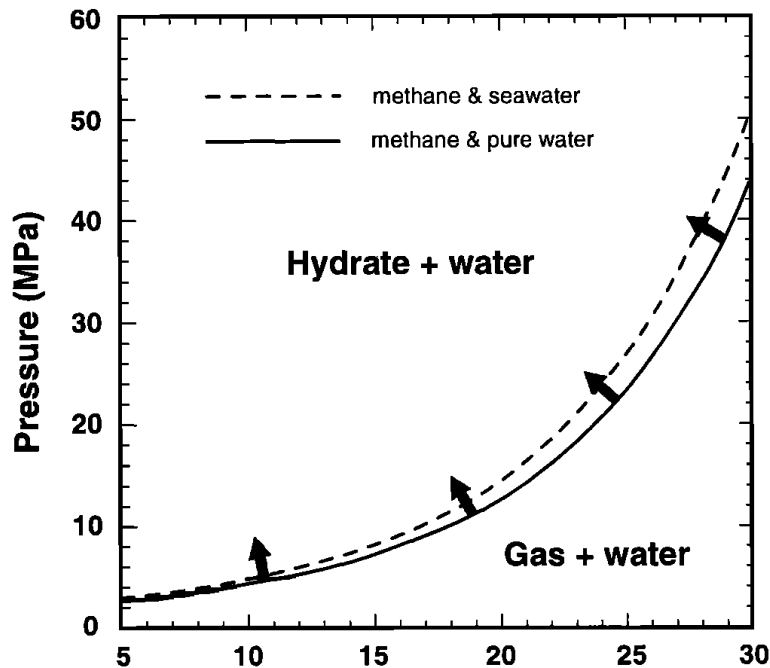
### 1.3 Δημιουργία των υδριτών μεθανίου σε θαλάσσια ιζήματα.

Τα σύγχρονα μοντέλα μελέτης της δημιουργίας και της διάθεσης των υδριτών μεθανίου στα θαλάσσια ιζήματα θεωρούν ότι η φάση ισορροπίας του ελεύθερου νερού και του μίγματος αερίων που μετρώνται σε συνθήκες εργαστηρίου μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα και στο φυσικό περιβάλλον (Clennell et al., 1999). Ωστόσο οι εργαστηριακές συνθήκες αδυνατούν να προσομοιώσουν τις πραγματικές συνθήκες πίεσης που παρατηρούνται στο φυσικό περιβάλλον και δεν μπορούν να αποδώσουν την επίδραση που έχει το πέτρωμα ξενιστής στις ιδιότητες των υδριτών μεθανίου (Clennell et al., 1999).

Οι υδρίτες μεθανίου που ανακτώνται από τον πυθμένα της θάλασσας δείχνουν μια μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ τους και φαίνεται να διανέμονται στα ιζήματα που φιλοξενούνται ανάλογα με την υφή που έχουν. Η φάση σταθεροποίησης των υδριτών μεθανίου, αν και συνήθως καθορίζεται από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του ελεύθερου νερού, σε ορισμένες θαλάσσιες περιοχές διαφόρου βάθους που πραγματοποιήθηκαν γεωτρήσεις, εντοπίστηκαν διαφοροποιήσεις ως προς τις αναμενόμενες μετρήσεις. Τα ιζήματα στις περιοχές αυτές κατάφεραν να εισχωρήσουν στους πυρήνες των υδριτών μεθανίου και να αναπτυχθούν, θεωρία που υποστηρίζεται από εργαστηριακές μετρήσεις σε πορώδεις σχηματισμούς (Clennell et al., 1999).

Ο Ginsburg (1998) ξεχώρισε δύο κατηγορίες υποθαλάσσιων υδριτών μεθανίου. Η πρώτη χαρακτηρίζει αυτούς που εμφανίζονται σε ολόκληρη την έκταση του ιζήματος συχνά και κάτω από την ζώνη ισορροπίας των υδριτών μεθανίου και η δεύτερη, αυτούς που εμφανίζονται συσσωρευμένοι σε τοπικές εκτάσεις και σχετίζονται με συγκεντρωμένες ροές αερίων όπως είναι τα ηφαίστεια λάσπης (Clennell et al., 1999). Επειδή η δομή των υδριτών μεθανίου είναι παρόμοια με τη δομή του πάγου, αναπτύχθηκε μια αναλογία ανάμεσα στην διαδικασία δημιουργίας των υδριτών και τη διαδικασία κατά την οποία παγώνει το πορώδες ενός πετρώματος σε περιβάλλοντα permafrost (μόνιμα παγωμένο έδαφος). Υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ των υδριτών μεθανίου και των παγωμένων εδαφών. Πρέπει να λάβουμε υπόψη την παρουσία της αέριας φάσης του μεθανίου που σε αντίθεση με τον αέρα, στο έδαφος συμμετέχει ενεργά στην κρυσταλλοποίηση του εδάφους. Η παρουσία του μεθανίου πιθανώς και να περιορίζει τις αντιδράσεις για την δημιουργία του, αλλά σε άλλες περιπτώσεις η έλλειψη νερού οδηγεί το σύστημα σε ισορροπία. Οι 'φακοί' πάγου δημιουργούνται και παγώνουν κάτω από ισχυρές θερμικές διαδικασίες βαθιά στο

έδαφος, με τη βοήθεια της θερμοδυναμικής καθοδήγησης κατά τη μεταφορά του νερού στο σημείο όπου οι κρύσταλλοι δημιουργούνται από την απόψυξή τους, κάτω από το σημείο παγοποίησης, μέσα στους πόρους του ιζήματος. Η θερμοκρασία σε ένα τυπικό ωκεάνιο ιζήμα μεγάλου βάθους βρίσκεται στους 0.02 με 0.08 °C m<sup>-1</sup>. Για αυτόν το λόγο ένας ακόμα θερμοδυναμικός δείκτης που ονομάζεται **υπερκορεσμός**, απαιτείται για την δημιουργία υδριτών μεθανίου, εξαιτίας της περίσσιας μεθανίου ή της πτώσης του σημείου ψύξης από το σημείο της θερμικής ισορροπίας. Το θερμοδυναμικό υπόβαθρο στο σημείο ψύξης σε πορώδες έδαφος είναι ένα καλό σημείο εκκίνησης για την μελέτη της δημιουργίας των υδριτών μεθανίου μέσα στα ιζήματα (Everett, 1993).



1. Απλοποιημένο διάγραμμα φάσης που απεικονίζει τη ζώνη ισορροπίας της θερμοκρασίας και πίεσης για τους υδρίτες μεθανίου κάτω από συνθήκες θαλάσσιου υπεδάφους θεωρώντας τη σύσταση αποτελούμενη από καθαρό μεθάνιο, αέριο και μείγμα θαλάσσιου νερού. Τα βελάκια καταδεικνύουν μια μετατόπιση στο όριο της φάσης σε συνθήκες μεγαλύτερης πίεσης και χαμηλότερης θερμοκρασίας σε περίπτωση που οι υδρίτες μεθανίου επηρεάζονται από κάποιον άλλον μηχανισμό (Clennell et al., 1999)



#### 1.4 Υδρίτες μεθανίου σε πετρώματα ξενιστές.

Οι υδρίτες μεθανίου έχουν ανακτηθεί από αβαθείς περιοχές ανά τον κόσμο, είτε από τον ωκεάνιο βυθό, είτε από βαθιές λίμνες. Παρατηρήθηκε ότι αποτελούν το συνδετικό υλικό ανάμεσα στην άμμο και τους ψαμμίτες. Ο εντοπισμός τους σε πολυάριθμες περιοχές ανά τον κόσμο έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι οι υδρίτες μεθανίου σχηματίζονται ως αυτόνομα σώματα με την μορφή φακών, σβώλων και φύλλων ανάμεσα στο ιζηματογενές πέτρωμα ξενιστή το οποίο παρουσιάζει καλά ταξινομημένο υλικό και λειτουργεί ως συγκολλητικό υλικό στα χονδρόκοκα υλικά (Clennell et al., 1999).

Σε δειγματοληψίες που έχουν γίνει σε ιζήματα βαθιάς θάλασσας ανά τον κόσμο και πίο συγκεκριμένα στην ζώνη υποβύθισης Cascadia στα βορειοδυτικά της Αμερικής κοντά στο Όρεγκον, εντοπίστηκαν ελεύθεροι υδρίτες μεθανίου κάτω από την ζώνη ισορροπίας. Τα ιζήματα στην τοποθεσία αυτή ήταν κυρίως λεπτόκοκκα με στρώματα άμμου, ενώ χαρακτηρίστηκαν ως ισχυρά τεκτονισμένα με μεγάλο εύρος στην υφή και τις φυσικές ιδιότητές τους.

#### 1.5 Μοντέλο τριχοειδούς ανάπτυξης των υδριτών μεθανίου σε πορώδες μέσο.

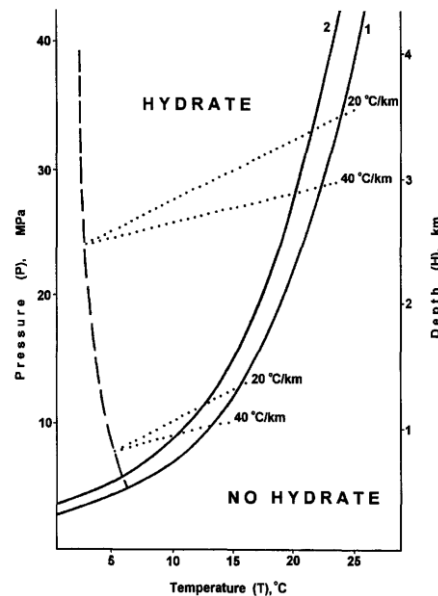
Οι υδρίτες μεθανίου δεν γίνεται να υπάρχουν σε ελεύθερη μορφή μέσα στη ζώνη ισορροπίας όταν το νερό υπάρχει σε περίσσια, παρά μόνο στην περίπτωση που το νερό μέσα στους πόρους είναι υψηλής αλατότητας. Όταν το αέριο διαχέεται τοπικά, σχηματίζει με το νερό και άλλο μεθάνιο. Υπάρχουν δύο φάσεις ισορροπίας, μεταξύ των υδριτών μεθανίου και του κορεσμένου μεθανίου σε νερό.

Θεωρητικά οι υδρίτες μεθανίου μπορούν να σχηματιστούν σε υδατικά διαλύματα τα οποία βρίσκονται κοντά στο όριο του κορεσμού χωρίς την παρουσία του ελεύθερου μεθανίου. Ο κινητικός αυτός μηχανισμός για τη δημιουργία των υδριτών μεθανίου προϋποθέτει τα μόριά του να είναι διαλυμένα στο νερό πριν ενσωματωθούν στο πλέγμα. Οι υπολογισμοί για τη διαφασική ισορροπία σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας δείχνουν ότι για τους θαλάσσιους υδρίτες η διαλυτότητα του μεθανίου μειώνεται αντίστροφα από την βάση της ζώνης σταθεροποίησης προς το θαλάσσιο πυθμένα. Στην περίπτωση που το νερό με το μεθάνιο κινηθεί προς τα πάνω, σταδιακά περισσότερο αέριο θα απορροφηθεί από το νερό για να σχηματιστούν οι υδρίτες μεθανίου (Clennell et al., 1999).

#### 1.6 Μετανάστευση υδριτών μεθανίου στην υποθαλάσσια ζώνη ισορροπίας.

Το θερμικό όριο της ζώνης ισορροπίας των υδριτών μεθανίου αποτελεί ένα γεωθερμικό φράγμα για την πιθανή μετανάστευση των υδριτών από τα ιζήματα μέσα στις υδάτινες στήλες. Ωστόσο το μεθάνιο δεν διατηρείται εντελώς στην υγρή του κατάσταση. Ο όρος για το όριο της υποθαλάσσιας ζώνης ισορροπίας των υδριτών μεθανίου, αντικατοπτρίζει μια κατάσταση στην οποία αυτοί βρίσκονται κάτω από συγκεκριμένες αρχικές τοπικές συνθήκες. Είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε το πάχος της ζώνης καθώς οι συνθήκες διαφέρουν από τόπο σε τόπο και δεν μπορούν να είναι προβλέψιμες. Αυτό αφορά τόσο το αέριο, την σύσταση και την αλατότητα, την θερμοκρασία του

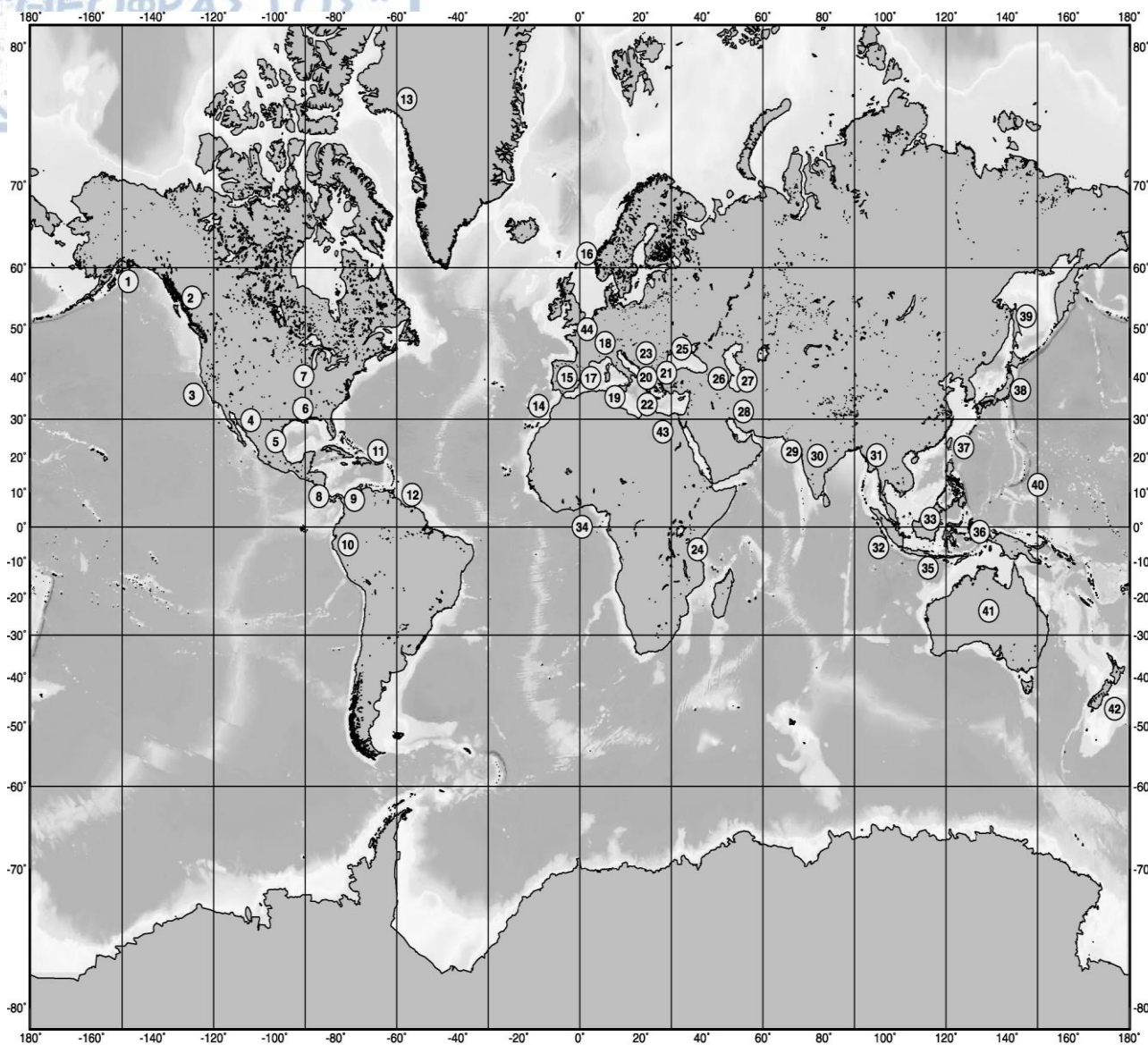
πυθμένα αλλά και τις γεωθερμικές μεταβολές. Ο εντοπισμός αυτής της ζώνης γίνεται συνήθως με διαγράμματα βάθους, πίεσης και θερμοκρασίας στα σημεία τομής όπου η γεωθερμική καμπύλη που αντιστοιχεί στους υδρίτες μεθανίου βρίσκεται σε ισορροπία με το καθαρό θαλάσσιο νερό (G.D. Ginburg et al. 1997).



2. Υπέρθυση της υδροθερμικής και γεωθερμικής καμπύλης στο διάγραμμα ισορροπίας των υδριτών. Συνεχείς γραμμές= καμπύλη πίεσης-θερμοκρασίας του μεθανίου σε συνθήκες ισορροπίας με το καθαρό νερό(1) και το θαλάσσιο νερό (2)(Sloan, 1990). Διακεκομμένες γραμμές = μέση κατώτερη θερμοκρασία ανάλογα με το βάθος του νερού. Τελίτσες = υποθαλάσσια γεωθερμική μεταβολή της θερμοκρασίας. Η μεταβολή της πίεσης θεωρούμε ότι είναι ίση με  $P(H) = 10 \text{ MPa/Km}$  (Ginburg et al., 1997).

Άλλωστε το μεθάνιο είναι το κύριο συστατικό των υποθαλάσσιων υδριτών με συγκέντρωση στο μεγαλύτερο μέρος εκατοντάδες φορές πάνω από άλλα αέρια, παράγωγα των υδρογονανθράκων (Ginburg et al., 1997). Άλλος παράγοντας αντίστοιχης σημασίας είναι η λεπτύνση της ζώνης ισορροπίας των υδριτών ανάλογα με το βάθος του νερού. Οι υδρίτες μεθανίου δεν εντοπίζονται σε κοιλάματα μέσα στον ωκεανό αλλά παρατηρούνται σε ηπειρωτικές κλειστές κατωφέρειες ή ηπειρωτικές εξάρσεις καθώς και σε βαθιές ηπειρωτικές και κλειστές θάλασσες. Αυτές οι περιοχές εμφανίζουν και τις προαπαιτούμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας για δημιουργία αερίων υδρογονανθράκων και κατ' επέκταση και των υδριτών μεθανίου (Ginburg et al., 1997).



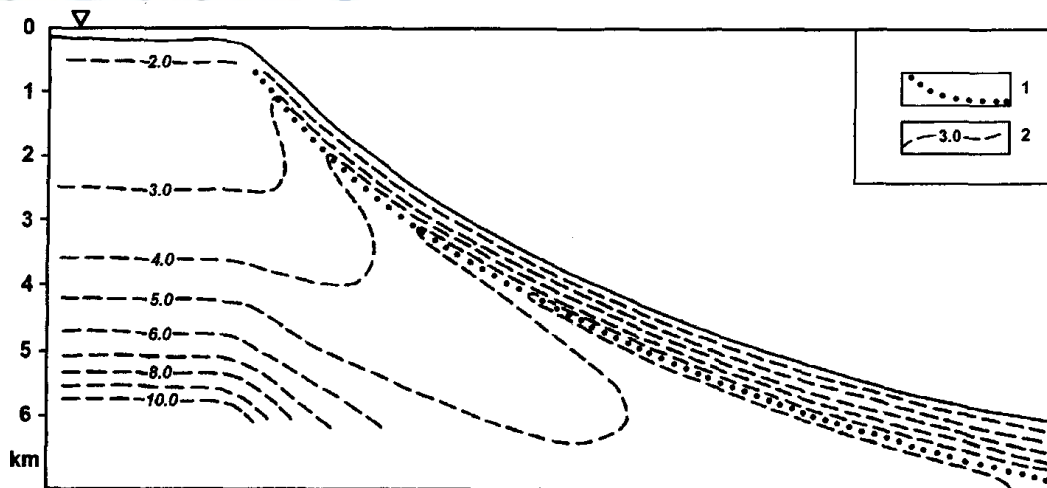


- |  |  |  |
|--|--|--|
| ① Aleutian Trench, Alaska Margin: Copper River Basin | ⑮ Spain                                  | ⑳ India                                      |
| ② British Columbia, Canada                           | ⑯ Barents Sea, North Sea, Baltic Sea     | ㉑ Burma                                      |
| ③ Cascadia (Oregon, Washington)                      | ⑰ Alboran Sea                            | ㉒ Sumatra, Java                              |
| ④ California, Nevada                                 | ⑱ Western Alps, Appennines/Italy         | ㉓ Borneo, Brunei, Sabah/Malaysia             |
| ⑤ Mexico, Gulf of Mexico                             | ⑲ Sicily                                 | ㉔ Central Australia (Gosses Bluff)           |
| ⑥ Texas, Mississippi, Louisiana                      | ㉒ Peloponnesus/Greece, Adriatic Sea      | ㉕ Timor-Ceram Arc                            |
| ⑦ Lake Michigan                                      | ㉓ Aegean Sea                             | ㉖ Irian Raya, Papua New Guinea               |
| ⑧ Costa Rica   | ㉔ Eastern Mediterranean Sea              | ㉗ Taiwan                                     |
| ⑨ Colombia   | ㉕ Roumania                               | ㉘ Ryukyu Trench, Nankai, Japan Trench, Japan |
| ⑩ Ecuador  | ㉖ Tanzania/East Africa                   | ㉙ Sakhalin Island/Sea of Ochotsk             |
| ⑪ Barbados   | ㉗ Black Sea, Kerch and Crimea Peninsulas | ㉚ Marianas                                   |
| ⑫ Venezuela and Trinidad                             | ㉘ Caucasus (Taman, Georgia, Azerbaijan)  | ㉛ Australia                                  |
| ⑬ Greenland, North Atlantic                          | ㉙ Caspian Sea                            | ㉜ New Zealand                                |
| ⑭ Morocco/North Africa                               | ㉚ Iran, Turkmenistan                     | ㉝ Lybian Desert, Egypt                       |
|  | ㉛ Makran and Pakistan                    | ㉞ Netherlands                                |
|  |  | ㉟  |

### 3. Συγκέντρωση των ηφαιστειών λάσπης στην Γη (A. J. Kopf, 2002)

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα βιοχημικά και γεωθερμικά αέρια, τα αέρια των υδρογονανθράκων και των υδριτών εμφανίζουν μια διαφοροποίηση ως προς τον τρόπο δημιουργίας τους. Η δημιουργία των πρώτων, συνδέεται άμεσα από την προσφορά της οργανικής ύλης στα ιζήματα και με το πάχος των ιζηματογενών στρωμάτων. Οι υδρίτες από την άλλη απαιτούν ακόμα μια σημαντική παράμετρο για τη δημιουργία τους. Η 'παροχή' αερίου είναι αδύνατο να συμβεί εάν αυτό δεν μεταναστεύσει άμεσα μετά τη δημιουργία του. Έτσι προκύπτει άμεσα το συμπέρασμα ότι η μετανάστευση των αερίων καθώς και ο σχηματισμός τους είναι το κλειδί για τη δημιουργία των υδριτών μεθανίου και απασχολεί σε μεγάλο βαθμό τους επιστήμονες που ασχολούνται με τον κλάδο αυτό της γεωλογίας. Οι επιστήμονες έχουν δώσει βαρύτητα στο φιλτράρισμα των ροών των υδριτών μεθανίου το οποίο γίνεται ανιχνεύσιμο σε γεωλογικές δομές όπως ρήγματα, διαπυρισμό ή σε καλύμματα στις περιοχές που εντοπίζονται οι υδρίτες. Είναι αποδεδειγμένο ότι υπάρχει σχέση μεταξύ των υδριτών στις υποθαλάσσιες εκροές με τις ανωμαλίες στη σύσταση του εμπιερχόμενου στο πορώδες νερού που διαταράσσεται από την προσθήκη ξένων ρευστών. Σε παγκόσμια κλίμακα ισχύει ότι οι ροές και οι περιοχές απόθεσής τους εντοπίζονται σε ηπειρωτικά περιθώρια μαζί με τους υδρίτες. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτά τα δεδομένα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι ροές των ρευστών είναι ύψιστης σημασίας για τους υδρίτες και την συσσώρευση τους (Ginburg et al., 1997). Υπάρχουν υδρίτες προερχόμενοι από θερμογόνα αέρια, από την Κασπία θάλασσα μέχρι τον κόλπο του Μεξικού, και οι οποίοι συνδέονται με υποθαλάσσιες διαρροές (seepages). Οι υδρίτες χωρίς προφανή συσχέτιση με διαρροές είναι αποτέλεσμα βιογένεσης.

Η μετανάστευση των υδριτών μεθανίου μπορεί να ανιχνευτεί με τρεις μηχανισμούς, το φιλτράρισμα των υγρών ροών κατά την διάλυσή τους, το φιλτράρισμα στην αέρια φάση και τη διάχυση. Η υγροποίηση των υδριτών στα αρχικά επίπεδα του κορεσμένου μεθανίου συνδέεται με διαλυτοποίηση αυτού στο νερό, κάτω από συνθήκες ισορροπίας των υδριτών με ταυτόχρονη πτώση της θερμοκρασίας. Έτσι, η ζώνη ισορροπίας δημιουργεί ένα γεωθερμικό όριο για τα αέρια του μεθανίου και του κορεσμένου νερού. Το νερό δέχεται ψύξη και οδηγεί το μεθάνιο σε διαδικασίες διήθησης ανάλογα με την ποσότητα του διαλυμένου μεθανίου στη σύσταση των ρευστών. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται από τη σύσταση των ρευστών, τη θερμοκρασία του νερού και τη συγκέντρωση των ροών. Οι υδρίτες που συμμετέχουν στις διαδικασίες αυτές σταδιακά δημιουργούν κορεσμό στο πορώδες των ιζηματογενών σχηματισμών, τους στεγανοποιούν και δημιουργούν δευτερεύουσες ιζηματογενείς δομές ή φλέβες κορεσμένες σε υδρίτες (Ginburg et al., 1997). Όταν το μεθάνιο ξεπερνά τη ζώνη ισορροπίας των υδριτών στο θαλάσσιο νερό, ένα μέρος αυτού οξειδώνεται. Περιοχές που περιέχουν αέριο και αέριο με περιεκτικότητα σε νερό έχουν παρατηρηθεί σε βαθιά υποθαλάσσια περιβάλλοντα σε πολλές περιοχές ανά τον κόσμο. Παράλληλα, λαμβάνει χώρα μια αυξητική διάλυση του μεθανίου στη ζώνη ισορροπίας των υδριτών. Στην περίπτωση που το εμπιερχόμενο στο πορώδες νερό είναι κορεσμένο σε μεθάνιο, η διάλυση αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη εξαιτίας την υψηλής συγκέντρωσης του μεθανίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υψηλή θερμοκρασία είναι αρωγός για την αποτελεσματικότητα της διάλυσης αυτής (Ginburg et al., 1997).



4. Οριζόντιο διάγραμμα που απεικονίζει την διαλυτότητα του μεθανίου στο νερό κάτω από θερμοδυναμικές συνθήκες στα ηπειρωτικά περιθώρια. Οι παύλες απεικονίζουν την διαλυτότητα σε STP  $\text{cm}^3/\text{g}$ . Οι τελίτσες είναι το όριο της θερμοδυναμικής ζώνης των υδριτών στην ζώνη ισορροπίας (Ginburg et al., 1997).

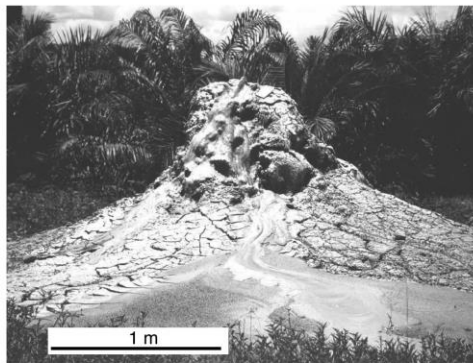
### 1.7 Ηφαιστεια λάσπης και υδρίτες μεθανίου

Τα ηφαιστεια λάσπης είναι συνήθως μικρές δομές κωνικού σχήματος που αποτελούνται από λάσπη και πηλό αναμιγμένα με αέρια και νερό, με μέγεθος 1-2 μέτρα ύψος. Το μείγμα ιζήματος και ζεστού νερού είτε εκχύεται από φλέβες στο έδαφος όμοια με την μορφή των ροών λάβας, είτε εκχύεται στον αέρα σαν σιντριβάνι εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασίας του νερού. Συνολικά έχουν καταγραφεί 41 περιοχές ηφαιστειών λάσπης σε ηπειρωτικές περιοχές και 21 σε υποθαλάσσιες περιοχές, ενώ υπάρχουν ενδείξεις για την ύπαρξη ακόμα 24 περιοχών. Περιοχές εντοπισμού των ηφαιστειών λάσπης μπορεί να είναι ρηγά νερά στην ηπειρωτική ηφαλοκρηπίδα ή σε ηπειρωτικές πλαγιές και αβυσσικές πεδιάδες. Χαρακτηριστικό των περιοχών αυτών είναι η ταχεία ιζηματογένεση, η τεκτονική συμπίεση των λιθοσφαιρικών πλακών και περιοχές με πρόσφατη μαγματική δραστηριότητα (Milkov, 2005). Μία τέτοια περιοχή είναι και το τεκτονικό τόξο της Ανατολικής Μεσογείου στο οποίο θα επικεντρωθεί η συγκεκριμένη εργασία. Τα ηφαιστεια λάσπης συχνά εντοπίζονται στο θαλάσσιο πυθμένα ως αποτέλεσμα της μετανάστευσης των ρευστών στα ιζήματα μεταξύ ενεργών ρηγμάτων εξαιτίας της μεγάλης πίεσης ή σχηματίζονται στην κορυφή δομών διαπυρισμού. Η σημασία της μελέτης τους είναι εξαιρετική καθώς τα ιζήματα και τα ρευστά που προκύπτουν από τέτοιες περιοχές, αποδίδουν πλήθος πληροφοριών για τη γεωλογία και την ύπαρξη εκμεταλλεύσιμων πετρελαιοφόρων κοιτασμάτων στο υπόβαθρο. Τα ηφαιστεια λάσπης πολύ συχνά συσχετίζονται με κοιτάσματα πετρελαίου όπως για παράδειγμα στο Αζερμπαϊτζάν και στον κόλπο του Μεξικού, όπου αναβλύζουν υδρογονάνθρακες πλούσιοι σε αέρια  $\text{C}_2+$ , ενώ κοιτάσματα πετρελαίου όπως αυτά στις Νορβηγικές θάλασσες, απελευθερώνουν μεθάνιο και  $\text{CO}_2$ . Τα υποθαλάσσια ηφαιστεια λάσπης σε μεγάλο βάθος συσχετίζονται με τους υδρίτες, οι οποίοι αποτελούν πιθανή εκμεταλλεύσιμη ενεργειακή πηγή (Milkov, 2005).

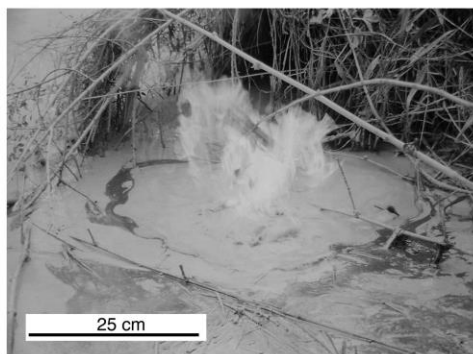


Στο Μεσογειακό τόξο, τα ηφαιστεια λάσπης δημιουργούνται όταν ροές λάσπης βρίσκονται κάτω από μεγάλη πίεση στο συσσωρευτικό πρίσμα. Η αρχική ηφαιστειότητα χαρακτηρίζεται από τραχιά κλαστικά ιζήματα τα οποία σχηματίζουν μικρούς θολωτούς κώνους, με σύσταση που προκύπτει από τα υπολείμματα των αποθέσεων των ροών σε συνδυασμό με την έκρηξη μεγάλων ποσοτήτων καλά ταξινομημένου υλικού. Η έκρηξη αυτή συνοδεύεται από σταδιακή υποχώρηση του υλικού, σχηματίζοντας τάφρο. Στη συνέχεια οι κόκκοι με τις λασποροές σχηματίζουν θόλους με επίπεδη κορυφή. Οι ιζηματογενείς κόκκοι στα ηφαιστεια λάσπης είναι κυρίως γωνιώδεις με διάμετρο μέχρι 0.5 m. Οι κόκκοι είναι πηλιτικής, ψαμμιτικής ή ασβεστολιθικής προέλευσης, ηλικίας κάτω Μειόκαινου. Το αρχικό υλικό του λατυποπαγούς πιθανώς έχει προέλευση τους εβαπορίτες του Μεσσηνίου που είναι τοποθετημένοι κάτω από τη ζώνη δολομιτώσης σε βάθος 5-7 km. Η μεγάλη πίεση πυροδότησε την αποκόλληση των φτωχά ταξινομημένων υλικών κοντά στον πυθμένα. Η έκρηξη συνοδεύτηκε από απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων υδρογονανθράκων ενώ παράλληλα οι συνθήκες ήταν ιδανικές ώστε να δημιουργηθούν υδρίτες στα ρηχά βάθη όπως στο ηφαιστειο 'Μιλάνο'. Τα ιζήματα των λατυποπαγών κυρίως προέρχονται από το ηπειρωτικό περιθώριο της Βορείου Αφρικής αλλά σε δεύτερο βαθμό και από οφιολιθικά υλικά που προέρχονται επίσης από τον βορρά, πιθανώς από την εφίπλευση των κατεστραμμένων λεπιών της Κρήτης (Roberson et al., 1998).

A



B



5. Παράδειγμα ηπειρωτικών σχηματισμών ηφαιστειών λάσπης. (A): Μικρό ηπειρωτικό ηφαιστειο λάσπης στο Τζέρικο της Μαλαισίας (Clennell 1992) (B): Μεθάνιο που καίγεται καθώς αναβλύζει από μικρό ηφαιστειο λάσπης στην Ταιβάν (Korfi, 2002).

### 1.8 Ηφαιστεια λάσπης ανά τον κόσμο.

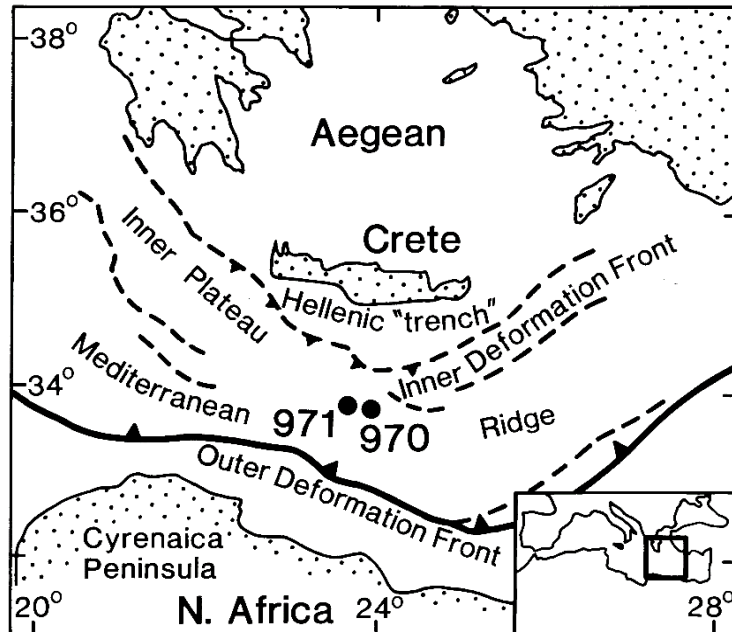
Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολύ ενδιαφέρουσες ανακαλύψεις σχετικά με τα ηφαιστεια λάσπης σε μεγάλα βάθη τόσο στο Μεσογειακό τόξο νοτιοανατολικά της

Κρήτης (Cita et al., 1996) όσο και στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος (Anaximander mountains), που αποτελείται από ηφαίστεια λάσπης ανάμεσα στο Ελληνικό τόξο και το Κυπριακό τόξο, το οποίο είναι αποτέλεσμα της δεξιόστροφης κίνησης της δυτικής λιθοσφαιρικής πλάκας της Ανατολίας και της Αφρικανικής (Lykousis et al., 2008). Τα ηφαίστεια λάσπης παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τοποθεσιών τόσο σε θάλασσα όσο και στην ξηρά. Συχνά συνδέονται με δομές του πρίσματος συσσώρευσης (accretionary prism) όπως παρατηρείται στα νησιά Μπαρμπάντος, στην πλάκα Κασκάντια στην Βόρεια Αμερική, στην Κόστα Ρίκα, στον Παναμά και στην Ιαπωνική τάφρο. Ηφαίστεια λάσπης στην ξηρά παρατηρούνται στην Ινδονησία, στην Ιαπωνία, στο Τρινιτάντ, στην Ταιβάν, στο νησί Σάκαλιν στην Ρωσία και στο Αζερμπαϊτζάν. Ακόμα δομές έχουν εντοπιστεί στις ακτές της Καλιφόρνιας, στην Αρμενία, στα νησιά Νικομπάρ στον κόλπο της Βεγγάλης, στα νησιά Κουρίλες στην βορειοανατολική Ασία και στην Καμτσάτκα. Τα ηφαίστεια λάσπης που παρατηρούνται σε μη πρίσματα συσσώρευσης είναι αυτά στη Μαύρη Θάλασσα, στη θάλασσα Αλβοράν, στον κόλπο του Μεξικού, στην Κασπία θάλασσα και στη θάλασσα Σάλτον (Roberson et al., 1998).

### 1.9 Ανατομία ηφαιστείων λάσπης με βάση την πυρινοληψία LEG160.

Τα ηφαίστεια λάσπης είναι σημαντικά για τις διαδικασίες εξαέρωσης των θαλάσσιων ιζημάτων τα οποία εντοπίζονται κυρίως σε ζώνες υποβύθισης ή ορογενετικές ζώνες όπου είναι κυρίαρχες οι εφελκυστικές και συμπιεστικές τεκτονικές τάσεις. Πρόσφατες εκτιμήσεις καταδεικνύουν ότι το μεθάνιο που απελευθερώνεται από τα ηφαίστεια λάσπης σε ηπειρωτικό ή θαλάσσιο υπόβαθρο, αντιστοιχεί περίπου στο 10% του συνολικού CH<sub>4</sub> (Lykousis et al, 2008). Μελέτη της ανατομίας των ηφαιστείων λάσπης έγινε με τη δειγματοληψία LEG160 που διενεργήθηκε στα ηφαίστεια με ονομασίες Μιλάνο και Νάπολη τα οποία βρίσκονται στο Μεσογειακό τόξο στα νότια της Κρήτης. Τοποθετούνται στο βόρειο τμήμα του εσωτερικού οροπεδίου κοντά στην Ελληνική τάφρο. Η γεώτρηση έδειξε μια ηλικία μεγαλύτερη του ενός εκατομμυρίου χρόνων και για τις δύο περιοχές, μεγαλύτερη από τις αρχικές εκτιμήσεις. Η γεώτρηση έριξε φως σε μια διαφωνία ως προς το μοντέλο του σχηματισμού του λατυποπαγούς, αν δηλαδή αυτό δημιουργήθηκε στο σύνολό του ή σε ένα μέρος του με ιξώδη διείδυση (Cita et al. 1989) ή τα υπολείμματα των ιζημάτων διοχετεύτηκαν μέσα στο υπόβαθρο (Limpon et al, 1994) τουλάχιστον για τις δύο περιοχές της γεώτρησης. Αρχικές έρευνες υπέδειξαν ότι συμμετέχουν διαφορετικού τύπου λατυποπαγή ιζήματα, καλά ταξινομημένα. Τα δεδομένα έδειξαν ότι και στα δύο ηφαίστεια τα υλικά τοποθετήθηκαν έπειτα από πολλαπλές διεισχύσεις των υπολειμμάτων και όχι από βίαιη διείδυση του λατυποπαγούς.

Με τη βοήθεια μικροσαρωτών και στα δύο ηφαίστεια παρατηρήθηκε καλά βαθμονομημένη ιλύς και τουρβιδίτες πλούσιοι σε πηλό στα κατώτερα στρώματα της πυρηνοληψίας. Στο ηφαίστειο Μιλάνο, στα κατώτερα τμήματα, εντοπίζονται λεπτά διαβαθμισμένα στρώματα ιλύος τα οποία ερμηνεύονται ότι προέρχονται από



6. Τεκτονικό όριο των ηφαιστειών λάσπης Μιλάνο και Νάπολη, στην Μεσογειακή ράχη νότια της Κρήτης. Τα ηφαίστεια είναι τοποθετημένα στο εσωτερικό μέρος δίπλα στην Ελληνική τάφρο που βρίσκεται στα βόρεια. (Roberson et al., 1998).

διαλυμένους τουρβιδίτες και τραχιά υλικά πλούσια σε πηλό, ως υπολείμματα των ρών που αποτίθενται. Αυτά τα ιζηματογενή στρώματα επικαλύπτουν ογκομετρημένες τεράστιες δομές από πλούσια κλαστικά και ιζηματογενή πετρώματα που δημιουργήθηκαν από πολλές πλούσιες σε πηλό αποθέσεις. Και στα δύο ηφαίστεια η γεώτρηση έδειξε πως υπάρχει παρουσία ταφρογενών δομών γύρω από αυτά. Στο Μιλάνο η τάφρος φαίνεται να είναι γεμάτη με ιζήματα ενώ σε αυτό της Νάπολης δεν έχει ιζήματα. Μετά από διαγραφίες που ανίχνευσαν τις σεισμικές γραμμές κάτω από τις δύο τάφρους, υπάρχουν ενδείξεις για την προοδευτική κατάρρευση των δομών έπειτα από πολλαπλές ηφαιστειακές εκρήξεις. Η ηλικία των ρών λάσπης στην τάφρο του ηφαιστείου Μιλάνο δείχνει μεγάλη διάρκεια για τη δημιουργία του σχηματισμού αυτού, ενώ παρόμοιες ενδείξεις υπάρχουν και σε ηφαίστεια στα νησιά Μπαρμπάντος, στη Μαύρη θάλασσα και σε άλλα μέρη στον κόσμο. Η περιφερειακή τάφρος γύρω από τα ηφαίστεια πιθανώς οφείλεται στις βίαιες εκτονώσεις μεγάλων ρών από την ηφαιστειακή δομή (Roberson et al., 1998).

Συνοψίζοντας, η δομή των ηφαιστειών καθορίζεται από αρχικές εκρήξεις που σχηματίζουν μια κωνική ιζηματογενή δομή, ιζηματογενείς ροές και υπολειμματικά υλικά τα οποία επικαθόνται επάνω στον κώνο ενώ σταδιακά σχηματίζεται η τάφρος περιμετρικά των ηφαιστειών με την πάροδο του χρόνου (Roberson et al., 1998).

Τα στοιχεία δείχνουν ότι ένα μεγάλο μέρος από τα υλικά στο ηφαίστριο Νάπολη προέρχεται από εβαποριτικά πετρώματα του Μεσσηνίου ενώ συμπληρώθηκαν με ιζήματα προερχόμενα από ανθρακικά άλατα του Μειόκαινου. Είναι πιθανό, ένα μέρος των υλικών να προήλθε από ρευστοποίηση των αργιλικών ιζημάτων προ Μεσσηνιακής περιόδου. Αρχικά υπήρχε η ένδειξη ότι όλα τα ιζηματογενή υλικά είχαν προέλευση από

το βόρειο Αφρικανικό τμήμα του ηπειρωτικού παθητικού περιθωρίου στη νότιο πλευρά της τοποθεσίας των ηφαιστείων. Αυτό εν μέρει είναι σωστό καθώς εντοπίστηκαν ώριμοι χαλαζιακοί ψαμμίτες (λιθαρενίτες) και ρηγά πελαγικά ανθρακικά άλατα. Ωστόσο με την γεώτρηση LEG160, οι ψαμμίτες έδειξαν να περιέχουν μια μικρή περιεκτικότητα, αλλά σημαντικής σημασίας, λιθολογικά υλικά όπως μεταμορφικό χαλαζίτη, καταπονημένους βασάλτες, σερπεντινίτη και πυριτικούς ραδιολαρίτες. Η μόνη πιθανή πηγή για αυτά τα υλικά είναι η ορογενετική περιοχή της Ευρασιατικής ηπειρωτικής μάζας στα Βόρεια της Κρήτης. Τέλος, κάποια ακόμα ιζηματογενή υλικά όπως ψαμμίτες, πιθανώς να προέρχονται και αυτά από βορειότερες περιοχές (Roberson et al., 1998).

Τα δεδομένα που συλλέχτηκαν από την πυρηνοληψία έδειξαν τον σημαντικό ρόλο που διαδραμάτισε η υψηλή πίεση των υγρών στην ηφαιστειότητα των ηφαιστείων λάσπης. Παρατηρήθηκαν αναστομώσεις και μικροφλεβίδια σε γωνιώδη πηλιτικά ιζήματα. Η υφή αυτή ερμηνεύεται από την υψηλή πίεση που ασκούν τα ρευστά, εξαιτίας της απελευθέρωσής τους με αποτέλεσμα να θρυμματίζουν τα πετρώματα. Οι διαδικασίες αυτές έλαβαν χώρα όταν υγρά κάτω από πολύ υψηλή πίεση ήρθαν σε απότομη επαφή με τον πηλό, προσπαθώντας να επανέλθουν σε υδροστατική ισορροπία κατά τις ηφαιστειακές εκρήξεις λάσπης στον πυθμένα της θάλασσας. Τα λατυποπαγή υλικά από βαθύτερες περιοχές μαζί με λεπτόκοκκα ιζήματα με αφρώδη υφή, έδειξαν ασχημάτιστες ακόμα υφές ιζηματογενών υλικών και συσσωματωμάτων τα οποία σε υψηλές πιέσεις δεν διαταράχτηκαν και δεν προωθήθηκαν προς τα πάνω, μέσου του υδραυλικού συστήματος του λασπο-ηφαιστείου. Αντίθετα, αναπτύσσονται διατιμήσεις και μικροφλεβίδια τα οποία έχουν παρατηρηθεί και σε άλλες μελέτες από πυρηνοληψίες όπως στο περιθώριο της Κασκάδιας θάλασσας και στα νησιά Μπαρμπάντος (Roberson et al., 1998).

Η παρουσία ενός ιζηματογενούς στρώματος με μεγάλη περιεκτικότητα σε αέρια, κυρίως μεθανίου, στο ηφαίστειο Νάπολη, επιβεβαιώνει την αφρώδη υφή των ιζημάτων στον πυρήνα της γεώτρησης. Το πλούσιο σε μεθάνιο ιζήμα, επεκτείνεται ομοιόμορφα όταν ο πυρήνας έρθει στην επιφάνεια. Αντίθετα, σε μεγάλα βάθη η εκτόνωση του αερίου, δεν εμφανίζει στον πυθμένα τέτοια υφή όπου το νερό ξεπερνάει τα 2000 mbsf. Στην περιοχή του ηφαιστείου λάσπης με ονομασία Όλυμπος έχουν εντοπιστεί θρύμματα αραγωνίτη που αντιπροσωπεύουν τον αρχικό φλοιό. Τέτοιοι σχηματισμοί ανθρακικού φλοιού υποδηλώνουν απελευθέρωση και οξείδωση του μεθανίου που παρατηρήθηκε σε περιοχές όπως στην Μαύρη θάλασσα, στα νησιά Μπαρμπάντος και αλλού. Απελευθέρωση τέτοιων ροών, πλούσιων σε αέρια, έχουν παρατηρηθεί και στο Μεσογειακό τόξο. Ακόμα, μια βακτηριακή γέννηση του μεθανίου συνδέεται με οξείδωση θερμογενετικών υδρογονανθράκων που έχουν μελετηθεί από ισοτοπικές μελέτες σε ανθρακικά άλατα στο πρίσμα συσσώρευσης της Κασκαδίας. Η χαμηλή χλωριότητα στο περιεχόμενο στο πορώδες νερό του ηφαιστείου Μιλάνο καταδεικνύει τη μεγάλη συγκέντρωση υδριτών σε αβαθή θάλασσα δεκάδες μέτρα κάτω από τον πυθμένα. Στο ηφαίστειο Νάπολη το περιεχόμενο στο πορώδες νερό φαίνεται να έχει περιορισμένες ποσότητες υδριτών στα επιφανειακά ιζήματα. Γενικότερα, στους Μεσογειακούς δόμους οι υδρίτες περιορίζονται σε ρηγά νερά κάτω από τον πυθμένα, μια κατάσταση που συνδέεται με το βάθος του νερού, τη γεωθερμική βαθμίδα, τη θερμοκρασία του πυθμένα (περίπου 14 βαθμοί Κελσίου) και τις ενδιάμεσες συστάσεις



των ρευστών. Μικρές αλλαγές στη θερμοκρασία φαίνεται να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την σταθερότητα των υδριτών. Αυτή την στιγμή φαίνεται να είναι παγιδευμένες μεγάλες ποσότητες φυσικού αερίου στο λασπο-ηφαιστειο Μιλάνο, κάτω από ένα αδιαπέρατο κάλυμμα υδριτών με πιθανή μελλοντική ηφαιστειότητα. Πραγματικά φαίνεται οι υδρίτες να σχηματίζονται εναλλακτικά κάτω από αδρανή ή ενεργά στάδια της ηφαιστειότητας των λασπο-ηφαιστειών. Μεταβάλλοντας την πυκνότητα των ιζηματογενών υλικών, το ποσοστό των υδριτών αποτελεί μια επιπλέον ισχυρή δυναμική δύναμη στην ηφαιστειότητα η οποία μπορεί να δημιουργήσει με αποσύνθεση υδρίτες, παγιδευμένους κάτω από αδιαπέρατα καλύμματα. Τέτοιες δομές μας είναι ήδη γνωστές, όπως για παράδειγμα στην Κόστα Ρίκα (Roberson et al., 1998).

### 1.10.1 Ηφαιστεια λάσπης στο Μεσογειακό τόξο και σύγκρισή τους.

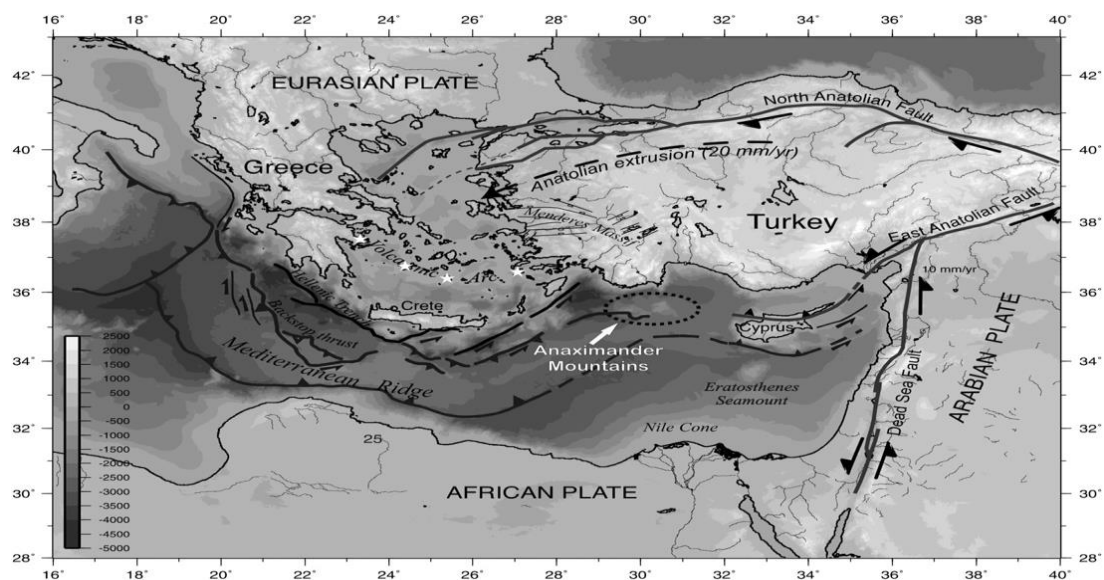
Η περιοχή των ηφαιστειών λάσπης Όλυμπος είναι η πλέον διεξοδικά μελετημένη σε παγκόσμια κλίμακα. Οι διάφορες δομές διαφέρουν σε μέγεθος, σχήμα και προέλευση. Η τοπογραφία των περισσότερων εντοπίζεται κοντά στο δυτικό περιθώριο του εσωτερικού μετώπου καταβύθισης του μεσογειακού τόξου. Το μέγεθος των ηφαιστειών λάσπης στην περιοχή εμφανίζει ένα εύρος των 0,68 με 3,52 Km στην βάση τους και με το ύψος τους εκτείνεται μεταξύ των 60-130 m πάνω από τον πυθμένα. Άλλες δομές εμφανίζονται ασυμμετρικές ως προς το σχήμα τους με καταπτώσεις σε διάφορες πλευρές τους. Μετρήσεις με σόναρ αποκάλυψαν σχηματισμούς με ροές και ανομοιογενείς ημικυκλικές δομές. Ανάμεσα στους κρατήρες των ηφαιστειών λάσπης παρατηρήθηκαν κλάστες μεγάλης διαμέτρου ενώ στο ηφαιστειο λάσπης Νάπολη εντοπίστηκαν χαρακτηριστικές ροές πλούσιες σε μεθάνιο οι οποίες δημιουργήθηκαν από βακτηριδιακή χημειο-συνθετική δραστηριότητα. Τέτοιες ροές έχουν γίνει αντιληπτές και σε άλλα ηφαιστεια ανά τον κόσμο όπως στα νησιά Μπαρμπάντος όπου η αποβολή των ρευστών συνδέεται με χημικές διεργασίες ζωικών συστημάτων. Επιπρόσθετα, μικρές δομές λάσπης, εντοπίστηκαν στο νοτιοδυτικό όριο του συμπλέγματος Όλυμπος ενώ στο νότιο τμήμα αυτού εντοπίστηκαν κοίλες δομές κατακαείμενες γύρω από τα ηφαιστεια λάσπης, σε μια περιοχή όπου αποσαθρώνονται Πλειοκαινικά με Πλειστοκαινικά ιζηματογενή πετρώματα. Οι δομές αυτές είναι κατά κύριο λόγο συμμετρικές με μέση διάσταση 750 m και μήκος μερικών χιλιομέτρων (Roberson et al., 1998).

Σαρώσεις στην Ανατολική Μεσόγειο αποκάλυψαν πάνω από 150 κυκλικές και ημικυκλικές δομές τοποθετημένες κατά κύριο λόγο στα αβαθή νερά και στο βόρειο τμήμα του μεσογειακού τόξου όπου τα άλατα του Μεσσηνίου είναι σχετικά λεπτότερα. Οι δομές αυτές μελετήθηκαν σαν ηφαιστεια λάσπης και λασποδομές με τα ιζηματογενή λατυποπαγή να βρίσκονται εκτεθειμένα στην επιφάνεια του πυθμένα. Τα ηφαιστεια λάσπης εμφανίζονται σπανιότερα σε περιοχές όπου οι δομές άλατος παρουσιάζουν παχύτερα στρώματα όπως στην Κυπριακή ράχη ή στη ράχη της Καραϊβικής. Παρόλα αυτά στη Μεσογειακή ράχη παρατηρούνται ηφαιστεια λάσπης (Hieke et al., 1996a).

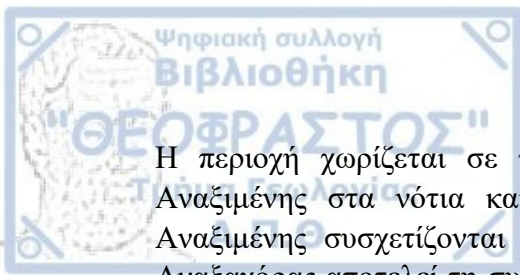
Πρόσφατα, ηφαιστεια λάσπης ανακαλύφθηκαν στα βουνά Αναξιμανδρος σε μια περιοχή κοντά στο όριο της Μεσογειακής ράχης όπου φαίνεται να είναι ένα άρτιο δομικό σύμπλεγμα το οποίο θα αναλυθεί διεξοδικά στο δεύτερο κεφάλαιο (Roberson et al., 1998). Η περιοχή αυτή είναι πλούσια σε τεκτονική δράση και η δημιουργία των ηφαιστειών συνδέεται με ρήγματα. Το πρίσμα συσσώρευσης του Ελληνικού τόξου



είναι μια περιοχή πλούσια σε ηφαίστεια λάσπης η οποία μελετάται συνεχώς μετά την ανακάλυψη της τη δεκαετία του 1970 (Cita et al, 1981). Το σύμπλεγμα Αναξίμανδρος βρίσκεται μεταξύ του Ελληνικού και του Κυπριακού τόξου στον κόμβο της Αφρικανικής τεκτονικής πλάκας με τις μικροπλάκες της Ανατολίας και του Αιγαίου, σε μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από την κίνηση της Αφρικάνικης και της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας (Perissoratis et al, 2011). Από την ανακάλυψη των ηφαιστείων λάσπης στην ανατολική Μεσόγειο στα τέλη της δεκαετίας του 1970, ηφαίστεια λάσπης, λάσπη διαπυρισμού και ρευστές φλέβες έχουν ανακαλυφτεί σε πολλές διαφορετικές τοποθεσίες της περιοχής αυτής. Οι περισσότερες εντοπίστηκαν στο ελληνικό τόξο και στα βουνά Αναξίμανδρος (Woodside et al., 1998), άλλες στις ακτές της Σικελίας (Holland et al., 2003), στα ιζήματα του Νείλου (Loncke, 2002), στην ανύψωση της Φλωρεντίας (Zitter et al., 2003) και στο νοτιοανατολικό Αιγαίο (Perissoratis et al., 1998). Ωστόσο, το 1996 εντοπίστηκαν υδρίτες μεθανίου στο ηφαίστριο λάσπης Κούλα (Kula) που ανήκει στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος (Woodside et al., 1997, 1998). Αργότερα, ανακαλύφθηκαν υδρίτες μεθανίου και στα ηφαίστεια Άμστερνταμ και Καζάν το 2002 (Perissoratis et al., 2011). Το αποτέλεσμα αυτής της ανακάλυψης ήταν απόρροια της επιστημονικής παρατήρησης με ακτίνες που διενεργήθηκε στα πλαίσια του Ολλανδικού προγράμματος ANAXIPROBE, το 1995. Ακολούθησε η παρατήρηση, η δειγματοληψία από τον πυθμένα και η σάρωσή του το 1996 (Woodside et al., 1997, 1998). Αποτέλεσμα αυτών των μελετών ήταν η ενασχόληση της Ευρωπαϊκής Ένωσης με την περιοχή με στόχο την ανακάλυψη περιοχών πλούσιων σε υδρίτες μεθανίου. Έτσι χρηματοδότησε το πρόγραμμα ANAXIMANDER (Perissoratos et al., 2003). Το σύμπλεγμα Αναξίμανδρος χαρακτηρίζεται από μεγάλα ρήγματα και κεκλιμένα τεμάχη που γεωλογικά ήταν η συνέχεια της νοτιοδυτικής Τουρκίας.



7. Γενικευμένος χάρτης και βαθυμετρικός χάρτης στην Ανατολική Μεσόγειο. Συγκαταλέγεται η σχετική τοποθεσία του συμπλέγματος των υποθαλάσσιων βουνών Αναξίμανδρος (Lykousis et al., 2008).



Η περιοχή χωρίζεται σε τρεις βασικές τοποθεσίες, Αναξιμανδρος στα δυτικά, Αναξιμένης στα νότια και Αναξαγόρας στα ανατολικά. Οι Αναξιμανδρος και Αναξιμένης συσχετίζονται με ηφαιστειακούς ασβεστόλιθους (Poisson, 1977) ενώ ο Αναξαγόρας αποτελεί τη συνέχιση του οφιολιθικού συστήματος του καλύμματος της Αντάλιας (Gutnic et al., 1979). Η περιοχή βρίσκεται κάτω από μια σύνθετη πολυφασική διαδικασία παραμόρφωσης εξαιτίας της νεοτεκτονικής δημιουργίας της (Ten Veen et al., 2004). Τα ηφαίστεια λάσπης που απαρτίζουν το σύμπλεγμα Αναξιμανδρος είναι το Άμστερνταμ, το Καζάν, το ηφαίστειο Κούλα, το ηφαίστειο Θεσσαλονίκη και το ηφαίστειο Αθήνα.

### 1.10.2 Ηφαίστειο λάσπης στα Νησιά Μπαρμπάντος

Η ποικιλομορφία στην μορφολογία που εντοπίζεται στα ηφαίστεια λάσπης στην Μεσογειακή ράχη φαίνεται να εντοπίζεται και σε άλλες περιοχές ανά τον κόσμο. Για παράδειγμα, τρεις κύριες δομές ηφαιστειών λάσπης παρατηρούνται στο πρίσμα συσσώρευσης των νησιών Μπαρμπάντος, προς τη θάλασσα, στη ζώνη αποσάθρωσης. Τα ηφαίστεια λάσπης που έχουν κυματοειδή και ακανόνιστη επιφάνεια, φαίνεται να είναι τα περισσότερο ενεργά. Οι ηφαιστειακοί κώνοι-αγωγοί με επίπεδη κορυφή και ελλειπτικό σχήμα βρίσκονται στο υπόβαθρο σε λεκάνες με σταδιακή υποχώρηση όπως και στο ηφαίστειο Νάπολη, ενώ ο διαπυρισμός, ο οποίος διαρρηγνύει τις δομές προέρχεται από την αποσάθρωση του περιθωρίου όμοια με τις συνθήκες στη Μεσογειακή ράχη. Σεισμικές μελέτες έδειξαν ότι στα Μπαρμπάντος, ο αγωγός στα ηφαίστεια λάσπης στενεύει αρχικά προς τα κάτω και στην συνέχεια ανοίγει σε έναν ταμειωτήρα λάσπης και υλικών (Brown and Westbrook, 1998). Αντίθετα ο αγωγός στα ηφαίστεια λάσπης στη Μεσογειακή τάφρο δεν έχει απεικονισθεί. Στα Μπαρμπάντος τα κωνικά ηφαίστεια λάσπης προσδιορίζονται ως σχετικά νέας ηλικίας δομές ενώ οι επίπεδοι αγωγοί μεγαλύτερης επιφάνειας φαίνεται να είναι παλαιότερης προέλευσης δομές, που χρονολογικά πιθανώς να ταυτίζονται και με την ηλικία δημιουργίας των ηφαιστειών Μιλάνο και Νάπολης. Τα ηφαίστεια λάσπης στα Μπαρμπάντος εμφανίζονται ως μικρές εφήμερες δομές, ηλικίας μικρότερης των 200 ka, τα οποία εν τέλει σταδιακά θα αποσθρωθούν σε αντίθεση με αυτά στη Μεσογειακή τάφρο τα οποία εμφανίζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, κοντά στο 1 Ma, και έχουν μεγάλες πιθανότητες να παραμείνουν σχηματισμένα μιας και γεωγραφικά είναι τοποθετημένα στην υπερκείμενη τεκτονική πλάκα στη ζώνη σύγκρουσης (Roberson et al., 1998).

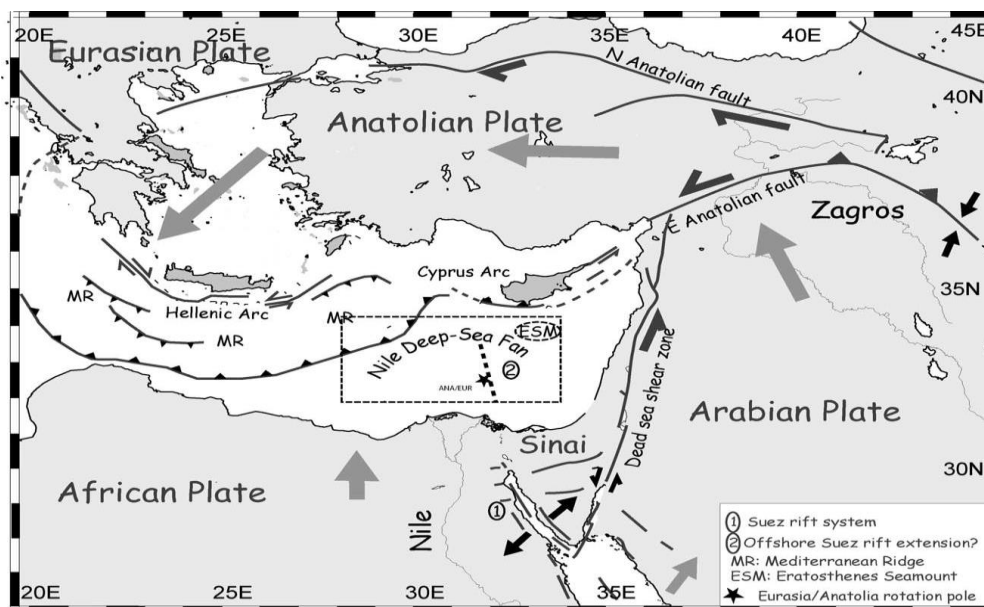
### 1.10.3 Ηφαίστεια λάσπης στη Μαύρη Θάλασσα

Στη Μαύρη Θάλασσα εμφανίζονται επιμήκεις δομές λάσπης και τάφροι διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών κυρίως στο κεντρικό της τμήμα και σε βάθη μεγαλύτερα των 2 km κυρίως νότια της χερσονήσου της Κριμαίας (Ivanov et al., 1996; Limonov et al., 1997). Τα ηφαίστεια λάσπης στην περιοχή αυτή έχουν μανιταροειδές προς κωνικό σχήμα και σπάνια είναι επίπεδα στην κορυφή τους, όπως στο ηφαίστειο Νάπολη, με ύψος 1-3 km και διάμετρο κοντά στα 20-150 m. Ακόμα, παρατηρήθηκαν δομές κατάρρευσης όπως και στο ηφαίστειο Νάπολη. Τα ιζήματα που συλλέχθηκαν από τις δομές λάσπης χρονολογήθηκαν στο Ολιγόκαινο με Μειόκαινο ή ακόμα και νεότερης ηλικίας, η οποία είναι συμβατή με την ηλικία βαθύτερων υλικών κοντά στα 7 km βάθους, δείχνοντας έτσι μια πιθανή βαθύτερη προέλευση των υλικών. Με τη βοήθεια σεισμικών μετρήσεων, προσδιορίστηκαν κανάλια τροφοδοσίας ροών λάσπης

διαφόρων σχημάτων σε αντίθεση με τα ηφαίστεια της Μεσογειακής τάφρου. Τα κανάλια ποικίλουν σε διάμετρο που κυμαίνεται σε 1-3.5 km, παρόλο που ο ενεργός αγωγός στα μεμονωμένα ηφαίστεια λάσπης είναι πιθανώς πολύ στενότερος (Limonon et al., 1994).

#### 1.10.4 Ηφαίστεια λάσπης στις βαθιές αποθέσεις της Ανατολικής Μεσογείου στο Δέλτα του Νείλου.

Αποδείξεις για την ύπαρξη θαλάσσιων υγρών στρωμάτων υδρογονανθράκων και αλάτων στο θαλάσσιο πυθμένα των ακτών του Νείλου, έχουν εμφανιστεί από την δεκαετία του 1970 όπου διενεργήθηκαν υποθαλάσσιες έρευνες στον πυθμένα με την χρήση εξελιγμένων ακουστικών δεδομένων (Hovland and Judd, 1988; Milkon, 2000; Korf, 2002). Οι εμφανίσεις αυτές έχουν αποδοθεί στην ύπαρξη κρύων φλεβών και κρύας ηφαιστειακής ηφαιστειότητας σε δομές λάσπης, οι οποίες παρατηρούνται σε συμπίεστικά όρια στα ενεργά περιθώρια, σε τμήματα των παθητικών περιθωρίων με μεγάλη αλατότητα, σε ηπειρωτικές κρηπίδες ή τουρβιδιτικά συστήματα όπως αυτά που υπάρχουν στα θαλάσσια ριπία. Στην Ανατολική Μεσόγειο ή στη νοτιοανατολική Καραϊβική, πρόσφατα δεδομένα έδειξαν ότι πληθώρα δομών λάσπης τοποθετείται πάνω από ανάστροφα ρήγματα που δημιουργούνται εξαιτίας των συμπίεστικών τάσεων που αναπτύσσονται ταχύτατα (Loncke et al., 2004). Τα παθητικά ηπειρωτικά περιθώρια αποτελούν και αυτά περιοχές όπου εμφανίζονται σημαντικά στρώματα με ρευστά και ηφαίστεια λάσπης, ενώ δομές τέτοιου τύπου εμφανίζονται σε λεπτά ιζηματογενή περιθωριακά τμήματα όπως στον Αμαζόνιο, στο Μισισσιπή και στο Νίγηρα όπου η βαρυντική τεκτονική ή οι λιθολογικές ποικιλίες ελέγχουν την δημιουργία τους (Graue, 2000).



8. Γεωλογικές δομές του υποβάθρου της Ανατολικής Μεσογείου. Το τετράγωνο δείχνει τις περιοχές των ερευνών. Τα γκρι βέλη δείχνουν την κίνηση των τεκτονικών πλακών (Loncke et al., 2004).



Οι μελέτες και τα δεδομένα που προέκυψαν από αυτές (βαθυμετρικά και ακουστικά δεδομένα), δείχνουν μια πιθανή ύπαρξη ρευστών φλεβών στο περιθώριο του Νείλου. Η αλήθεια είναι ότι η ύπαρξη υδρογονανθράκων δικαιολογεί την αλλοίωση της μορφολογίας των ιζηματογενών δομών. Οι παρατηρήσεις που έγιναν στο περιθώριο του Νείλου, αποκάλυψαν περισσότερους από 150 κώνους λάσπης, σημάδια και λοφίσκους που χαρακτηρίζουν το υπέδαφος στο τουρβιδιτικό σύμπλεγμα του Νείλου. Οι Barsoum et al., (2000) παρατήρησαν μεγάλο πλήθος ενεργών καμινάδων [chemneys], ενώ οι Coleman και Ballard (2000) εντόπισαν στο ανατολικό άκρο του συμπλέγματος εμφανίσεις υδρογονανθράκων που συνδέονται με ηφαίστεια λάσπης (Loncke et al., 2004).

#### 1.10.5 Ηφαίστεια λάσπης στα Αλεούτια Νησιά στο περιθώριο της Αλάσκας.

Στο υπόβαθρο του ποταμού Κόππερ στην Αλάσκα, έχουν εντοπιστεί ηφαίστεια λάσπης που σχετίζονται με την παρουσία θερμών πηγών (Allen, 1887; Nichols and Yehle, 1961). Τα ηφαίστεια λάσπης του συμπλέγματος Klawasi στα δυτικά, και του συμπλέγματος Tolsona στην ανατολή, δημιουργήθηκαν από διαφορετικά ρευστά. Στο δεύτερο σύμπλεγμα ο κώνος είναι σχηματισμένος από λάσπη με άμμο και βότσαλα των υποκείμενων σχηματισμών ενώ το νερό προήλθε τα θαλάσσια ιζήματα άνω Κρητιδικής περιόδου (Grantz et al., 1962). Η ανάλυση των αερίων δείχνει την παρουσία μεθανίου και νιτρικών σε αρχική φάση σχηματισμού. Σε αντίθεση, το σύμπλεγμα των ηφαιστειών Klawasi περιέχει CO<sub>2</sub> ενώ διαθέτει αυτόχθονο ανθρακικό κάλυμμα στην κορυφή. Τα ρευστά φαίνεται να είναι είτε ηφαιστειακής προέλευσης είτε απολιθωμένα νερά θαλάσσιας προέλευσης (Nichols and Yehle, 1961). Χαρακτηρίζονται από μεγάλη αλατότητα και εμπεριέχουν στοιχεία υλικών που μεταφέρθηκαν από περιοχές με πετρέλαιο και άλμη. Παρά τις γεωφυσικές παρατηρήσεις και τη δειγματοληψία που έγινε στο υποθαλάσσιο υπόβαθρο της θαλάσσιας περιοχής, δεν βρέθηκαν θαλάσσια ηφαίστεια λάσπης που σχετίζονται με την Αλεούτια πλάκα υποβύθισης στο τόξο της Αλάσκας (Wallmann et al., 1997). Το γεγονός αυτό είναι αξιοσημείωτο καθώς εξαέρωση και απελευθέρωση ρευστών έχει παρατηρηθεί στην άκρη του πρίσματος συσσώρευσης (Von Huene et al., 1998). Ωστόσο, διαπυρισμός σε μεγάλα βάθη, έχει εντοπιστεί εξαιτίας της καταβύθισης της επιπέυσης σε υπερπιεσμένους σχιστόλιθους (Seely, 1977).

#### 1.10.6 Ηφαίστεια λάσπης στη Βρετανική Κολούμπια.

Τα βουνά Sullivan με υδροθερμικές αποθέσεις Cu/Zn/Pb στη νοτιοανατολική Βρετανική Κολομβία, στον Καναδά, πιστεύεται ότι έχουν εξελιχθεί σαν σύμπλεγμα ηφαιστειών λάσπης (Slack et al., 1998). Οι αποθέσεις μεγέθους κροκαλών στα ηφαίστεια λάσπης και οι τεράστιες σουλφιδικές αποθέσεις που τα περιβάλλουν, εναποτέθηκαν μαζί με μεσο-προτεροζωικά κλαστικά πετρώματα και φαίνεται να συνδέονται με το ρήγμα Κίμπλερλεϊ. Οι διατηρημένες αποθέσεις έχουν μετρηθεί με γεωτρήσεις βάθους 5 Km δείχνοντας ένα πάχος 300 με 400 m. Σε μια κάθετη τομή στον κώνο, τα λατυποπαγή λάσπης και ιζημάτων φαίνεται να συνδέονται με κανονικά ρήγματα ενώ περιέχουν σουλφίδια, τουρμανλήτες, πυρόλιθους και ορυκτά Pb-Zn. Τέτοιο θαλάσσιο υπόβαθρο από τουρμανλήτες αντιστοιχεί μόνο με το υδροθερμικό πεδίο ηφαιστειών λάσπης της Μαύρης Θάλασσας (Korff, 2002).

### 1.10.7 Ηφαιστεια λάσπη στο περιθώριο στις Κασκαδίας.

Κατά μήκος του περιθωρίου του Όρεγκον στις ΗΠΑ, υπάρχουν αδύναμες ενδείξεις ύπαρξης ηφαιστειών λάσπης. Παρόλο που ρευστά και υδρίτες έχουν εντοπιστεί στις περιοχές αυτές, με τις σεισμικές μελέτες και τη δημιουργία του προφίλ της περιοχής, μόνο αρχικά οι δομές που εντοπίστηκαν χαρακτηρίστηκαν ως ηφαιστεια λάσπης (MacKay et al., 1992). Μια πιο λεπτομερής μελέτη ωστόσο υπέδειξε ότι οι τεκτονικές κινήσεις δημιούργησαν μια σειρά αντικλίνων κατά μήκος των φλεβών των ρευστών ενώ εμφανίστηκαν και οι ανθρακικές αποθέσεις. Η επαναξιολόγηση των σεισμικών γραμμών σε συνδυασμό με νέες βαθυμετρικές μετρήσεις οδήγησαν στην υπόθεση ότι τρεις δομές με θολωτή μορφή στην περιοχή του τόξου των υδριτών στο συσσωρευτικό πρίσμα της Κασκαδίας, πιθανώς είναι φλέβες και ηφαιστεια λάσπης (Trehu et al., 1999). Πιο πρόσφατες υποθαλάσσιες ενδείξεις δείχνουν όμως ότι τουλάχιστον η μία από τις τρεις δομές είναι ένας τεράστιος ανθρακικός χημικός ύφαλος (Brown et al., 1999). Έρευνες από τρισδιάστατα σεισμικά δεδομένα έδωσαν στοιχεία ότι στο νότιο τμήμα του τόξου των υδριτών υπάρχουν θαμμένα ηφαιστεια λάσπης. Οι δομές που παρουσιάζουν τουλάχιστον 3 km πλάτους δείχνουν ασυνάρτητα σεισμικά ίχνη τα οποία σχετίζονται πιθανώς από την παρελθοντική ύπαρξη ροών ρευστών (Korfi, 2002).

### 1.10.8 Ηφαιστεια λάσπης στην Κόστα Ρίκα

Τα ηφαιστεια λάσπης στο μπροστινό τμήμα του τόξου της Κόστα Ρίκα έχουν μελετηθεί από πλήθος γεωφυσικών παρατηρήσεων. Όπως αποκάλυψε σχετικά πρόσφατα μια γεώτρηση σε μεγάλο βάθος, το μπροστινό τμήμα της σφήνας του καταδυόμενου τεμάχους προέρχεται από μικρο-συσσωρεύσεις και έτσι τα ηφαιστεια λάσπης στην ιζηματογενή περιοχή επικάθονται της πυριγενής περιοχή της σφήνας ή αποτελούνε προϊόντα αποχέτευσης ή σχετίζονται με την ύπαρξη βαθιών ρηγματώσεων (Kimura et al., 1997). Οι δομές λάσπης είναι μεγάλες σε αριθμό, κυρίως κωνικού σχήματος με διάμετρο μικρότερη του 1 Km. Ακόμα, οι βαθυμετρικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι δεν περιέχουν υπόγειο στρώμα από κλάστες. Μελέτες στο νερό των πόρων αποκάλυψαν ομοιότητες με το θαλάσσιο νερό, δηλαδή ένα μίγμα ρευστών, υδριτών, και νερού των πόρων. Πρόσφατες δειγματοληπτικές μελέτες έδειξαν ότι τα ηφαιστεια λάσπης αποτελούνται από τεράστιες συμπαγείς ανθρακικές αποθέσεις παρόμοιες με αυτές που εμφανίζονται στην Κασκάδια (Korfi, 2002).

### 1.10.9 Ηφαιστεια λάσπης στην Βόρεια Κολομβία, στον Παναμά και στο Εκουαδόρ

Στην περιοχή βόρεια της Κολομβίας, οι Sinu και San Jacinto πτυχογενείς ζώνες δημιουργήθηκαν από το συσσωρευτικό πρίσμα των ιζημάτων από την τεκτονική πλάκα της Καραϊβικής, τα οποία ξύθηκαν και αποκολλήθηκαν από αυτήν κατά την υποβύθιση της κάτω από το νότιο Αμερικανικό υπόβαθρο. Στα 12 Km μήκους της ακολουθίας αυτής, έχει παρατηρηθεί πτύχωση των υλικών, αύξηση της πίεσης στα ιζήματα και εκτεταμένη ηφαιστειότητα λάσπης (Toto and Kellogg, 1992). Η απελευθέρωση της λάσπης σχετίζεται με τη συμπίεση των στρωμάτων των ιζημάτων καθώς και με την τεκτονική στένευση και καταπόνηση. Η περιοχή με τις περισσότερες πληροφορίες είναι

αυτή ανάμεσα στον κόλπο της Ουράμπα μέχρι στα βόρειο-ανατολικά στην Κατραγκένα όπου τα ηφαίστεια λάσπης έχουν μελετηθεί από τον Gansser (1960). Σχηματίζουν πολλές συγκεντρώσεις με υλικά πλούσια σε πηλό, Τριαδικής περιόδου, τα οποία είναι πτυχωμένα και απελευθερώνουν μεθάνιο και πιο σπάνια πετρέλαιο. Η πιο διάσημη δομή είναι το σύμπλεγμα Τουρμπάκο το οποίο περιέχει μεγάλο αριθμό θόλων πολλών μέτρων σε διάμετρο και διοχετεύει παχύρρευστες ροές λάσπης μέσα στην περιβάλλουσα ζούγκλα (Korff, 2002).

Έχει προταθεί ότι το μικρό ηφαίστειο λάσπης El Totuma, το οποίο εκτείνεται στα ανατολικά, συνδέεται με θαλάσσιες δομές. Φτάνει τα 12 m σε ύψος και βρίσκεται στην στεριά ενώ φαίνεται να είναι ανενεργό την παρούσα στιγμή (Humphrey, 1963). Εκτός από το ηφαίστειο αυτό, υπάρχει ένα πλήθος παρόμοιων δομών που βρίσκονται κατά μήκος των δυτικών Κολομβιανών Άνδεων. Τα ηφαίστεια στην ηπειρωτική αυτή περιοχή, φαίνεται να είναι αποτέλεσμα ανάστροφης τεκτονικής, συγκέντρωσης και συσσώρευσης κατά μήκος του περιθωρίου. Ωστόσο, έχει εντοπιστεί μια περιορισμένη δραστηριότητα ανάβλυσης λάσπης και μεθανίου (Humphrey, 1963).

Πιο πρόσφατα οι Vernet et al., (1992) ανέφεραν την ύπαρξη διαπυρισμού λάσπης στις ακτές της Καραϊβικής, της Κολομβίας στο δέλτα Μαγδαλένα. Η ύπαρξη τεκτονικών εφελκυστικών τάσεων και η συμπίεση των ιζημάτων του δέλτα, τα οδηγούν στην άνοδό τους. Έξω από τις ακτές του βόρειου Παναμά, εκεί όπου η πλάκα της Καραϊβικής υποβυθίζεται κάτω από αυτήν της κεντρικής Αμερικής, έχουν εντοπιστεί περισσότερα από 40 ηφαίστεια λάσπης. Οι δομές αυτές εμφανίζουν διάμετρο 0,4 με 2 Km, ύψος μικρότερο των 100 m και συνήθως σχηματίζονται στην χαμηλή άκρη του νεοσύστατου καλύμματος. Σεισμικά δεδομένα έδειξαν την ύπαρξη αερίων των υδριτών. Η πλειοψηφία αυτών των ηφαιστειών συνδέεται απευθείας με πτυχές και ίχνη ρηγματίων ενώ τα ιζήματα εξαιτίας της μεγάλης πίεσης οδηγήθηκαν προς την επιφάνεια μαζί με τις ροές λάσπης και μεγάλης περιεκτικότητας υδριτών (Korff, 2002).

Στο Εκουαδόρ μερικές εμφανίσεις ηφαιστειών λάσπης έχουν εμφανιστεί στα νοτιοδυτικά, σε περιοχές όπου Τριαδικά ιζήματα και ολισθόλιθοι σχηματίζουν το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής. Τα πετρώματα μετακινήθηκαν με τις ροές λάσπης αλλά δεν έχουν γίνει περαιτέρω μελέτες σχετικά με τους μηχανισμούς κίνησης στην περιοχή (Korff, 2002).

#### 1.10.10 Ηφαίστεια λάσπης στην Γροιλανδία και στο Βόρειο Ατλαντικό.

Στο Svartenhuk, βόρεια της Γροιλανδίας, έχει ανακαλυφτεί ένα αρκτικό ηφαίστειο λάσπης, αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια μελέτης του φυτοπλαγκτόν της περιοχής. Η δομή φαίνεται να είναι ανενεργή με έναν κρατήρα γεμάτο με μετεωρικό νερό και πάγο (Kristiansen et al., 1995).

Στην Νορβηγική – Γροιλανδική θάλασσα, βαθυμετρικές σαρώσεις του θαλάσσιου πυθμένα αποκάλυψαν πλήθος περιοχών με μαλακά στρώματα με λασπώδεις πηλούς (Vogt et al., 1999). Δραστήριες φλέβες αερίων εμφανίζονται σε διάφορα μέρη και έχουν δημιουργήσει μεγάλες καταρρεύσεις στις πλαγιές όπως στην περιοχή Στορέγκα. Μικρά βουνά έχουν επίσης παρατηρηθεί. Στα ακουστικά προφίλ αυτών των δομών εμφανίζονται θαμπά, ανομοιογενή ίχνη τα οποία πιθανώς προήλθαν από σωλήνες

αερίων. Ο όγκος των ιζημάτων και οι ζεστές ροές είναι σχετικά μικρός ενώ κάποια από τα βουνά οφείλουν την δημιουργία τους σε τοπική ρηγμάτωση (Vogt et al., 1999).

Στο ανώμαλο υπόβαθρο του βόρειου Ατλαντικού, κατά μήκος του ανατολικού ηπειρωτικού περιθωρίου της Ιρλανδίας, πλήθος ηφαιστείων λάσπης έχουν εντοπιστεί κατά την διάρκεια σεισμικών μελετών. Οι δομές αυτές είναι μικρού μεγέθους με διάμετρο 200-600 m και ύψους 40-60 m, ενώ έχουν τρυπήσει τα καλά στρωματωμένα ιζήματα, που αποδεικνύεται και από την χαρακτηριστική θόλωση των δομών αυτών. Τέσσερις περιοχές, η Magellan, Hovland, Belgica και Connemara, αποτελούνται από σημάδια και ρηχές δομές παγίδευσης αερίων σε περισσότερα από 120 βουνά μέσα στο συσσωρευτικό ιζηματογενές πρίσμα. Κάποια από αυτά είναι θαμμένα, ενώ άλλα περιβάλλονται από τάφρους που πιθανώς δημιουργήθηκαν μετά από απελευθέρωση αερίων. Η παρατήρηση των δομών αυτών χαρακτηρίζεται από μια ανενεργή πλέον μικροβιακή δραστηριότητα που συμμετείχε στη δημιουργία του μεθανίου και των αυτόχθονων ανθρακικών συμπαγών πετρωμάτων (Korff, 2002).

#### 1.10.11 Ηφαίστεια λάσπης στο Μαρόκο.

Οι περίπλοκες γεωλογικές διεργασίες μεταξύ της Ιβηρικής και της Αφρικανικής πλάκας από το Τριαδικό, δημιούργησαν ένα περίπλοκο μοντέλο ανάμεσα στο κόλπο του Καμπίζ, την θάλασσα του Άλμποραν και του ηπειρωτικού περιθωρίου του Μαρόκο. Πολλαπλές υποθαλάσσιες δομές ηφαιστείων λάσπης που συσχετίζονταν με την απελευθέρωση υδριτών περιεγράφηκαν από τον Gardner (1999). Στα δυτικά της υπό μελέτη περιοχής, πολλαπλά ελικοειδείς ανυψώσεις φαίνεται να συνδέονται με διαπυρισμό, ενώ στα ανατολικά τουλάχιστον έξι κυκλικά ηφαίστεια λάσπης και τέσσερις ακόμα λόφοι έχουν μελετηθεί. Υδρίτες μεθανίου έχουν βρεθεί σε ένα ηφαίστειο λάσπης (Korff, 2002).

#### 1.10.12 Λοιπές περιοχές ηφαιστείων λάσπης.

Ο Korff (2002), αναφέρει περιοχές ηφαιστείων λάσπης ανά τον κόσμο κάποια εκ των οποίων συνδέονται με υδρίτες μεθανίου, κάποια είναι ανενεργά, κάποια είναι ενεργά, άλλα εντοπίζονται σε υποθαλάσσιο περιβάλλον και άλλα σε ηπειρωτικό. Τέτοιες δομές εμφανίζονται στην Καλιφόρνια, στη Νεβάδα, στο Γουαϊόμινγκ, στο Μεξικό, στο Τέξας, στη Λουϊζιάνα, στον Μισισσιπή και στον Κόλπο του Μεξικού, στη λίμνη Μίσιγκαν, στην Ισπανία, στη Βόρεια Θάλασσα και στη Βαλτική θάλασσα, στη θάλασσα του Άλνταν, στις δυτικές Άλπεις και τα Απέννινα όρη στην Ιταλία, στη Σικελία, στη Ρουμανία, στην Τανζανία και στην Ανατολική Αφρική, στην Κριμαία, στον Καύκασο, στην Κασπία Θάλασσα, στο Τουρκμενιστάν και στο Ιράν, στο Μάκραν και στο Πακιστάν, στην Ινδία, στην Μπούμα, στην Ιάβα και στην Σουμάτρα, στο Βόρνεο, στο Μπρουνέι και στο Σάμπα, στη Νιγηρία, στο τόξο του Τιμόρ-Κεράμ στην Ινδονησία, στην Παπούα - Νέα Γουινέα, στην Ταιβάν, στην Ιαπωνία, στο Σακαλίν, στην Αυστραλία, στην Νέα Ζηλανδία, στην Λιβυκή και Αιγυπτιακή έρημο και στην Ολλανδία (Korff, 2002).

### 1.11 Παλαιότερα μοντέλα δημιουργίας ηφαιστείων λάσπης και διαπυρισμού στη Μεσογειακή τάφρο.



Οι Ryan et al. (1983) αναφέρουν την ηφαιστειότητα σε δομές λάσπης, ως το αποτέλεσμα της προώθησης της λάσπης από το συσσωρευτικό πρίσμα σε εκτεταμένη κλίμακα που σχετίζεται με την σταθερή κατάσταση της υποβύθισης. Οι Camerlenghi et al., (1995) πρότειναν ένα μοντέλο στο οποίο η ηφαιστειότητα λάσπης στο Μεσογειακό τόξο σχετίζεται με τη Βόρεια υποβύθιση και απελευθέρωση της λάσπης από βάθη 5 με 7 Km που προέρχεται από ζώνες πισω-ώθησης (backtrusting). Πλούσια λάσπη με αέρια, αρχικά εκτοξεύτηκε στην επιφάνεια του πυθμένα και στη συνέχεια επεκτάθηκε ομοιόμορφα με μορφή κυκλικού κοιλώματος, εξαιτίας της κατάρρευσης των ζεστών ιζημάτων κατά την εξαέρωσή τους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ρευστής λάσπης η οποία ανακατεύτηκε με τα περιβάλλοντα πελαγικά ιζήματα. Στο τελικό στάδιο της ηφαιστειότητας, ιξώδης λάσπη παρείσφρησε στο σύστημα, δημιουργώντας το κωνικό σχήμα των ηφαιστειών λάσπης όπως στην περιοχή Όλυμπος. Οι Limonov et al. (1996), ανέφεραν ότι η δημιουργία του συμπλέγματος Όλυμπος συνδέεται με τη συμπίεση του συσσωρευτικού μεσογειακού τόξου. Η λάσπη στο μοντέλο αυτό πιέστηκε προς τα έξω από τα πλούσια σε πηλό κάτω τμήματα του συσσωρευτικού συστήματος. Αυτά εναποτέθηκαν βόρεια με σχετικά μικρή γωνία περίπου  $45^\circ$  σε ένα μείγμα νερού και λάσπης, αναμειγμένα με αέρια. Δεν αναφέρεται να υπάρχει υδραυλικό σύστημα από κάτω, ενώ η λάσπη των ιζημάτων και των λατυποπαγών πιθανώς είναι τυχαία. Οι εβαπορίτες του Μεσσηνίου δεν φαίνεται να παίζουν κάποιο ρόλο στη δημιουργία των δομών. Οι Chaumillon και Mascle (1995), συμφωνούν ότι η σύγκρουση του μεσογειακού τόξου με την βόρειο Αφρική συνέβη πριν την περίοδο του Μεσσηνίου με αποτέλεσμα οι ηφαιστειακές δομές λάσπης να αναπτύχθηκαν σε ένα εξελιγμένο χρονικά περιβάλλον σύγκρουσης. Γνωρίζοντας ότι ο σημερινός ρυθμός υποβύθισης είναι  $3,5 \text{ cm/χρόνο}$  (Kastens, 1991), περίπου  $200 \text{ km}$  σύγκλησης πιθανώς να έχουν συμβεί από το Μειόκαινο. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη και την κίνηση του Αιγαιακού τόξου προς τα νότια, υπολογίζεται ένας συνολικός ρυθμός υποβύθισης της τάξεως των  $7 \text{ cm/χρόνο}$  και κατ' επέκταση πάνω από  $400 \text{ Km}$  της πλάκας της Βορείου Αφρικής έχει καταβυθιστεί κάτω από την μεσογειακή τάφρο από το Μειόκαινο. Είναι πιθανό, ένα μέρος του Βόρειου Αφρικανικού ηπειρωτικού παθητικού περιθωρίου, να μην έχει ακόμα καταδυθεί, δεδομένου ότι η ζώνη διάλυσης περιορίζεται ακόμα στην εξωτερική ηπειρωτική κατωφέρεια, χωρίς σημαντική ανύψωση της υπερκείμενης πλάκας που αποτελεί το υπόβαθρο (Roberson et al., 1998). Για παράδειγμα τέτοιο φαινόμενο έχει παρατηρηθεί και στην τοποθεσία Ερατοσθένης στα νότια της Κύπρου, όπου η άκρη της υπερκείμενης πλάκας εμφανίζει μια σημαντική ανύψωση (Emeis, Robertson, Richter, et al., 1996). Οι Chaumillon και Mascle, (1995) επίσης πρότειναν ότι η ηφαιστειότητα λάσπης πιθανώς προέρχεται από πολλές αποκολλησεις παρά από μία μόνο, που έλαβαν τόπο στο μεσογειακό συσσωρευτικό πρίσμα, με την πρώτη να βρίσκεται στους εβαπορίτες του Μεσσηνίου και την δεύτερη στους 'Απτιους σχιστόλιθους. Οι Fusi και Kenyon (1996) αναφέρουν ότι τα ηφαίστεια λάσπης σχηματίζονται παράλληλα με το τεκτονικό άκρο του συσσωρευτικού μεσογειακού πρίσματος και σχετίζονται με τις δομές που υπάρχουν κάτω από αυτό. Μέσα σε όλες αυτές τις θεωρίες υπάρχει ακόμα το ερώτημα εάν οι δομές αυτές είναι ηφαίστεια λάσπης, διαπυρισμός λάσπης ή και τα δύο (Roberson et al., 1998). Κάποιες από τις δομές αυτές ερμηνεύονται ως δομές διαπυρισμού όπου φαίνονται μεγάλες ποσότητες υλικών δημιουργήθηκαν πάνω από τον πυθμένα χωρίς την συνεισφορά πλευρικών ροών (Limonov et al., 1994). Ωστόσο, ροές λάσπης φαίνεται να αναδύθηκαν



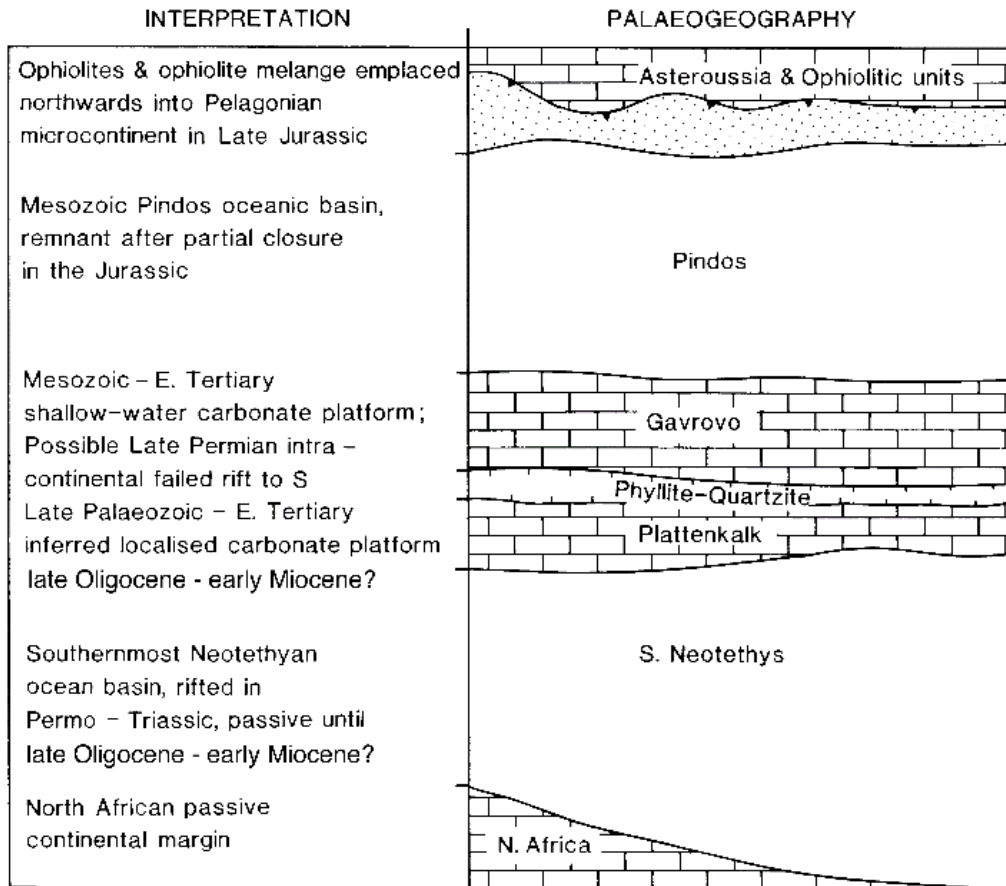
από ξεχωριστούς κρατήρες κατά τη διάρκεια της κίνησής τους και μελέτες παρατήρησης υψηλής ανάλυσης αποκάλυψαν γλωσσοειδείς δομές που μπορούν να χαρακτηριστούν σαν ροές λάσπης (Limonon et al., 1994). Ακόμα, οι γεωτρήσεις που έγιναν στα 200 mdsf βάθους, στις θέσεις των ηφαιστειών λάσπης Μιλάνο και Νάπολη κατά το πρόγραμμα ωκεάνιας γεώτρησης (Ocean Drilling Program) και πιο συγκεκριμένα με την γεώτρηση LEG160, δεν παρουσίασαν ενδείξεις μηχανισμών διεύθυνσης. Στις μεγάλες σε έκταση περιοχές όπου εμφανίζεται εικόνα ροών στο υπόβαθρο, είναι πιθανή η ύπαρξη αποθέσεων καταλοίπων των ροών αυτών.

Συμπερασματικά, φαίνεται ότι οι περισσότερες ή και όλες οι κυκλικές με ημικυκλικές δομές είναι ηφαιστεια λάσπης, ωστόσο η παρουσία κάποιων δομών που πιθανώς είναι αποτέλεσμα διαπυρισμού δεν μπορεί να αποκλειστεί, πόσο μάλλον σε μια περιοχή που είναι εμφανής η περιθωριακή παραμόρφωση (Roberson et al., 1998).

### 1.12 Αναθεωρημένη υπόθεση δημιουργίας των ηφαιστειών λάσπης.

Το βόρειο Αφρικάνικο περιθώριο αντιπροσωπεύει ένα μέρος του παθητικού περιθωρίου της αρχαίας υπερηπείρου Γκοντβάνας, το οποίο υπέστη ρήξη χρονικά κατά το άνω Πέρμιο με κάτω Μεσοζωικό, σχηματίζοντας τον ωκεανό της Νεοτηθύως. Πολλές μικρο-ήπειροι αποκόπηκαν από την Γκοντβάνα και στην συνέχεια προωθήθηκαν προς το περιθώριο της Ευρασίας κατά την Μεσοζωική εποχή. Κατά τη διάρκεια του κάτω Τριαδικού, τα απομεινάρια των μικρο-ηπείρων της Νεοτηθύως και μικρά σε μέγεθος ωκεάνια τεμάχια του πυθμένα στον Βορρά, σταδιακά συσσωρεύτηκαν στο νότιο περιθώριο της Ευρασίας. Κατά το άνω Ηώκαινο με κάτω Ολιγόκαινο, η σύγκρουση δημιούργησε ένα μεγάλο οικοδόμημα από επιπεύσεις, συμπεριλαμβανομένου και του καλύμματος της Κρήτης. Μεταμορφικά και κάποια οφιολιθικά πετρώματα σχηματίστηκαν στα ανώτερα στρώματα του καλύμματος και αποτέλεσαν τα πρώτα που αποκαλύφθηκαν κατά την εκταφή τους, στο Πλειόκαινο με Πλειστόκαινο, εξαιτίας ενός συνδυασμού διάβρωσης και εκτεταμένης τεκτονικής δραστηριότητας (Roberson et al., 1998).

Εξαιτίας της συνεχιζόμενης σύγκλησης της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας, το νότιο υπόβαθρο της Νεοτηθύως ξεκίνησε να υποβυθίζεται στο άνω Ολιγόκαινο με κάτω Μειόκαινο, σχηματίζοντας το συσσωρευτικό σύμπλεγμα της Μεσογειακής τάφου. Η ζώνη αποκοπής της εισερχόμενης πλάκας πιθανώς βρισκόταν στο ρευολιθικό όριο, ανάμεσα στο κατώτερο τέμαχος το οποίο ήταν ανθρακικές διαδοχές βαθιάς θάλασσας άνω Κρητιδικής με κάτω Τριτογενούς περιόδου και στο υπερκείμενο τέμαχος το οποίο αποτελούνταν από πυριτικά ιζήματα και ασβεστολιθικούς τουρβιδίτες Ολιγόκαινου με Μειόκαινου. Επιπλέον, τα υλικά που καταβυθίστηκαν, πιθανώς προέρχονται από την υψηλή πίεση στα κατώτερα τεμάχια του Κρητικού τόξου. Κατά τη διάρκεια του άνω Ολιγόκαινου με κάτω-μέσω Μειόκαινου, μια σφήνα από πυριτικοκλαστικούς τουρβιδίτες, κλαστικούς τουρβιδίτες, πελαγικούς ασβεστόλιθους, λάσπη και πηλό, συσσωρεύτηκε για να σχηματίσει ένα πρόδρομο μεσογειακό ύβωμα. Η κύρια πηγή των υλικών αυτών πιθανολογείται ότι είναι το βόρειο Αφρικάνικο παθητικό περιθώριο, αλλά μικρά ποσοστά πετρωμάτων όπως οφιολιθικά υλικά, προήλθαν από το Βορρά, από την Κρήτη και από άλλες νότιες περιοχές του Αιγαίου (Roberson et al., 1998).



9. Παλαιογεωγραφική αναπαράσταση του νοτίου Αιγαίου κατά το άνω Κρητιδικό. Κατά την περίοδο αυτή ο Νεοθυθιακός ωκεανός της Πίνδου στον Βορρά ήταν κλειστός με οφιόλιθους και αναμειγμένες αποθέσεις του άνω Ιουρασικού. Στα νότια, μικρο-ήπειροι αποκολλήθηκαν από την Γκοντβάνα κατά το Πέρμιο με Τριαδικό. Αποτελούσε μέρος της Απούλιας πλάκας και δημιουργήθηκε σε ρηχά νερά με ανθρακικό υπόβαθρο (i.e., Gavrovo, Plattenkalk, and Phyllite-Quartzite units). Το νότιο τμήμα της Νεοθυθύως παρέμενε ανοικτό και στον βορά συνόρευε με το παθητικό περιθώριο (Roberson et al., 1998).

Κατά τη διάρκεια του Μεσσηνίου, λεπτοί εβαπορίτες επικάλυψαν το μεσογειακό υπόβαθρο, συμπεριλαμβανομένων και των αβυσσικών πεδιάδων και την τάφρο στα νότια του τότε συμπλέγματος του Μεσογειακού συσσωρευτικού τόξου. Μια νέα ρεολιθική διαφορά αναπτύχθηκε ανάμεσα στις συμπαγείς άμμους και στα ανθρακικά πετρώματα στην κάτω πλευρά και στις χαλαρές λάσπες, την ιλύ και τις άμμους από την

πάνω πλευρά. Ως αντίδραση στην αλλαγή της ρεολογίας της περιοχής, το ρήγμα αποκόλλησης ανυψώθηκε, όπως και τα υλικά μέσα σε αυτό, ηλικίας άνω Μειόκαινου, όπως παρατηρήθηκε στα υλικά των ηφαιστειών λάσπης. Η ενσωμάτωση των ρεολογικά αδύναμων εβαποριτών, καθώς η υποβύθιση λάμβανε χώρα, οδήγησε το συσσωρευτικό πρίσμα να επεκταθεί πλευρικά, δικαιολογώντας έτσι τη σημερινή απουσία της τάφρου στη μορφολογία της περιοχής. Ένα αδιαπέρατο στρώμα γύψου στην κορυφή του συσσωρευτικού πρίσματος, απέτρεψε τη διαφυγή των υγρών από τους πόρους του σε αυτό το στάδιο, ενώ παράλληλα βοήθησε στην παρουσία μη συνεκτικής λάσπης εκατέρωθεν των εβαποριτών. Ωστόσο, τα λεπτά στρώματα εβαποριτών είναι απόντα από τις αποκαλυμμένες δομές του συσσωρευτικού πρίσματος στο σύνολό του (Roberson et al., 1998).

Κατά τη διάρκεια του άνω Πλειόκαινου με Πλειστόκαινου, το τότε πεπλατυσμένο συσσωρευτικό Μεσογειακό ύβωμα αρχικά συγκρούστηκε με το Κυρηναϊκό ακρωτήριο του βορείου παθητικού περιθωρίου της Αφρικής, προκαλώντας ανάστροφη κίνηση, συντηρώντας το αρχικό στένωμα. Παλαιότερα ιζήματα που είχαν συσσωρευτεί στην περιοχή, κυρίως Μειοκαινικής εποχής, καθώς είχαν υποστεί έντονη τεκτονική παραμόρφωση εξαιτίας της ανάστροφης κίνησης των καλυμμάτων, δημιούργησαν ζώνες και περιοχές εξόδου για τα υπό πίεση ρευστά, τα οποία προϋπήρχαν από την δημιουργία της ζώνης αποκόλλησης. Η ανοδική πορεία των ρευστών, συμπεριλαμβανομένων και των διαλυμένων αερίων, τελικά αποκόπηκε από το κάλυμμα των αδιαπέρατων εβαποριτών, και κατ' επέκταση και των υδριτών μεθανίου. Όταν η συνδυασμένη λιθοστατική/υδροστατική πίεση αυξήθηκε και ξεπέρασε την ταχύτητα της ανάστροφης κίνησης των τμημάτων, τα στρώματα του Μεσσηνίου διαπεράστηκαν και σηματοδοτήθηκε η έναρξη της ηφαιστειακής δραστηριότητας των ηφαιστειών λάσπης. Αέρια και κυρίως το μεθάνιο, είναι γνωστό ότι ακολουθεί την διαδρομή στη ζώνη υποβύθισης, όπως στα νησιά Μπαρμπάντος (Martin et al., 1996). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι υγρά στους πόρους που βρίσκονται κάτω από υψηλή πίεση, αντισταθμίζουν τη λιθολογική πλήρωση ακόμα και στα βαθύτερα στρώματα στη ζώνη της καταβύθισης, γεγονός που επιτρέπει στη λάσπη να παρουσιάζει μια μη συνεκτική μορφή, που τείνει σε αυτή της ρευστής (Roberson et al., 1998). Διάφορες κινήσεις και μεταναστεύσεις προς τα άνωθεν των σχηματισμών, μπορεί να οδηγήσουν σε πιθανή διόγκωση του θαλάσσιου πυθμένα (Yassir and Bell, 1994).

Μετά τη μετακίνηση αυτή, ανοδικές ροές λάσπης εμφανίστηκαν στην περιοχή, οι περισσότερες εκ των οποίων είχαν προέλευση τα ιζήματα των εβαποριτών του Μεσσηνίου στην γύρω περιοχή των δολομιτών (Roberson et al., 1998). Στα νησιά Μπαρμπάντος, το ρήγμα αποκόλλησης λειτουργεί σαν ταμιευτήρας ρευστών, ο οποίος οριοθετείται από αδιαπέραστα πετρώματα-φράγματα. Η ζώνη αποκόλλησης έχει περίπου 25 m πάχους και εμφανίζει δομές λεπιών, συστήματα ρηγμάτωσης, ενώ διαθέτει τόσο άθικτα όσο και παραμορφωμένα ιζήματα κάτι που οφείλεται στο γεγονός ύπαρξης μια ζώνης με ρευστά υψηλής πίεσης (Sharpley, Ogawa, Blum et al., 1995). Αυτή η ερμηνεία υποστηρίζεται και στις δοκιμές που έγιναν στο συσσωρευτικό πρίσμα της Κασκαδίας (Screaton et al., 1995).

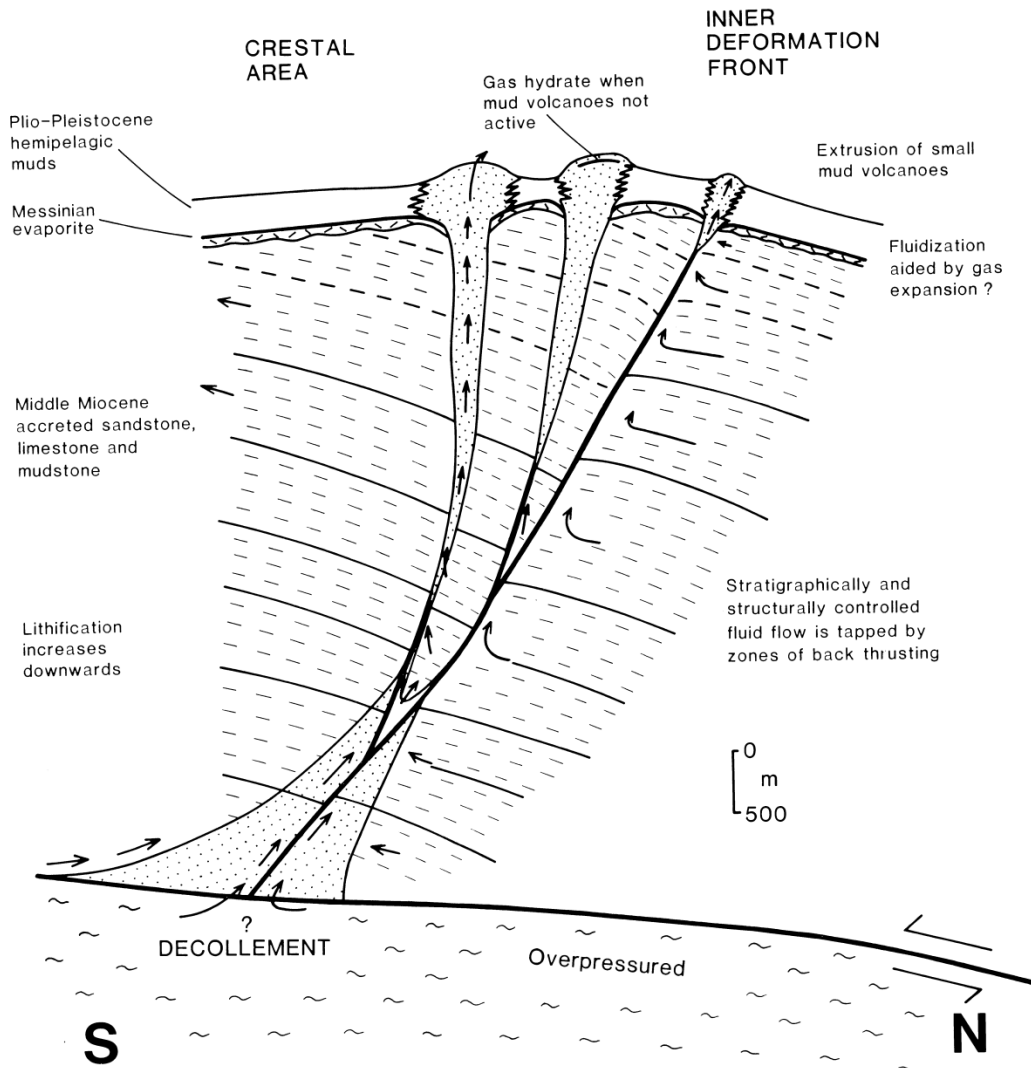
Η ανάστροφη κίνηση του καλύμματος της Μεσογείου πιθανώς δημιούργησε αυλάκια από τα οποία αναδύθηκαν τα υγρά. Η γεωλογική αυτή κίνηση ήταν ενεργή για περισσότερο από 1 Ma, και πιθανώς σχετίζεται με την ανοδική κίνηση της εσωτερικής

πλάκας του Μεσογειακού τόξου. Τα ιζήματα της υπερκείμενης περιοχής που προηγούνται της συσσωρευτικής κίνησης λιθοποιήθηκαν. Κατά την άνοδο τους τα πλούσια σε λάσπη ρευστά, σταδιακά αναμίχτηκαν και δημιούργησαν κλάστες ψαμιμιτών και ασβεστόλιθων. Σε μικρότερα βάθη (<2 mbsf), η μεταφορά προς τα πάνω πιθανώς υποβοηθήθηκε από την αύξηση του χώρου και οδήγησε σε σταδιακή απελευθέρωση του μεθανίου, σε περιορισμένο βαθμό ωστόσο, εξαιτίας της υδροστατικής πίεσης. Μεγάλες ποσότητες μεθανίου υπολογίζεται να απελευθερώθηκαν κατά την εξαγωγή αυτή (Roberson et al., 1998).

Ο διαχωρισμός των ιζημάτων επιτεύχθηκε με έναν συνδυασμό πολλών παραγόντων όπως τη δημιουργία ρηγμάτων κατά την αρχική συσσώρευση πριν την έναρξη της ηφαιστειότητας λάσπης, τη φυσική τριβή και ρηγματώση στα συσσωρευμένα στρώματα κατά την φυσική άνοδο της λάσπης καθώς τα λατυποπαγή ρηγματώνονταν με της ανάστροφες κινήσεις, και τέλος με την υδροστατική ρωγμάτωση που ήταν αποτέλεσμα της απελευθέρωσης καταπιεσμένων ρευστών λάσπης, πλούσιων σε αέρια κατά την έκρηξή τους (Roberson et al., 1998).

Κατά τη φάση όπου η λάσπη έφτανε τον πυθμένα, καθοδηγούνταν ώστε να δημιουργήσει πλούσιους σε λάσπη κώνους. Η υδραυλική διάρρηξη και η σχιστότητα στους κλάστες υποδεικνύει μια φάση ηφαιστειότητας στα πρώιμα στάδια των ηφαιστειών λάσπης στο σύμπλεγμα Όλυμπος. Οι κλάστες διαβρώθηκαν και δημιούργησαν κυρίως υπογωνιώδη και ημικυκλικά σχήματα εξαιτίας της ανυψωτικής κίνησης των υλικών. Στη συνέχεια εξωθήθηκαν προς την επιφάνεια μεγάλες στήλες με τραχιά κυρίως υπολειμματικά υλικά τα οποία σχημάτισαν τη βάση και τις πλευρές των ηφαιστειών λάσπης. Η απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ρευστών λάσπης κάτω από υψηλή πίεση, συνοδεύτηκε από περιφερειακή υποχώρηση των υλικών, σχηματίζοντας περιμετρικά μια τάφρο, η οποία είτε παραμένει μέχρι και σήμερα με αυτήν την μορφή όπως στο ηφαίστειο λάσπης Νάπολη, είτε έχει πληρωθεί με ιζήματα όπως στο ηφαίστειο λάσπης Μιλάνο. Ανάμεσα στις φάσεις της ηφαιστειότητας, τα ηφαίστεια λάσπης καλύφθηκαν από ημιπελαγικά ιζήματα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα αδιαπέραστο κάλυμμα κάτω από το οποίο συσσωρεύτηκαν αέρια υδριτών όπως στο ηφαίστειο Μιλάνο στο οποίο έχουν παγιδευτεί μεγάλες ποσότητες φυσικού αερίου κάτω από τον πυθμένα. Η χαμηλή διαπερατότητα που εμφανίζουν τα λατυποπαγή, υποδεικνύει μια συνεχή αύξηση της πίεσης που πιθανώς συνέβη ακόμα και με απουσία υδριτών. Παρεμβολές πλούσιων υλικών σε πηλό και τουρβιδιτών, πιθανώς δημιουργήθηκαν σε περιοχές μακριά από τους κώνους των ηφαιστειών και διοχετεύτηκαν σε αυτούς στην συνέχεια. Ο κώνος εν τέλει έφτασε στο τελικό του ύψος το οποίο μπορούσε να υποστηριχθεί από την πίεση του βάρους του και στη συνέχεια τα υλικά διατάχτηκαν περιμετρικά του, σχηματίζοντας επίπεδες δομές παρόμοιες με τους αγωγούς των νησιών Μπαρμπάντος. Ροές πλούσιες σε λάσπη, πιθανώς απελευθερώθηκαν στη συνέχεια με ηφαιστειότητα σχηματίζοντας επίπεδες δομές με επιπλέον αμμώδη ιζήματα όπως στο ηφαίστειο Νάπολη (Roberson et al., 1998).





10. Αναθεωρημένο μοντέλο του ηφαιστειότητας λάσπης στο σύμπλεγμα του συσσωρευτικού Μεσογειακού πρίσματος, που προέκυψε από τα πετρογραφικά και λιθολογικά δεδομένα της γεώτρησης LEG160. Η ηφαιστειότητα ξεκίνησε πριν από περισσότερο από 1 Ma, απόρροια της σύγκρουσης του Μεσογειακού άκρου του συσσωρευτικού τόξου με το βόρειο Αφρικανικό ηπειρωτικό περιθώριο. Για να διατηρηθεί το απαραίτητο στένωμα, η βορειόστροφη επίπλευση ενώθηκε με το δύσκαμπτο πίσω μέρος του φλοιού της Κρήτης. Το κάλυμμα των εβαποριτών του Μεσσηνίου τοποθετήθηκε αργότερα, σηματοδοτώντας την ηφαιστειότητα. Υγρά υψηλής πίεσης στο ρήγμα μετασχηματισμού κινήθηκαν προς τα πάνω κατά μήκος της επίπλευσης προκαλώντας μερική ρευστοποίηση των ιζημάτων του κάτω-μέσου Μειοκαινικού συσσωρευτικού πρίσματος δημιουργώντας κλάστες και υλικά, τα οποία εν τέλει απελευθερώνονται στην επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα μέσω πολλαπλών ροών με θραύσματα (Roberson et al., 1998).

Τα ηφαίστεια λάσπης μπορούν να χαρακτηριστούν εκ περιτροπής ως ανενεργά για μεγάλες περιόδους όπως το Μιλάνο, και ενεργά για σύντομες περιόδους όπως αυτό της Νάπολης. Οι αδρανείς φάσεις χαρακτηρίζονται από επανασχηματισμό της δομής και επανατοποθέτηση της 'κουρτίνας' των ημιπελαγικών ιζημάτων, σύμφωνα με τοπογραφικές παρατηρήσεις και την υποθαλάσσια δραστηριότητα, τη δημιουργία

συγκεντρώσεων υδριτών σε ρηχά βάθη κάτω από τον πυθμένα και σταδιακή αύξηση της πίεσης των ρευστών στους πόρους σε βάθη που λαμβάνουν χώρα γεωλογικά γεγονότα όπως τεκτονικές διεργασίες υποβύθισης και ανάστροφες κινήσεις. Αντίθετα, στις περιόδους με ηφαιστειακή δραστηριότητα, η ηφαιστειότητα χαρακτηρίζεται από την αποσύνθεση όλων των υδριτών καθώς τα θερμά υγρά φτάνουν στην επιφάνεια, απομακρύνονται πολλαπλές ροές υπολειμματικών υλικών, παρατηρείται αλλαγή στο σχήμα των κώνων, περιφερειακή καθίζηση της τάφρου γύρω από τα ηφαίστεια και σταδιακή αποσυμπίεση, η οποία τερματίζει τη συνέχιση της έκρηξης (Roberson et al., 1998).

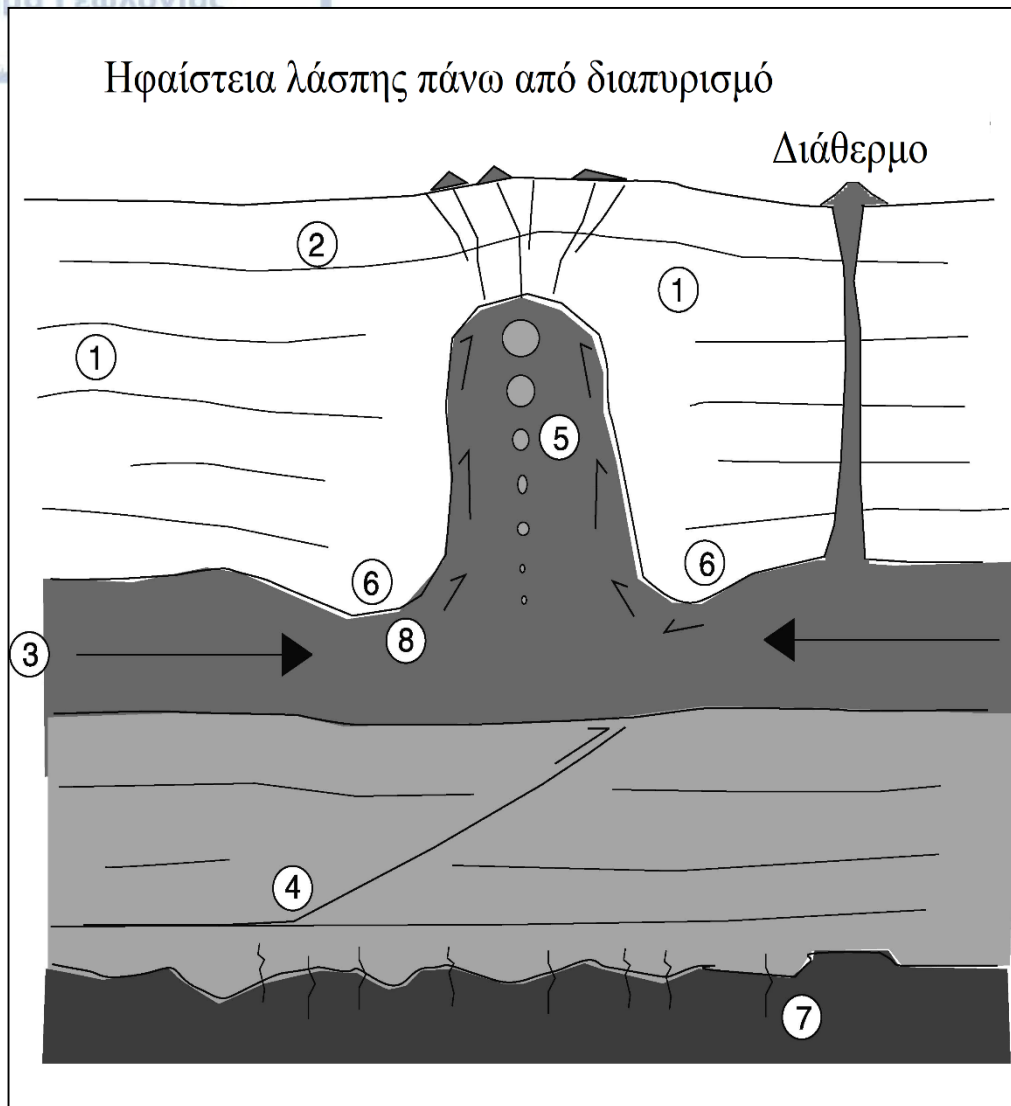
### 1.13 Προέλευση αερίων στα ηφαίστεια λάσπης.

Στην πλειοψηφία των περιοχών με ηφαίστεια λάσπης, υγρά και ρευστά αναμειγμένα με αέρια δεν προκύπτουν από την ίδια πηγή ή το ίδιο βάθος. Ακόμα, παρόλο που το μεθάνιο αποτελεί την πιο θερμοκαταλυτική αδρανή φάση αερίων στα ηφαίστεια λάσπης, υπάρχουν άλλες περιοχές όπου το μεθάνιο σε μικρά βάθη που προέρχεται από βιογενείς διεργασίες συμμετέχει στην απελευθέρωση της λάσπης. Υπάρχουν πολλές τέτοιες γνωστές περιοχές στην Γη, όπου αβαθή αέρια είναι η 'σκανδάλη' αλλά όχι η κινητήρια δύναμη για τη διοχέτευση της λάσπης. Τα ηφαίστεια στο Μεσογειακό τόξο, μπορούν να αποτελέσουν την απόδειξη αυτού του ισχυρισμού. Οι De Lange και Brumsack (1998) καθώς και οι Aloisi et al. (2000a, 2000b), θεωρούν ότι τα ρευστά στους πόρους ανανεώνονται από τα ανοδικά ρευστά στα οποία το βιογενές μεθάνιο έχει απελευθερωθεί από διαδικασίες δημιουργίας υδριτών (μειώνονται και διαλύονται τα ιόντα ειδικά σε περιβάλλοντα χαμηλής χλωριότητας), και κατ' επέκταση καθιστά τους αέριους υδρίτες μη πιθανούς υπεύθυνους για τις ανοδικές δυνάμεις και τις πιέσεις στα ηφαίστεια λάσπης. Στην περίπτωση που η θεωρία αυτή είναι σωστή ως προς τη μείωση της χλωρίωσης εξαιτίας των υδριτών, τέτοιοι υδρίτες θα ήταν σταθερές ενώσεις μόλις σε μερικά μέτρα βάθους. Συμπερασματικά λοιπόν, οι πολλαπλές ενδείξεις βαθιών πηγών λάσπης στα ηφαίστεια λάσπης, αποδεικνύει ότι τα αέρια δεν είναι οι κύριες δυνάμεις για την άνοδο και τη διοχέτευση των ροών λάσπης (Korff et al., 1998).

Για τη δύναμη που ωθεί τα αέρια προς την επιφάνεια στα μεγάλα βάθη κατά την μετακίνηση της λάσπης, έχουν αναδειχθεί πολλά πιθανά σενάρια όπως η εξαέρωση του μανδύα, η πυριγενής ηφαιστειακή εξαέρωση και η γένεση υδρογονανθράκων. Τα μανδουκά αέρια διαδραματίζουν αναμφίβολα οριακό ρόλο σαν δυνάμεις ώθησης. Ακόμα και στις διάσιμες περιοχές ηφαιστειών λάσπης, όπως αυτές της Μαύρης και της Κασπίας Θάλασσας που χαρακτηρίζονται από μεγάλα ρήγματα κατά την Καυκάσια ορογένεση, η δύναμη που ασκεί το αέριο κατά την κίνησή του φαίνεται αμελητέα σε σύγκριση με το σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται. Δεν έχει αναφερθεί εμφανής διαρροή αερίων στις 'υποψήφιες' περιοχές για τη θεωρία της μανδουκάκης εξαέρωσης, όπως στα σερπεντινωμένα ηφαίστεια λάσπης στις Μαριάνες. Η σύσταση των ρευστών με αέρια που συλλέχθηκαν από το νερό των πόρων έδειξε την παρουσία CO<sub>2</sub>, μεθανίου, S, υδρογονανθράκων, και την ύπαρξη ευγενών αερίων τα οποία αποτελούν και τα βασικά συστατικά. Εξαιτίας της έλλειψης δειγματοληψίας στις περιοχές αυτές, δεν μπορούν να γίνουν ακριβείς εκτιμήσεις σχετικά με τα ποσοστά ύπαρξης αυτών των αερίων (Korff, 2002). Ωστόσο, από τη χημεία των ενδοπορικών ρευστών και τις αλληλεπιδράσεις των ρευστών με τα πετρώματα, έχει προταθεί ότι βαθιά υδατικά ρευστά απελευθερώνονται από μανδουκά βάθη και στη συνέχεια σερπεντιώνονται και

επικάθονται στην σφήνα του τόξου (Mottl, 1992). Αυτά τα ρευστά, παρά την προέλευσή τους, είναι διαθέσιμα σε μεγάλες ποσότητες στα καλύμματα των ιζημάτων και των κατωφερειών, ενώ πιστεύεται ότι ευθύνονται και για την ηφαιστειότητα στις περιοχές αυτές. Για τη δεύτερη θεωρία, η γύρω περιοχή των μεγάλων πυριγενών ηφαιστειών, χαρακτηρίζεται από αέρια CO<sub>2</sub> και N<sub>2</sub> τα οποία αναμιγνύονται με υδροθερμικά νερά που καθοδηγούν την ηφαιστειότητα των ηφαιστειών λάσπης. Κανένα δείγμα των ρευστών αυτών δεν έχει αναμιχθεί ακόμα σε κάποιο σενάριο στο οποίο ανεβαίνει η γεωθερμική βαθμίδα. Λαμβάνοντας υπόψιν την τρίτη θεωρία, τους υδρογονάνθρακες και τη συσχέτιση ως προς σύνδεσή τους με τα ηφαίστεια λάσπης ήταν από καιρό γνωστή στους επιστημονικούς κύκλους. Η επίδραση της δημιουργίας των αερίων των υδρογονανθράκων επηρεάζει σημαντικά την αύξηση της πίεσης και σχετίζεται με την δημιουργία ηφαιστειών λάσπης και την εμφάνιση διαπυρισμού όπως μελέτησε και ο Hedberg (1974). Σε συνδυασμό με την αύξηση των πιέσεων που ασκούν τα ρευστά που βρίσκονται παγιδευμένα στο νερό των πόρων ή στο ορυκτό νερό, το μεθάνιο είναι η πιο ισχυρή παράμετρος για τη δημιουργία υπερπίεσης, ρευστοποίησης και διαρροής (Korff, 2002). Στον Καύκασο, έχει προταθεί ότι το μεθάνιο προέρχεται από βάθη όπου βρίσκεται σε ρευστή μορφή [βάθη μεταξύ 10-12 Km σύμφωνα με τα σεισμικά δεδομένα (Cooper, 2001)] πριν μεταναστεύσει προς την επιφάνεια και επεκταθεί πυροδοτώντας εκρήξεις και εκροές λάσπης (Korff, 2002).

Τα ρευστά των ηφαιστειών λάσπης στο Μεσογειακό τόξο έχουν υπολογιστεί βάση των μετρήσεων του ρυθμού ανάδυσης των ρευστών στο Αζερμπαϊτζάν και στα Μπαρμπάντος. Για το σύμπλεγμα Όλυμπος έχει υπολογιστεί μια συντηρητική εκτίμηση ανόδου αερίων της τάξης του  $1,68 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$  με  $2,85 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$  εξαιτίας την πίεσης που ασκούν οι συγκεντρώσεις λάσπης. Αν λάβουμε υπόψιν τις έρευνες των Korff et al., (2001), δεδομένου των στηλών των ρευστών που έχουν εξωθηθεί από το υπέδαφος, το αποτέλεσμα θα ήταν μια μέτρηση των  $8,72 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$  με  $1,48 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ . Αν αυτός ο αριθμός ληφθεί υπόψιν ότι αντικατοπτρίζει την παγκόσμια συγκέντρωση ενεργών δομών, η έκλυση αερίων από τις γνωστές ενεργές δομές ηφαιστειών λάσπης θα ήταν περίπου του μεγέθους των  $1,14 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$  με  $1,94 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ . Τέτοιου μεγέθους συνεισφορά αερίων του θερμοκηπίου των ηφαιστειών λάσπης φαίνεται να είναι πολύ μικρή. Ωστόσο, αν λάβουμε υπόψιν το γεγονός ότι τα ηφαίστεια λάσπης υπάρχουν στην Γη από τα πολύ παλιά γεωλογικά στάδια σχηματισμού του πλανήτη, πιθανώς επηρέασαν την εξέλιξη της ατμόσφαιρας της Γης (Korff, 2002).



11. Σχηματικό διάγραμμα του διαπυρισμού λάσπης, και της δημιουργίας ηφαιστειών λάσπης και διάθερμων συμπεριλαμβανομένων και πιθανών ρευστών. Γεωθερμικά ώριμα ρευστά μπορούν να εντοπιστούν στις θέσεις 3, 4 και 7 ενώ στις θέσεις 1, 6, 8 το νερό από διαχωρισμένους υδρίτες πιθανώς παρέχουν φρέσκα ρευστά (Korfi, 2002).

Πηγές Ρευστών κάτω από υψηλή πίεση και διοχέτευση λάσπης:

- 1) Ρευστά των πόρων επεκτείνονται εξαιτίας της συμπίεσης,
- 2) Βιογενετικό μεθάνιο από την αποδόμηση οργανικής ύλης,
- 3) Πλευρικές ροές ρευστών διαμέσου στρατογραφικών οριζόντων και ζωνών ρηγμάτωσης,
- 4) Μετανάστευση ρευστών κατά μήκος των στρωμάτων της εφίπλευσης,
- 5) Θερμογενετικό μεθάνιο και υψηλοί υδρογονάνθρακες,
- 6) Ρευστά από ορυκτολογική εξαέρωση,
- 7) Υδροθερμικά ρευστά, προερχόμενα από το υποκείμενο πέτρωμα,
- 8) Επέκταση ρευστών από εσωτερική διάβρωση στη δομή του διάπυρου.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

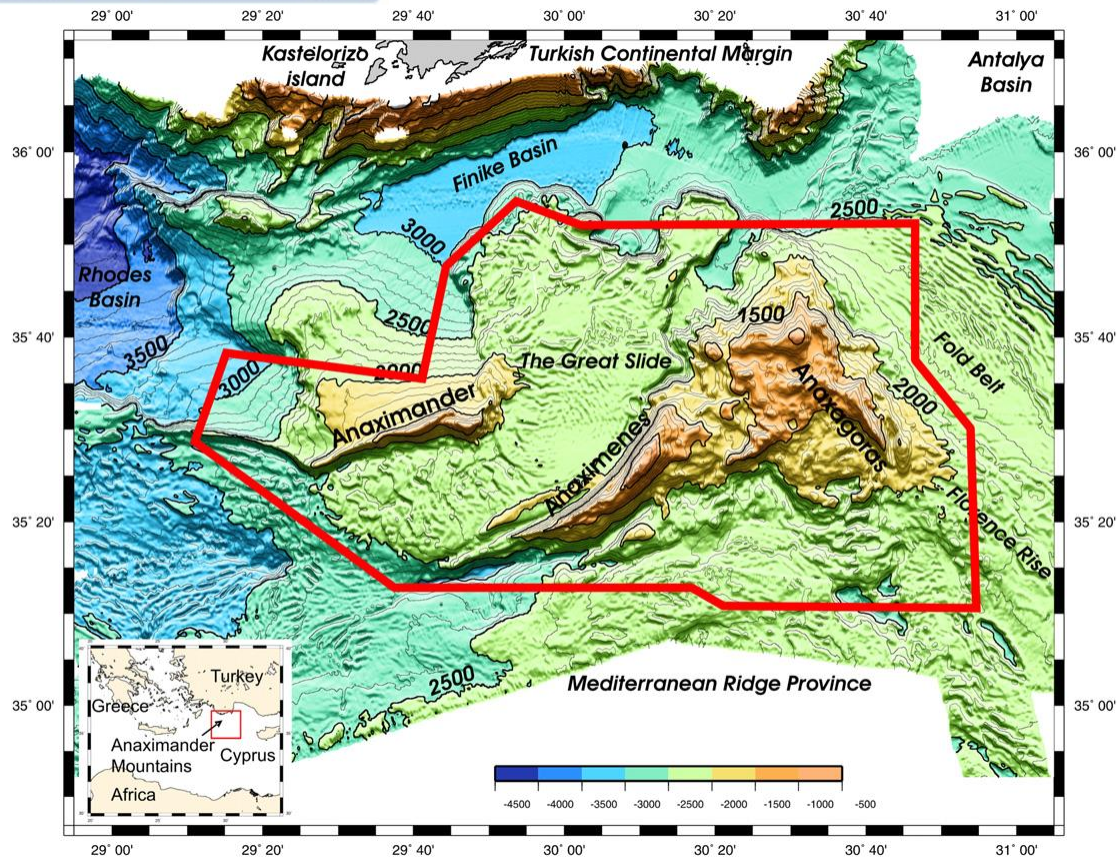
Υδρίτες μεθανίου στην Ελλάδα, τεκτονική εξέλιξη του Ελληνικού χώρου και γεωλογική κίνηση της Ν/Α. Μεσογείου

## 2.1 Ηφαίστεια λάσπης και υδρίτες μεθανίου στο σύμπλεγμα βουνών Αναξίμανδρος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο πρώτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας, τα ηφαίστεια λάσπης (MVs στην Αγγλική βιβλιογραφία), αποτελούν το πιο σημαντικό μονοπάτι για την εξαέρωση ιζημάτων τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα σε πολύ μεγάλα βάθη και εντοπίζονται κυρίως σε ζώνες υποβύθισης και ορογενετικές ζώνες, όπου κυριαρχούν οι συμπιεστικές τάσεις (Milkov, 2000; Korf, 2002). Πρόσφατες εκτιμήσεις ως προς την ποσότητα των ρευστών με μεθάνιο που απελευθερώνονται από τα υποθαλάσσια ηφαίστεια λάσπης σε μικρά βάθη, κυμαίνονται στα 0,42 με 0,96 Mt/yr, μέγεθος που αντιστοιχεί σχεδόν στο 10% των παγκόσμιων ρευστών CH<sub>4</sub> από τα θαλάσσια και ηπειρωτικά ηφαίστεια λάσπης. Μεγάλες ροές μεθανίου, συνδέονται τόσο με τα ηφαίστεια λάσπης όσο και με τους συνοδευτικούς ψυχρούς αεραγωγούς και διαρροές (Charlou et al., 2003). Το διαθέσιμο αέριο παρέχει ενέργεια για το βενθικό οικοσύστημα που συμπεριλαμβάνει και την χημειοσυνθετική συνύπαρξη της χλωρίδας. Επιπρόσθετα, στα περιβάλλοντα αυτά, σχηματίζονται ανθρακικά καλύμματα από αναερόβιες διεργασίες οξείδωσης του μεθανίου (Aloisi et al., 2002). Τα ηφαίστεια λάσπης, όπως έχει προαναφερθεί, είναι ευρέως διαδεδομένα στην ανατολική Μεσόγειο και φιλοξενούν πλήθος στερεών ποσοτήτων υδριτών με μεγάλο πιθανό οικονομικό ενδιαφέρον, ενώ παράλληλα μπορεί να είναι η αιτία εκτεταμένης φυσικής μόλυνσης στο μέλλον (Woodside et al., 1998). Η ηφαιστειότητα λάσπης συνδέεται με το Μεσογειακό τόξο όπου τα ρευστά, τα οποία βρίσκονται κάτω από μεγάλη πίεση στα ρήγματα αποκόλλησης, ανεβαίνουν προς την επιφάνεια διαμέσου των διαρρηγμένων ιζημάτων της τάφρου και φτάνουν στον πυθμένα. Οι αλμυρές λίμνες που εμφανίζονται κατά μήκος των ρηγμάτων, πολλές φορές φαίνεται να συνδέονται με τα ηφαίστεια λάσπης, καθώς στις περιοχές αυτές είναι τοποθετημένοι στον πυθμένα εβαπορίτες του Μεσσηνίου (Lykousis et al., 2008).

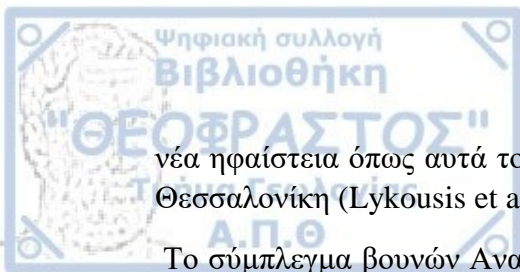
Η παρουσία των ηφαιστειών λάσπης μαζί με τον διαπυρισμό και τις κορεσμένες με ρευστά φλέβες, είναι από καιρό γνωστές σε διάφορες τοποθεσίες στην Ανατολική Μεσόγειο και στο Αιγαίο Πέλαγος. Εμφανίζονται όχι μόνο σε περιοχές με συσσωρευτικές πιέσεις σε ζώνες καταβύθισης, όπως στο Μεσογειακό τόξο, στο τόξο της Καραϊβικής ή σε ορογενετικές ζώνες, αλλά και σε παθητικά περιθώρια όπως αυτό στις ακτές της Αιγύπτου ή περιοχές με έντονη τεκτονική δραστηριότητα. Μια τέτοια περιοχή με έντονη τεκτονική δραστηριότητα είναι το σύμπλεγμα των βουνών Αναξίμανδρος στο οποίο η ηφαιστειότητα συνδέεται με κανονικά και ανάστροφα ρήγματα (Perissoratis et al., 2011). Ειδικά στο συσσωρευτικό πρίσμα του Ελληνικού τόξου εμφανίζεται πλήθος ηφαιστειών λάσπης το οποίο έχει ανακαλυφτεί από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 και έκτοτε τράβηξε τα βλέμματα των επιστημόνων. Αιτία για το γεγονός αυτό, αποτέλεσε και η ανακάλυψη των υδριτών μεθανίου (Perissoratis et al., 2011). Το σύμπλεγμα Αναξίμανδρος βρίσκεται ανάμεσα στο Ελληνικό και το Κυπριακό τόξο, σε μια περιοχή με ένα περίπλοκο - υπό εξέλιξη - σύστημα συμπίεσης το οποίο περιλαμβάνει στα δυτικά επιπέυσεις, στα βορειοανατολικά περιλαμβάνει διατμητικές παραμορφώσεις με κατεύθυνση δυτικά (ρήγμα του Strabo Trough), ενώ στα βορειοδυτικά εμφανίζει διατμητικές παραμορφώσεις με κατεύθυνση τα ανατολικά (ρήγμα της ανύψωσης της Φλωρεντίας). Τέλος, σε όλη την έκταση, εμφανίζονται κανονικά ρήγματα που σε συνδυασμό με τα προηγούμενα διαμορφώνουν την τωρινή

μορφή του συμπλέγματος (Perissoratis et al., 2011). Το σύμπλεγμα βουνών Αναξιμανδρος διαχωρίζεται σε τρεις βασικές περιοχές, τον Αναξιμανδρο, τον Αναξιμένη και τον Αναξαγόρα (Perissoratis et al., 2011).



12. Βαθυμετρικός χάρτης των κύριων μορφολογικών δομών στο σύμπλεγμα των ηφαιστειών λάσπης και του περιβάλλοντος υπόβαθρου, ο οποίος προέκυψε από τις πολυδεσμικές σαρώσεις από τον R/V L'Atalante (Woodside et al., 1997, 1998). Η περιοχή που περικλείεται μέσα στο κόκκινο περίγραμμα αναλύθηκε με μεγάλη ακρίβεια από την σάρωση του προγράμματος R/V AEGAEΟ κατά την μελέτη του συμπλέγματος Αναξιμανδρος. Οι ισοϋψείς αντιστοιχούν σε μεσοδιάστημα 100m (Lykousis et al., 2008).

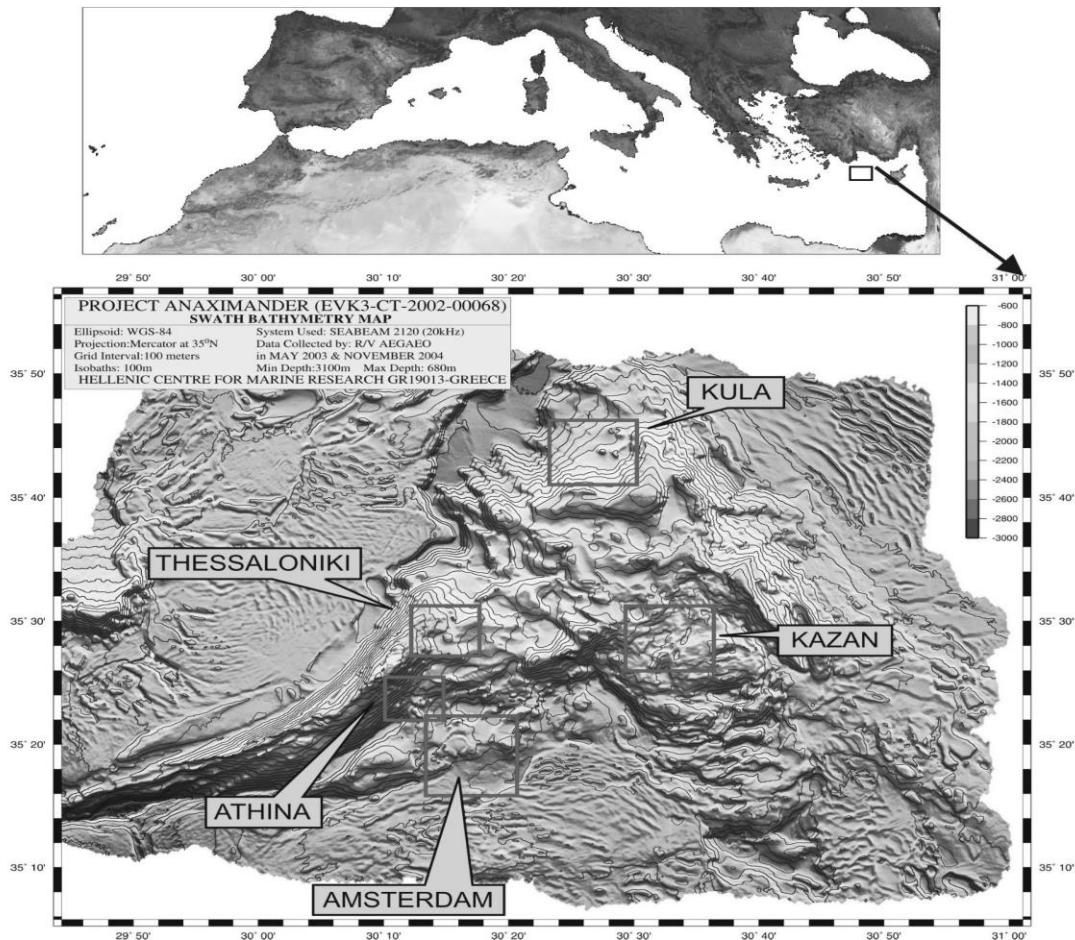
Η τοποθεσία του συμπλέγματος Αναξιμανδρος αδιαμφισβήτητα προσφέρεται για τον σχηματισμό ηφαιστειών λάσπης, χάρη στην παρουσία υπερπιεσμένων ρευστών και ρηγματών που βοηθούν τα ρευστά να αποδράσουν. Η περιοχή αρχικά μελετήθηκε το 1995 από το Ολλανδικό πρόγραμμα 'ANAXIPROBE', το οποίο περιελάμβανε πολυδεσμική παρατήρηση χάρη στην οποία τελικά αποκαλύφθηκαν το 1996 εφτά, μεγάλα σε μέγεθος, ηφαίστεια λάσπης παράλληλα με την πρώτη συλλογή δειγμάτων αερίων υδριτών από το ηφαίστριο λάσπης Κούλα. Το 2002 ανακαλύφθηκε ότι τα ηφαίστεια Άμστερνταμ και Καζάν περιέχουν υδρίτες. Ανάμεσα στο 2003 και στο 2005 η Ευρωπαϊκή Ένωση χρηματοδότησε το πρόγραμμα 'ANAXIMANDER' το οποίο είχε στόχο την μελέτη των ηφαιστειών αυτών και την σχέση που έχουν με τους υδρίτες, μαζί με την αποκάλυψη πληροφοριών για την ευρύτερη βιόσφαιρα της γύρω περιοχής. Ακολούθησε το πρόγραμμα 'HERMES' το 2005 με 2009. Κατά την διάρκεια αυτών των προγραμμάτων συλλέχτηκαν και μελετήθηκαν αέριοι υδρίτες από τα ηφαίστεια Άμστερνταμ και Καζάν ενώ παράλληλα ανακαλύφθηκαν και μελετήθηκαν και



νέα ηφαίστεια όπως αυτά του ηφαιστείου λάσπης Αθήνα και του ηφαιστείου λάσπης Θεσσαλονίκη (Lykousis et al., 2009; Heeschen et al., 2006; Perissoratis et al., 2006).

Το σύμπλεγμα βουνών Αναξίμανδρος αποτελείται από τα ηφαίστεια λάσπης Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Κούλα, Άμστερνταμ και Καζάν. Σε ολόκληρη την περιοχή που εμφανίζονται αυτά τα ηφαίστεια, εμφανίζεται ένα πολυφασικό περίπλοκο σύστημα παραμόρφωσης στην νεοτεκτονική ανάπτυξή του (Ten Veen et al., 2004). Μια κινηματική αλλαγή που έλαβε χώρα στο άνω Μειόκαινο, σχετίζεται με την έναρξη της δυτικόστροφης κίνησης της πλάκας της Ανατολίας, που σηματοδότησε την έναρξη των διεργασιών για τη δημιουργία των ηφαιστείων λάσπης στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος (Ten Veen et al., 2004). Αυτές οι μετά-Μειοκαινικές οριζόντιες και κάθετες κινήσεις οφείλονται τόσο στη νοτιοανατολική ρηγμάτωση όσο και στη σύγκρουση μεταξύ της Αφρικανικής πλάκας με αυτήν της Ανατολίας κατά μήκος του υψώματος την Φλωρεντίας (Woodside et al., 2002). Η παραμόρφωση κατά το Πλειόκαινο με Τεταρτογενές, δημιούργησε εφελκυστικές τάσεις στη δυτική πλευρά του συμπλέγματος Αναξίμανδρος, αλλά και εφελκυστικό τεκτονισμό στην ανατολική πλευρά του συμπλέγματος Αναξίμανδρος. Η σημερινή μορφή των βουνών αυτών, αντικατοπτρίζεται στην παρουσία κυρίων ρηγμάτων, αλλά είναι σαφές ότι η νεοτεκτονική δομή είναι αποτέλεσμα της σύγκλησης των τεκτονικών πλακών (Woodside, 1996). Έτσι, η περιοχή αυτή, φαίνεται ότι έχει επηρεαστεί από ένα σύμπλεγμα περίπλοκων επικαλυπτόμενων ρηγμάτων, το οποίο υποδεικνύει την παρέμβαση μιας μεγάλης απότομης ζώνης η οποία δικαιολογεί την ύπαρξη της εξαιτίας της κίνησης μεταξύ της Αφρικανικής και την Ευρασιατικής πλάκας (Lykousis et al., 2008).





13.Χάρτης με τις τοποθεσίες των ηφαιστειών λάσπης Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Κούλα, Καζάν και Άμστερνταμ στην περιοχή της Ν/Α Μεσογείου (Casas et al., 2006).

## 2.2 Παλαιότερες και πρόσφατες έρευνες στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος.

Τα ηφαίστεια λάσπης στο σύμπλεγμα βουνών Αναξίμανδρος, ανακαλύφθηκαν τυχαία το 1995 κατά τη διάρκεια λεπτομερούς βαθυμετρικής σάρωσης με ακτίνες με την βοήθεια του συστήματος Simrad EM-12 το οποίο τοποθετήθηκε στο Γαλλικό ερευνητικό σκάφος L'Atalante στο πλαίσιο του Ολλανδικού προγράμματος 'ANAXIPROBE'. Η περιοχή μελέτης οριοθετήθηκε στο περιβάλλον του συμπλέγματος Αναξίμανδρος, το οποίο οριοθετείται από το Τουρκικό ηπειρωτικό περιθώριο και το Finike υπόβαθρο στο βορρά, το Μεσογειακό τόξο μαζί με την έξαρση Florene στα νότια, το ανατολικό τμήμα του υπόβαθρου της Ρόδου στα δυτικά και το ανατολικό κομμάτι του υπόβαθρου της Αντάλιας στα ανατολικά. Η περιοχή διαιρείται σε τρία εμφανή κομμάτια. Τα υποθαλάσσια βουνά Αναξίμανδρος (Anaximander Sea Mounts) εμφανίζονται με ένα ασυμμετρικό απότομο ύψος με επιμηκυμένη κορυφή σε ρηχό βάθος κοντά στα 1250 m κατά μήκος του νοτίου περιθωρίου. Τα υποθαλάσσια βουνά Αναξιμένης (Anaximenes SM) εμφανίζουν μια σχετικά βορειοδυτική κοίλη μορφή, ενώ παράλληλα καταλαμβάνουν και την μικρότερη περιοχή σε έκταση παρά το γεγονός ότι εμφανίζουν το μεγαλύτερο υψόμετρο μέχρι 680 m. Τα υποθαλάσσια βουνά Αναξαγόρας (Anaxagoras SM) χαρακτηρίζονται από μια επίπεδη επιφάνεια στο βόρειο κεντρικό κομμάτι της περιοχής σε μικρά βάθη κοντά στα 930 m (Lykousis et al., 2008).

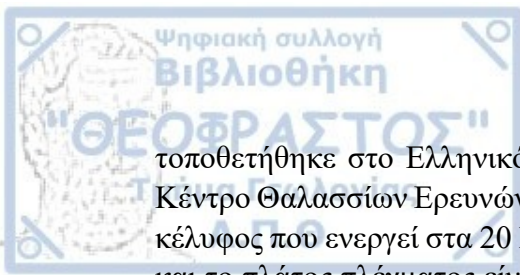


Ανάμεσα στα βουνά Αναξαγόρας και Αναξιμένης εμφανίζεται μια εκτεταμένη πολυ-πυρηνική έκταση περίπου 2200 Km<sup>2</sup> όπου στο βόρειο με νοτιοδυτικό τμήμα, ροές θραυσμάτων σχηματίζουν τη λεγόμενη Μεγάλη Πλαγιά («the Great Slide») η οποία είναι ευδιάκριτη στην περιοχή (Woodside et al., 1998; Ten Veen et al., 2004).

Το 1996, η συνδυασμένη ερευνητική αποστολή του προγράμματος ANAXOPROBE σε συνδυασμό με το πρόγραμμα έρευνας TTR-6 (Train Through Research Program), το οποίο βρισκόταν στο Ρωσικό ερευνητικό σκάφος R/V Gelendzhik, χρησιμοποίησαν το βαθυμετρικό σόναρ σάρωσης περιοχής MAK-1, για να δημιουργήσουν το προφίλ του θαλάσσιου πυθμένα και να κάνουν βυθοκόρηση και δειγματοληψία στην περιοχή. Ο στόχος ήταν η επιβεβαίωση της ύπαρξης των ηφαιστειών λάσπης και η συλλογή δειγμάτων των πρώτων αέριων υδριτών στην Μεσόγειο από το ηφαίστειο λάσπης Κούλα (Woodside et al., 1997, 1998). Επιπλέον, το 1998, το Ολλανδο-Γαλλικό πρόγραμμα MEDINAUT, χρησιμοποιώντας το υποβρύχιο Ναυτίλος το οποίο αναπτύχθηκε από το Γαλλικό ερευνητικό πλοίο Nadir, διενήργησε μια εξονυχιστική εξέταση και σύλλεξε δείγματα από τον πυθμένα (Lykousis et al., 2008). Την επόμενη χρονιά το 1999, το Ολλανδο-Γαλλικό ερευνητικό πρόγραμμα MEDINETH και το Ολλανδικό πρόγραμμα SMILABLE με τη συμμετοχή του Ρωσικού ερευνητικού σκάφους Professor Logachev, ερεύνησε την ηφαιστειότητα λάσπης με υψηλής ανάλυσης σάρωσης σόναρ (O.R.E. Tech) στις συγκεντρώσεις ιζημάτων και διενήργησε συγκεκριμένες μετρήσεις στην περιεκτικότητα μεθανίου σε στήλες νερού πάνω από ηφαίστεια λάσπης. Εξετάστηκε πλήθος δομών με τη μορφή βουνών, το οποίο αποκαλύφθηκε κατά την σάρωση και την χαρτογράφηση της περιοχής με το Simrad EM-12D, όμως μόλις λίγες από τις δομές αυτές ταυτοποιήθηκαν ως ηφαίστεια λάσπης κατά το πρόγραμμα αυτό, όπως τα ηφαίστεια λάσπης Άμστερνταμ, Κούλα, Καζάν, Τουζλουκούς, Σαν Ρέμο και άλλα (Woodside et al., 1998). Δύο από τα ηφαίστεια αυτά, το Άμστερνταμ και το Κούλα, αποδείχτηκε ότι περιέχουν στη δομή τους υδρίτες, με τα πρώτα δείγματα να έχουν συλλεχθεί από το ηφαίστειο Κούλα το 1996 και να έχουν επιβεβαιωθεί με νέα συλλογή δειγμάτων αέριων υδριτών, το 1999 και στα δύο ηφαίστεια (Lykousis et al., 2008).

Το Μάιο του 2003 και τον Οκτώβρη-Νοέμβρη του 2004 πραγματοποιήθηκε το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα ANAXIMANDER σε δύο αποστολές στην περιοχή των υποθαλάσσιων ηφαιστειών λάσπης Αναξίμανδρος. Η πρώτη αποστολή, το Μάιο του 2003, προσέφερε εκτεταμένη τμηματική βαθυμετρική οπισθοσκέδαση επιφάνειας στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα του συμπλέγματος Αναξίμανδρος, εστιάζοντας ιδιαίτερα σε περιοχές όπου παλαιότερα είχε ανακαλυφθεί ηφαιστειότητα λάσπης, δηλαδή στα ηφαίστεια Καζάν, Κούλα και Άμστερνταμ (Lykousis et al., 2003). Στις περιοχές αυτές πραγματοποιήθηκαν εστιασμένες σεισμικές μετρήσεις και δειγματοληψίες ιζημάτων, με στόχο να αξιολογηθούν καλύτερα οι ενεργές περιοχές με παρουσία υδριτών. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης αποστολής, η οποία πραγματοποιήθηκε 27 Οκτωβρίου με 12 Νοεμβρίου του 2004, συμπληρώθηκε ο χάρτης της χαρτογράφησης της ανατολικής πλευράς του συμπλέγματος Αναξίμανδρος, έγιναν δειγματοληψίες σε περιοχές υποψήφιας για την ύπαρξη υδριτών, αλλά ερευνήθηκαν και περιοχές με πιθανή παρουσία ηφαιστειών λάσπης (Lykousis et al., 2008).

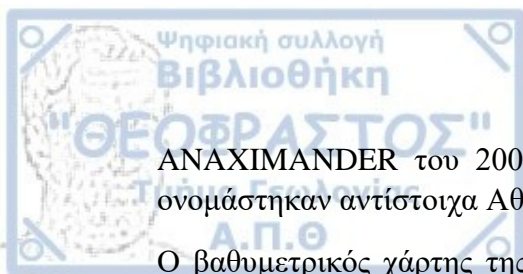
Η βαθυμετρική οπισθοσκέδαση επιφάνειας στον πυθμένα του συμπλέγματος, πραγματοποιήθηκε με την χρήση του συστήματος SEABEAM 2120, το οποίο



τοποθετήθηκε στο Ελληνικό ερευνητικό σκάφος ΑΙΓΑΙΟ, που ανήκε στο Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών. Το σύστημα SEABEAM 2120 είναι ένα τηλεχειριζόμενο κέλυφος που ενεργεί στα 20 kHz σε θαλάσσια βάθη τα οποία δεν ξεπερνούν τα 6000m, και το πλάτος πλέγματος είναι μεταξύ 7,5 με 1,15 φορές το βάθος του νερού για βάθη 1000-5000 m αντίστοιχα. Διαθέτει ένα γωνιακό τομέα κάλυψης 155° με 149 ακτίνες διαμέτρου 1.8° \* 1.8° με απόσταση 1° καθώς δίνει και 50% αλληλοεπικάλυψη. Μια συνολική περιοχή της τάξεως των 3000 Km<sup>2</sup> σαρώθηκε κατά την διάρκεια των δύο αποστολών, με ένα σκάφος το οποίο διέθετε μέση ταχύτητα 10 κόμβων. Λαμβάνοντας υπόψιν τις βαθυμετρικές διακυμάνσεις του πυθμένα, εκτιμάται ότι σαρώθηκε μια έκταση της τάξεως των 7500 Km<sup>2</sup>. Με σκοπό να διασφαλιστεί η καλύτερη μορφολογική απεικόνιση και χαρτογράφηση των ηφαιστειών λάσπης και να αποτυπωθεί με καλύτερη λεπτομέρεια, για τον βαθυμετρικό χάρτη ορισμένων περιοχών, πραγματοποιήθηκε μια επιπλέον σάρωση στην ταχύτητα των 5 κόμβων ταυτόχρονα με την χαρτογράφηση υψηλής ανάλυσης σεισμικής ανάκλασης (Lykousis et al., 2008).

Το μέσο για την δημιουργία προφίλ με υψηλής ανάλυσης σεισμικών κυμάτων που χρησιμοποιήθηκε για την πρώτη αποστολή, ήταν το 10 in<sup>3</sup> αεροβόλο [airgun] με ονομασία PAR BOLT US με κυρίαρχη συχνότητα των 300-400 Hz. Διέθετε ρυθμό πυροδότησης ανά 2 δευτερολέπτων διακοπής και έναν δέκτη με ένα κανάλι εκπομπής το οποίο ήταν ρυμουλκούμενο στα 50 m με αναλογικό καταγραφέα. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης αποστολής, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σύστημα με ένα 40 in<sup>3</sup> αεροβόλο [airgun] ανά 4 δευτερόλεπτα με ψηφιακή καταγραφή δεδομένων χρησιμοποιώντας το σύστημα Delph (Triton Ellics). Τα σεισμικά δεδομένα φιλτραριζόνταν από φίλτρο 50-600 Hz μέσω ενός αναλογικού φίλτρου Krohn-Hite και στην συνέχεια επεξεργάζονταν περαιτέρω με τη βοήθεια του συστήματος Delph (Triton Ellics). Και στις δύο αποστολές συλλέχθηκαν στο σύνολο 64 ιζηματογενείς πυρήνες βαρύτητας και 17 πυρήνες καρότων από την περιοχή έρευνας. Η επιλογή των πυρηνοληπιών έγινε με βάση την ένταση του χάρτη της οπισθοσκέδασης επιφάνειας (Lykousis et al., 2008).

Η πρώτη εκτεταμένη βαθυμετρική απεικόνιση οπισθοσκέδασης του πυθμένα της περιοχής ενδιαφέροντος, πραγματοποιήθηκε το 1995 με τη συλλογή δεδομένων από το σύστημα Simrad EM-12D, το οποίο προσέφερε μια πολύ πιο αναλυτική μορφολογία της περιοχής αυτής. Ακόμα, για πρώτη φορά κατέστησε δυνατή την ικανότητα να προσδιοριστεί η κατανομή των ιζηματογενών μαλακών υλικών και του εκτεθειμένου πετρώματος του υπόβαθρου στο θαλάσσιο πυθμένα (Woodside, 1996). Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις βαθυμετρικές μετρήσεις και τις μετρήσεις οπισθοσκέδασης, διέθεταν μεγαλύτερη ανάλυση και όχι μόνο έδωσαν μια πιο λεπτομερή απεικόνιση της θαλάσσιας μορφολογίας του πυθμένα, αλλά παράλληλα βοήθησαν στην επανερμίνευση και επαλήθευση των παλαιότερων δεδομένων που είχαν συλλεχθεί. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να ανακαλυφτούν νέες άγνωστες στους ερευνητές μορφές με σχήμα βουνών, χωρίς απαραίτητα πολύ μεγάλη πυκνότητα στην βαθυμετρική χαρτογράφηση και οπισθοσκέδαση της περιοχής. Οι περιοχές αυτές που αποκαλύφθηκαν από τη σάρωση, αποτέλεσαν στόχο για μελλοντικές ερευνητικές αποστολές. Δύο τέτοιες περιοχές οι οποίες αναγνωρίστηκαν αρχικά από το SEABEAM 2120 και στη συνέχεια επιβεβαιώθηκαν από δειγματοληψίες στο πρόγραμμα



ANAXIMANDER του 2003 και 2004 επιβεβαιώθηκαν ως ηφαίστεια λάσπης και ονομάστηκαν αντίστοιχα Αθήνα και Θεσσαλονίκη (Lykousis et al., 2004, 2008).

Ο βαθυμετρικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής δημιουργήθηκε με ένα πλέγμα με υψομετρικές καμπύλες των 100m, ενώ οι περιοχές των ηφαιστειών λάσπης με ένα πλέγμα υψομετρικών καμπυλών των 50 m και των 20 m, ανάλογα με τη ζητούμενη ανάλυση. Στο κεντρικό κομμάτι της περιοχής μελέτης, στο σύμπλεγμα Αναξιμένης, εμφανίζεται μια τάση νοτιοδυτικής προς βορειοανατολικής μορφολογικής επιμήκυνσης, με καμπυλότητα στις δομές των βουνών. Παρουσιάζεται μια έντονη μορφολογία, μεγαλύτερη των 1300m, με απόκρημνες πτέρυγες και προς τα βορειοδυτικά αλλά και προς τα νοτιοανατολικά. Αντίθετα, στο σύμπλεγμα Αναξαγόρας, στα ανατολικά εμφανίζεται μια ορθογώνια μορφή με κάτοψη έκτασης 30 Km σε πλάτος και 55 Km σε μήκος, τοποθετημένη βόρεια – βορειοδυτικά με νότια – νοτιοανατολικά, με γενικότερη κατωφέρεια μικρότερη των 1000m και μια σχετικά έντονη ανώμαλη τοπογραφία. Οι Woodside et al. (2000) και Zitter et al. (2003), αναφέρουν ότι το βουνό είναι ένα υπερυψωμένο τμήμα της έξαρσης της Φλωρεντίας που χαρακτηρίζεται από βορειοδυτικά – νοτιοανατολικά και βορειοανατολικά – νοτιοδυτικά ρήγματα μετατόπισης. Το υποθαλάσσιο βουνό Αναξαγόρας παρουσιάζει τρεις βασικές μορφολογικές δομές, οι οποίες εντοπίζονται στο βορρά, στο νότο και στο νοτιοανατολικό κομμάτι. Η βόρεια μεγάλη δομή αποτελεί μια αψιδόμορφη ράχη, η οποία εκτείνεται προς την επιφάνεια σε βάθος μικρότερο των 1000m με υψίπεδα στα ρηγά τμήματά του. Το ηφαίστειο λάσπης Κούλα (Kula MV) έχει σχηματιστεί σε ένα μικρό υψίπεδο ανάμεσα στην βόρεια πτέρυγα της ράχης (Woodside et al., 1997). Κατηφορικές κινήσεις κατά μήκος της πλαγιάς στο βορειοδυτικό τμήμα της ράχης προδίδονται από τις καταρρεύσεις και τα στενά διαβρωμένα κανάλια τα οποία τερματίζουν βορειοδυτικά με ένα βαθύ σχετικά επίπεδο κοίλωμα. Η νότια δομή εμφανίζεται ως ένα επιμηκυμένο νοτιοδυτικό – βορειοανατολικό τόξο με ήπιες πλαγιές που αναφέρεται από τον Zitter et al. (2006) ως ένα ρηγματωμένο τόξο. Βρίσκεται τοποθετημένο κατά μήκος της κύριας ζώνης ρηγμάτων, η οποία τέμνει το νότιο κομμάτι της περιοχής Αναξαγόρας και τερματίζει στην ανατολική πλευρά αφού διασχίσει την ανατολική ράχη. Στο ανατολικό κομμάτι του Αναξαγόρα επιπρόσθετα εντοπίζονται τα ηφαίστεια λάσπης Καζάν (Kazan), Τουζλουκούζ (Tuzlukush) και Saint Ouen L' Aumone (Ten Veen et al., 2004). Το ηφαίστειο λάσπης Καζάν διασχίζεται από τουλάχιστον 6 ρήγματα προσανατολισμού που δείχνουν μια περίπλοκη διάβρωση στο σημείο διασταύρωσης της ζώνης των ρηγμάτων μετατόπισης (Lykousis et al., 2008).

Στα βορειοδυτικά του Αναξαγόρα και βόρεια του Αναξιμένη σχηματίζεται μια ελικοειδής γραμμική ύφεση. Ξεκινά από το απότομο βορειοδυτικό τμήμα του Αναξιμένη με πλάτος 300m και ακολουθεί μια ελικοειδή βορειοανατολική πορεία φαρδαινώντας κατά μήκος της διαδρομής αυτής μέχρι και 10Km, ενώ εκτονώνεται βόρεια ανάμεσα στη λεκάνη της Αντάλιας και της Φοινίκης. Αυτή η ύφεση ξεχωρίζει τις μεγάλες ροές κορημάτων που είναι γνωστές ως 'Great Slide' από το σύμπλεγμα του Αναξιμένη και του Αναξαγόρα (Woodside et al., 1998). Θεωρείται ότι στην περιοχή αυτή έχει λάβει χώρα μια επιμήκυνση, και αυτή η ελικοειδής μορφή είναι εν μέρει αποτέλεσμα των διατμήσεων των ρηγμάτων, παρόμοια με τα ρήγματα που εμφανίζονται να διαχωρίζουν τις περιοχές Αναξαγόρας και Αναξιμένης (Ten Veen et al., 2004). Ένα σύστημα βαθιών φαραγγιών και πλαγιών, πιθανώς δημιουργήθηκε από

μεγάλες αστοχίες και καταρρεύσεις προερχόμενες τους βορειοδυτικούς λόφους του Αναξαγόρα και εντοπίζεται στα ανατολικά του καναλιού σε απόσταση περίπου 30 Km (Lykousis et al., 2008).

Η άκρη του Μεσογειακού τόξου μπορεί να εντοπιστεί στα ανατολικά του συμπλέγματος Αναξιμένης και Αναξαγόρα, σε μια μορφή σχετικά επίπεδη, ελαφρώς κυματοειδούς περιοχής, που κείται σε βάθος 2800m. Εμφανίζεται εμφανώς διαχωρισμένη από το δυτικό όριο του συμπλέγματος Αναξιμένης από ένα βαθύ κοίλωμα το οποίο είναι τοποθετημένο κατά μήκος της βορειοανατολικής ζώνης ρηγμάτων μετατόπισης (Lykousis et al., 2008). Το ηφαίστειο λάσπης Άμστερνταμ βρίσκεται στην εγγύς περιοχή αυτής της ζώνης (Ten Veen et al., 2004). Επιπρόσθετα, στα βόρεια της βάσης των ανατολικών πλαγιών του συμπλέγματος Αναξιμανδρος σε μικρή απόσταση, μια βορειοανατολική – νοτιοδυτική χαρακτηριστική περιοχή ανακαλύφθηκε πιο πρόσφατα στην οποία βρίσκονται τοποθετημένα τα ηφαίστεια λάσπης Αθήνα και Θεσσαλονίκη (Lykousis et al., 2008).

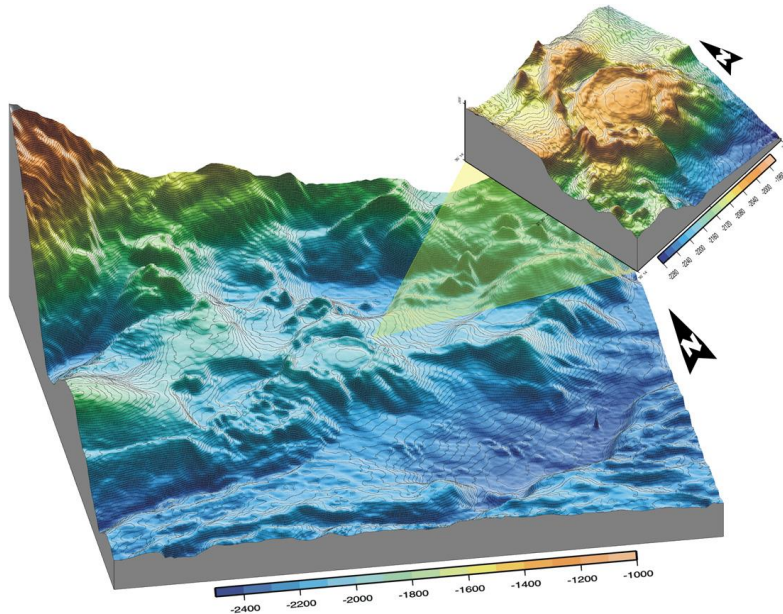
Κατά την διάρκεια του προγράμματος ANAXIMANDER, η γενικότερη υποθαλάσσια πυκνή οπισθοσκέδαση του πυθμένα στο σύνολο του συμπλέγματος Αναξιμανδρος, αποκάλυψε μια σειρά από κυκλικές, ημικυκλικές, γραμμικές ή καμπύλες δομές. Οι κυκλικές δομές με έντονη αντίδραση στην οπισθοσκέδαση αποδείχτηκε ότι ήταν είτε ήδη γνωστά ηφαίστεια λάσπης όπως το Άμστερνταμ και το Καζάν, ηφαίστεια λάσπης που ανακαλύφθηκαν κατά την διάρκεια της αποστολής R/V Aegaeo, όπως η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη, είτε πιθανές τοποθεσίες ύπαρξης ηφαιστειών λάσπης οι οποίες ακόμα δεν έχουν επιβεβαιωθεί με πραγματοποίηση δειγματοληψίας. Κυκλικές δομές με αρκετά μεγάλη οπισθοσκέδαση, παρουσιάζοντας ωστόσο έναν απαλό θόλο στον πυθμένα, χωρίζονται σε δύο κύριες περιοχές. Η μία βρίσκεται στα βόρεια και απαρτίζεται από τα ηφαίστεια λάσπης Κούλα και Σαν Ρέμο ενώ η άλλη βρίσκεται στην γύρω περιοχή του ηφαιστείου Άμστερνταμ. Στην περιοχή αυτή υπάρχει πλήθος μικρών δόμων που ξεχωρίζουν από το γύρω περιβάλλον αλλά δεν παρουσιάζουν όλες από αυτές τις δομές κατάλληλα ακουστικά σήματα. Η ευρύτερη περιοχή των βουνών Αναξιμανδρος, φαίνεται να παρουσιάζει πολυχρωμία στην οπισθοσκέδαση που οφείλεται σε ροές κορημάτων οι οποίες συσχετίζονται με καταρρεύσεις. Γραμμικές ή καμπυλόγραμμες δομές με ενδιάμεση παρουσία οπισθοσκέδασης αναγνωρίζονται κατά μήκος όλης της έκτασης της σάρωσης και συνδέονται με την παρουσία βαράθρων από ρήγματα που είναι εκτεθειμένα στην επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα και αποτελούν έτσι αποτέλεσμα πρόσφατης ή και σε εξέλιξη τεκτονικής δραστηριότητας (Lykousis et al., 2008). Επιπρόσθετα, η ανάλυση της υψής που προέκυψε από τις εικόνες της οπισθοσκέδασης του θαλάσσιου πυθμένα, βασιζόμενη σε γκρι κλίμακα προυπάρχουσας συμβολής πίνακα (GLCM), με την προερχόμενη από μετρήσεις προέλευση της υψής και με την χρήση ακολουθίας ταξινόμησης, εφαρμόστηκε στην περιοχή γύρω από πολλά ηφαίστεια λάσπης προκειμένου να επιτευχθεί μια ποιοτική διαφοροποίηση και ταξινόμηση του καλύμματος του πυθμένα (Alexandri, 2007).

### 2.3 Ηφαίστειο Λάσπης Άμστερνταμ

Το ηφαίστειο λάσπης Άμστερνταμ αποτελεί το πιο διακεκριμένο ηφαίστειο στο σύμπλεγμα υποθαλάσσιων ηφαιστειών Αναξιμανδρος και βρίσκεται τοποθετημένο στη νότια πτέρυγα του συμπλέγματος Αναξιμένης. Το βουνό παρουσιάζει μια επίπεδη



κορυφή και ένα κυκλικό σχήμα, η οποία επεκτείνεται σε μια περιοχή 6 km<sup>2</sup> και σε βάθος που φτάνει τα 2025 m. Στην περιφέρεια του βουνού, σχηματίζεται μια δακτυλιοειδής σε σχήμα υποθαλάσσια ύφεση, η οποία δημιουργεί μια σχετικά βαθιά τάφρο (50m) προς τα βόρεια. Η λεπτομερής μορφολογική ανάλυση στο ηφαιστειο λάσπης Άμστερνταμ εμφάνισε δύο έντονους κρατήρες, έναν εξωτερικό και έναν εσωτερικό, οι οποίοι συγχωνεύονται προς τα νοτιοανατολικά. Οι κρατήρες είναι και οι δύο ημικυκλικής μορφής, με διαστάσεις 6 X 5 Km και 4 X 3,3 Km, εμφανίζοντας μια ελαφριά επιμήκυνση προς βορρά - νότο. Ένα κοινό χαρακτηριστικό που διαθέτουν οι δύο κρατήρες είναι ότι κατά κύριο λόγο στο νότιο κομμάτι είναι ανοιχτοί και συνδέονται απευθείας μέσω ενός καναλιού πλάτους 400m, το οποίο επεκτείνεται σε βάθος 2250m. Το εσωτερικό μέρος του εσωτερικού κρατήρα εμφανίζει κλίση μικρότερη των 40m (Lykousis et al., 2008).



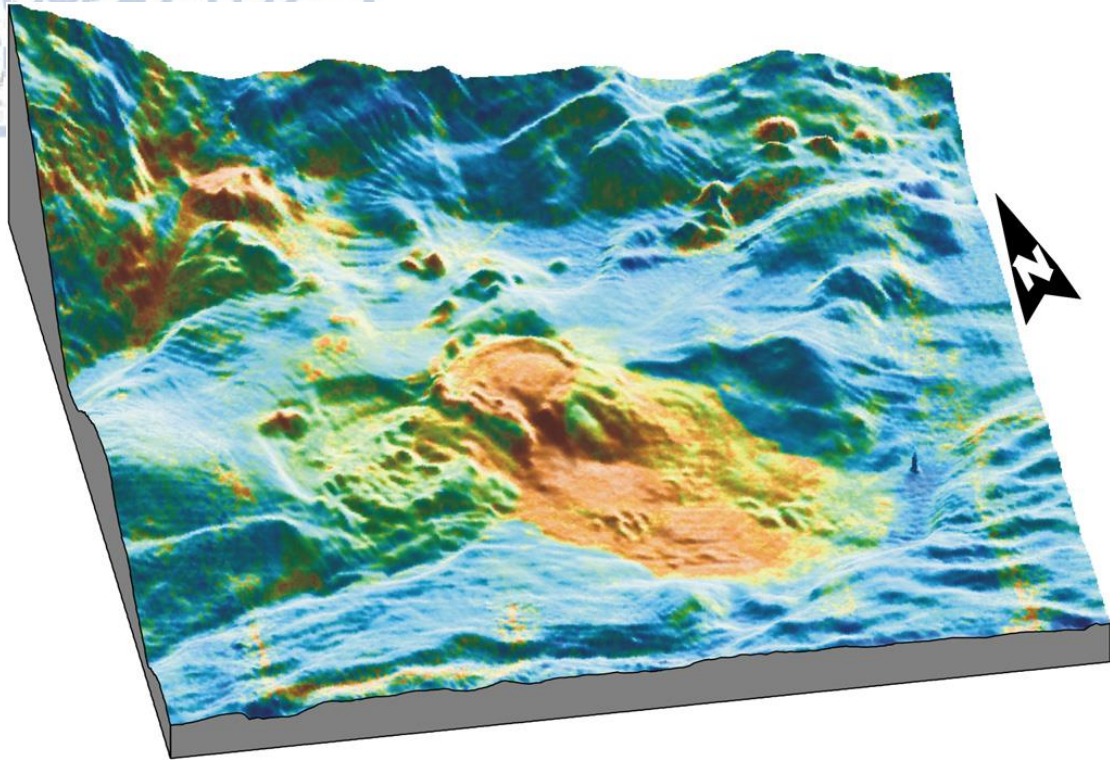
14. Τοπογραφικός χάρτης και χάρτης 3-D του ηφαιστείου Άμστερνταμ με τοπογραφικές λεπτομέρειες, το ηφαιστειο λάσπης και δομές κατάρρευσης στα δυτικά – νοτιοδυτικά του ηφαιστείου (Lykousis et al., 2008).

Ο εκτεταμένος χάρτης οπισθοσκέδασης του ηφαιστείου Άμστερνταμ, δείχνει υψηλότερη συγκέντρωση που σχετίζεται με το κεντρικό ενεργό μέρος του ηφαιστείου και με την παρουσία εκτεταμένων ροών λατυποπαγών. Οι κύριες ροές, απλώνονται προς τα νότια σε μια απόσταση μεγαλύτερη των 7 Km, σε βάθος 2400m και σε μια έκταση κοντά στα 20 Km<sup>2</sup>. Είναι εμφανές ότι τα λατυποπαγή λάσπης, διοχετεύτηκαν στο περιβάλλον από το ηφαιστειο Άμστερνταμ σχηματίζοντας τις σχετικά πρόσφατες βαρυτικές ροές, οι οποίες εμφανίζουν μια κατηφορική κίνηση κινούμενες διαμέσου ενός είδους φαραγγιού στο νότιο όριο του ηφαιστείου. Μια περιοχή με σχετικά χαμηλότερη οπισθοσκέδαση στο βόρειο τμήμα αυτών των ροών λάσπης, χαρακτηρίστηκε ως μεγαλύτερης ηλικίας ροές λάσπης λατυποπαγών. Η περιοχή αυτή εμφανίζεται καλυμμένη κάτω από ένα λεπτό ημιπελαγικό στρώμα ιζημάτων, τα οποία είναι αποτέλεσμα παλαιότερων εκρήξεων του εξωτερικού κρατήρα, μεγαλύτερης ηλικίας (Lykousis et al., 2008).



Δυτικά του ηφαιστείου λάσπης Άμστερνταμ, στο όριο της βορειοανατολικής – νοτιοδυτικής πλαγιάς, αποκαλύφθηκε ένα αμυδρό οικοδόμημα με αξιοπρόσεχτο, μικρής κλίμακας, τραχύ πυθμένα και ημικυκλικά κοιλώματα. Εμφανίζεται ως μια δίδυμη μορφή του ηφαιστείου Άμστερνταμ, όμως οι εσωτερικοί τοίχοι του φαίνεται να είναι ελλειψοειδείς και πιο περίπλοκοι, εμφανίζοντας μια κατάρρευση που οφείλεται πιθανώς στην τοπογραφία του. Παρόμοιες καταρρεύσεις με την μορφή ουλών στην τοπογραφία εμφανίζονται σε θαλάσσια ηφαιστειακά λάσπης στον Κόλπο του Καντίζ, που επίσης χαρακτηρίζονται από καταρρεύσεις. Εναλλακτικά, πιθανώς ολόκληρη η δομή να υποδεικνύει την παρουσία ενός παλαιότερου ηφαιστείου λάσπης, το οποίο κατέρρευσε κατά τη διάρκεια κάποιας παλαιότερης έκρηξης. Αργότερα, τα πελαγικά ιζήματα θα το είχαν καλύψει μαζί με τις αποθέσεις των κατακρημνισμάτων. Παρόλα αυτά, η λεπτομερής τρισδιάστατη ανάλυση της οπισθοσκέδασης, με τη βοήθεια της βαθυμετρίας, δίνει την εντύπωση ότι το τραχύ τμήμα αυτής της δομής έχει αποκοπεί από τα ανώτερα τμήματα της πλαγιάς, περίπου 30 m σε έκταση, και έχει συρθεί νότια δημιουργώντας παράλληλα ένα ημι-σεληνιακού σχήματος μέτωπο με κλίση. Η παρουσία των κύριων ρηγμάτων, που παρουσιάζουν κατεύθυνση βορειοανατολική – νοτιοδυτική, υποδεικνύει ότι η πλαγιά πιθανώς παρουσιάζει μια αστάθεια στην περιοχή αυτή. Στα κάτω επίπεδα της πλαγιάς, οι κινήσεις των ιζημάτων πιθανώς επηρεάζουν το ρυθμό της ηφαιστειότητας λάσπης και τις εκρήξεις, με αποτέλεσμα τα επεισόδια των εκρήξεων να είναι αρκετά μεγάλα ώστε να διαπεράσουν τα υπερκείμενα ιζήματα (Lykousis et al., 2008).

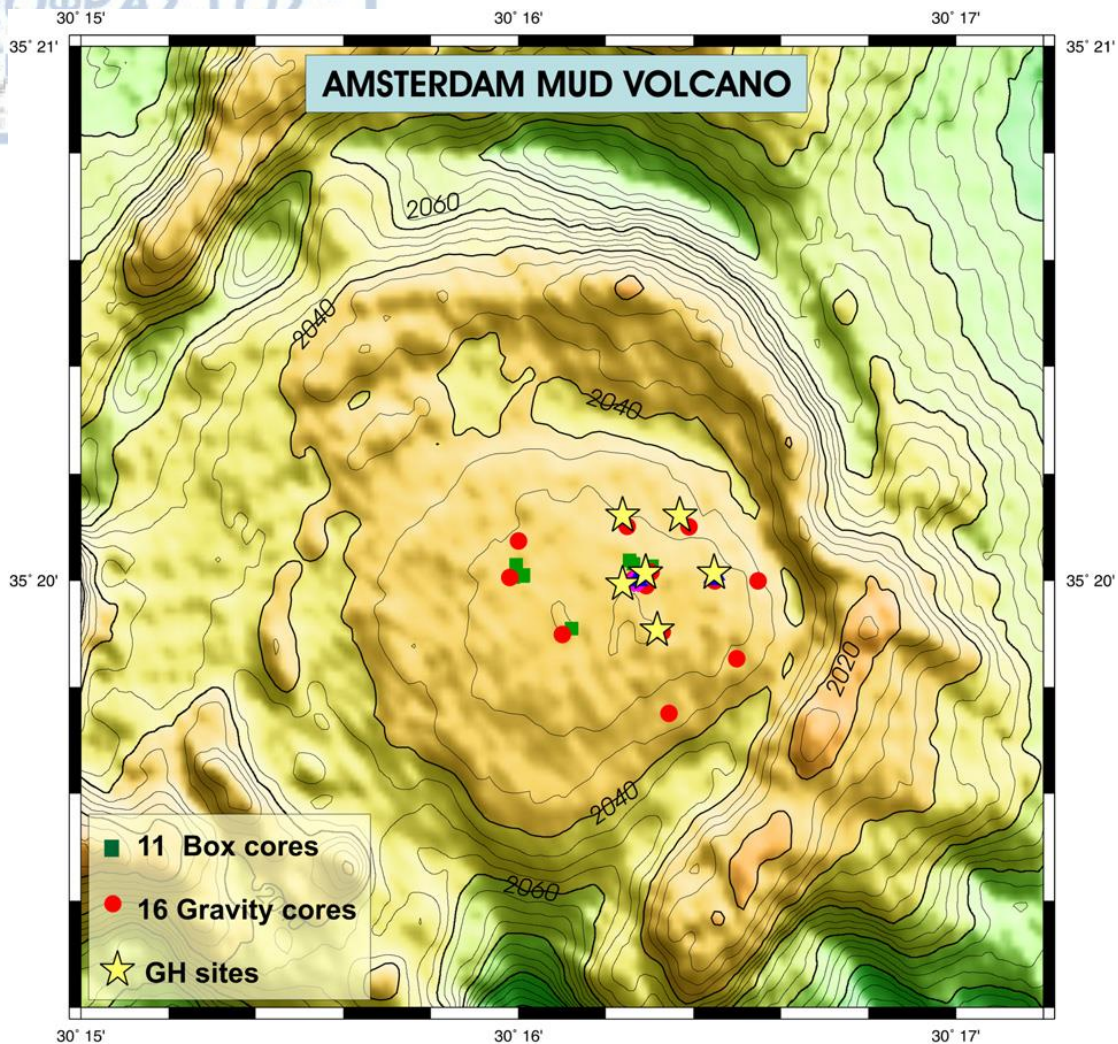
Μια σειρά από 27 κιβώτια με πυρήνες ιζημάτων συλλέχτηκαν στην ευρύτερη περιοχή του ηφαιστείου λάσπης Άμστερνταμ. Οι περισσότεροι από τους πυρήνες ιζημάτων (24), ανακτήθηκαν από την κεντρική δομή του βουνού η οποία φαίνεται να έχει και την πιο πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Όλοι οι πυρήνες παρουσιάζουν ένα τυπικό γκρι με ελαιογκρί χρώμα λατυποπαγών λάσπης χωρίς ενδείξεις πελαγικών ιζημάτων, που αποδεικνύει και την πρόσφατη δραστηριότητα του ηφαιστείου. Τα λατυποπαγή λάσπης είναι πλούσια σε λάσπη και κλάστες πετρωμάτων, διαμέτρου 0,2-0,1 cm, ενώ χαρακτηρίζονται μια υψηλή συγκέντρωση πηλού και ιλύος με αναλογία περίπου 67-56% και 19-30% αντίστοιχα και εμφανίζουν ένα ποσοστό κοντά στο 14% σε άμμο και χαλίκια (Lykousis et al., 2008). Η χλωρίδα που συλλέχτηκε από του πυρήνες αποκάλυψε δείγματα κυρίως διθύρων όπως Myrtilidae, Vesicomylidae, Lucinidae και Thyasiridae, γαστερόποδων και πολυχαίρια (Polychaetes!?) τα οποία είναι παρόμοια με αυτά που ανακαλύφθηκαν σε παλαιότερες αποστολές στην Ανατολική Μεσόγειο (Olu-Le Roy et al., 2004).



15.3-D αναπαράσταση της οπισθοσκέδασης στην ενεργή περιοχή του ηφαιστείου λάσπης Άμστερνταμ με πορτοκαλί χρώμα και των πλαγιών και των υφέσεων των ροών λάσπης των λατυποπαγών. Οι παλαιότερες ηλικιακά ροές λάσπης στα ανατολικά με βορειοανατολικά αναπαρίστανται με κίτρινο χρώμα (Lykousis et al., 2008).

Μετά την αρχική ανακάλυψη των αερίων υδριτών με τις δειγματοληψίες που έγιναν στο ηφαίστειο λάσπης Κούλα το 1996, δύο περιοχές με υδρίτες εντοπίστηκαν το 1999 κατά τη διάρκεια του προγράμματος MEDINETH και SMILABLE με το πλοίο Professor Logachev και κατά την διάρκεια των δύο ερευνών που έγιναν με το πλοίο Aegaeo. Κατά τη διάρκεια των αποστολών αυτών, συλλέχτηκαν επτά πυρήνες που περιείχαν υδρίτες από πέντε διαφορετικές περιοχές, καινούριες για τους ερευνητές, από το ηφαίστειο Άμστερνταμ. Μια από αυτές τις περιοχές ήταν η τοποθεσία της κύριας ροής λατυποπαγών που εμφανίζεται στα νότια του ηφαιστείου, η οποία τονίζει το πόσο εκτεταμένη είναι η παρουσία των υδριτών στην επιφάνεια του συμπλέγματος Αναξίμανδρος. Το γεγονός αυτό, πιθανώς υποδεικνύει ότι τα αποθέματα υδριτών μεθανίου στα βαθύτερα στρώματα δεν βρίσκονται μόνο συγκεντρωμένα στο κεντρικό ενεργό τμήμα του υποθαλάσσιου ηφαιστείου, αλλά εμφανίζονται και κάτω από την νότια πλαγιά του συμπλέγματος βουνών Αναξίμανδρος (Lykousis et al., 2008).



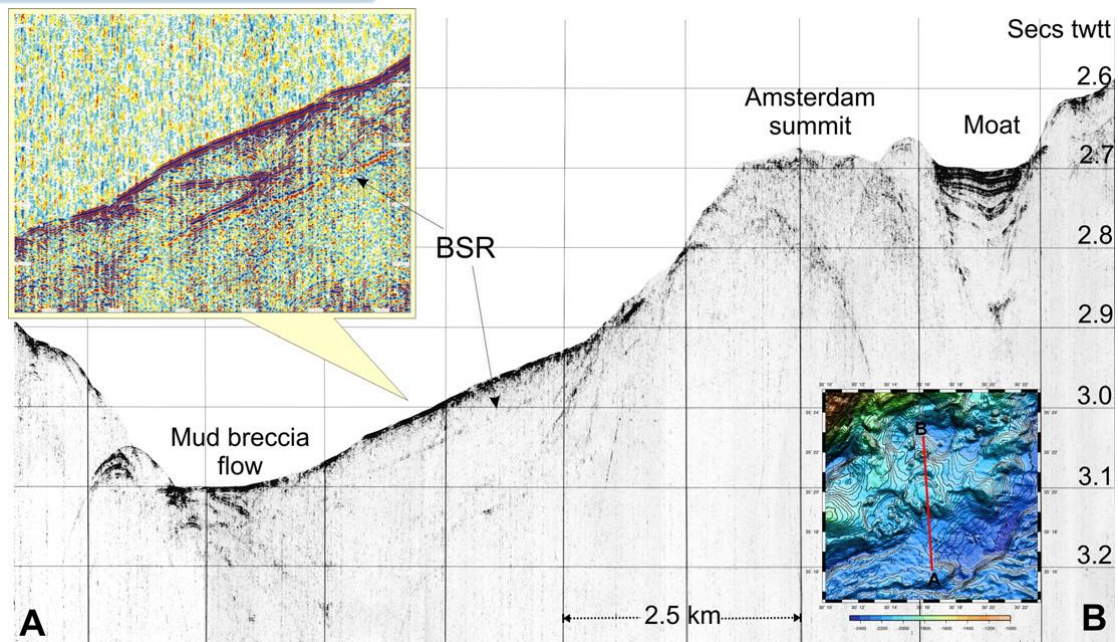


16. Μικροτοπογραφικό σκιαγράφημα του κρατήρα και του κεντρικού δόμου του ηφαιστείου λάσπης Άμστερνταμ. Παρουσιάζονται οι περιοχές των πυρηνοληψιών των ιζημάτων. Οι ισοϋψείς καμπύλες έχουν μεσοδιάσταση 5 m (Lykousis et al., 2008).

Οι υδρίτες εμφανίζονται ως ένα συμπαγές κρυσταλλωμένο στρώμα, μέσα στο πέτρωμα σε βάθος 0,3-1,5m, σε σχετικά ρηγά βάρη κάτω από το θαλάσσιο πυθμένα με διάμετρο που κυμαίνεται από 0,3 έως 8 cm. Οι κρύσταλλοι αυτοί συγκεντρώνονται και σχηματίζουν φολιδωτό ή υπό μορφή «καρούμπαλου» κονδυλώδες εξωτερικό σχήμα, ενώ σε τυχαία μέρη εξαφανίζονται μέσα στην πυρήνα του ιζηματογενούς πετρώματος. Η τυπική μορφή δομής που απελευθερώνει υδρίτες, είναι ορατή σε όλους τους πυρήνες που προέρχονται από βάθος μεγαλύτερο από 0,1-0,2m κάτω από τη λάσπη και καθιστά σαφές το γεγονός της ύπαρξης μεγάλων ποσοτήτων μεθανίου στα ιζήματα της λάσπης των λατυποπαγών (Lykousis et al., 2008).

Το σεισμικό προφίλ κατά μήκος του υποθαλάσσιου ηφαιστείου λάσπης Άμστερνταμ, αποκάλυψε ένα αρκετά φαρδύ 'υπερβολικό' ανακλαστικό χαρακτήρα στον κεντρικό κρατήρα της περιοχής, ενώ τα σεισμικά χαρακτηριστικά των ροών λάσπης εμφανίζονται κατά κύριο λόγο χασοτικά ή χωρίς συγκεκριμένη μορφή (Εικόνα 17). Το πιο σημαντικό υποθαλάσσιο σύστημα είναι το Bottom Simulating Reflector (BSR), το οποίο λειτουργεί σε 55 ms ή περίπου 40m σε βάθος, κάτω από το θαλάσσιο υπόβαθρο. Η εικόνα επεξεργάζεται και αναλύεται με τη βοήθεια ακουστικών σημάτων δείχνοντας

ότι τα σεισμικά κύματα πιθανώς έχουν την ίδια πολικότητα με την αντανάκλαση του θαλάσσιου πυθμένα. Η αδυναμία αναστροφής της πολικότητας στο



17. Προφίλ B-N με αεροπιστόλι το οποίο διασχίζει κατά μήκος το ηφαίστειο λάσπης Άμστερνταμ και τις ροές λατυποπαγών λάσπης στα νότια (αριστερή εικόνα). Αξίζει να σημειωθεί η επιχειρησιακή δυνατότητα του BSR κάτω από τα 50m του πυθμένα κατά μήκος των ροών λάσπης, όπου καταγράφονται τα δεδομένα και σε αναλογική και σε ψηφιακή μορφή (Lykousis et al., 2008).

BSR σημαίνει ότι η επίδοση της ανακλαστικότητας στο σύνολο είναι θετική και επομένως η χρήση του BSR είναι αποτέλεσμα σταθερά μειούμενης αύξησης της ακουστικής εμπέδησης. Η θερμοκρασία του νερού στο θαλάσσιο πυθμένα ήταν 13,75 °C και η τοπική γεωθερμική βαθμίδα κυμαινόταν στα 26-38 °C/Km (Lykousis et al., 2008), ενώ η εργαστηριακή ανάλυση έδειξε μια σύσταση μεθανίου σε ποσοστό 97% (Dahlmann et al., 2005). Επιπρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη ότι η βάση της ζώνης ισορροπίας των υδριτών εντοπίζεται περίπου στα 200m κάτω από τον θαλάσσιο πυθμένα, δηλαδή κοντά στα 2250m βάθους στην Ανατολική Μεσόγειο, η χρήση του BSR δεν μπορεί να λειτουργήσει στη ζώνη σταθερότητας των υδριτών αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο ανώτερο όριο πιθανής διάκρισης των στρωμάτων των υδριτών. Είναι δύσκολο σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης το BSR να έχει κάποιο διαφορετικό αποτέλεσμα και να συλλέξει υδρίτες και ροές λάσπης στο σημείο σχηματισμού τους, ενδυναμώνοντας τη θεωρία για την προέλευση των υδριτών. Ωστόσο, είναι πιθανό η πίεση και η θερμοκρασία από τις οποίες εξαρτάται η διαγένεση να προέρχονται από διεργασίες που ευθύνονται για την έντονη παρουσία του BSR (Berndt et al., 2004). Η υποθαλάσσια χωρική εξάπλωση των υδριτών στην περιοχή του κρατήρα και των ροών λάσπης υπολογίζεται σε 26-28Km<sup>2</sup>. Το μέγεθος αυτό προκύπτει από την πολυακτινική οπισθοσκέδαση και την εξέταση των ιζημάτων από τους πυρήνες των δειγματοληψιών (Lykousis et al., 2008).





18. Συσσωματώματα υδριτών (8\*5\*4 cm το πάνω δείγμα), και σπασμένοι υδρίτες (κάτω δείγμα) που ανακτήθηκαν από μια πυρηνοληψία στην περιοχή του ηφαιστείου λάσπης Άμστερνταμ. Η επιτυχημένη μέτρηση των υδριτών στους πυρήνες των ιζημάτων κατά την ανάκτησή τους, έδωσε ελάχιστη θερμοκρασία 3-4 °C (Lykousis et al., 2008).

## 2.4 Ηφαιστειο λάσπης Καζάν

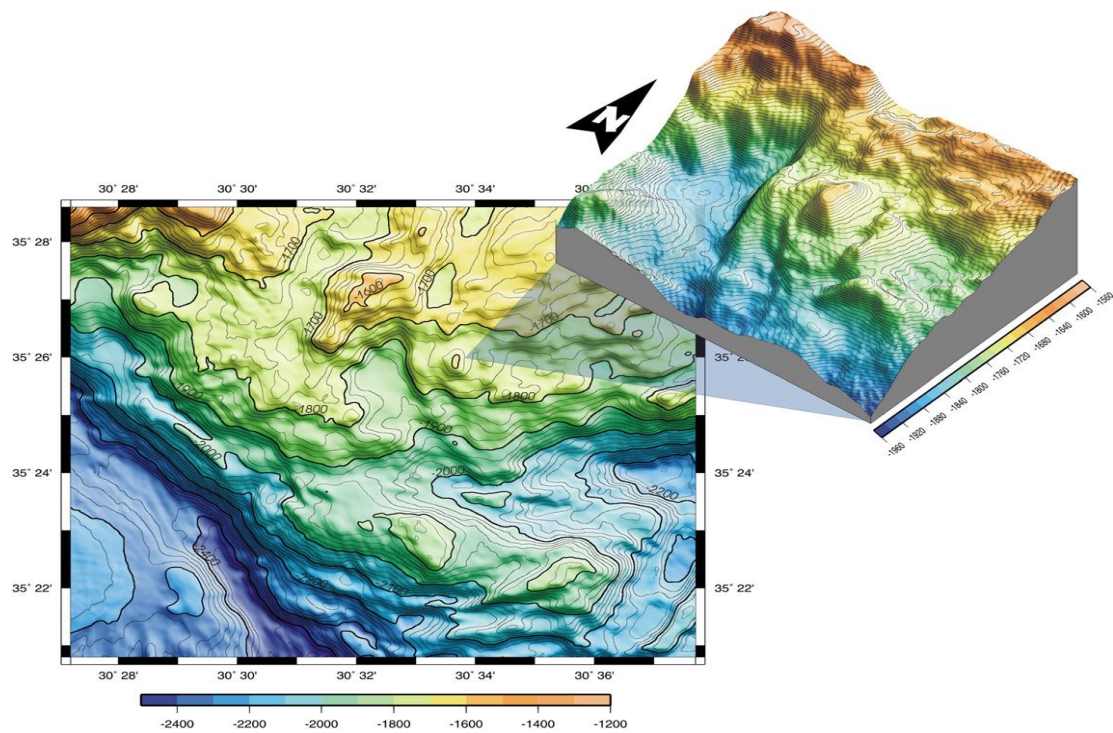
Σύμφωνα με τα δεδομένα που προέκυψαν από το πρόγραμμα Αναξόφοβος, το ηφαιστειο λάσπης Καζάν, αποτελεί έναν απομονωμένο λόφο ύψους 50m, ο οποίος κείται στην άκρη ενός σχετικά επίπεδου πλατώματος με μέσο βάθος 1750m. Το πλάτωμα βρίσκεται στη νότια πλευρά των ανατολικών βουνών του συμπλέγματος Αναξίμανδρος, στην περιοχή Αναξαγόρας, και ανατολικά από την κύρια βορειοδυτική – νοτιοανατολική ζώνη ρηγματώσης, η οποία διαχωρίζει το σύμπλεγμα Αναξιμένης από αυτό του Αναξαγόρα. Εμφανίζεται ως μια οβάλ δομή, διαστάσεων 0,6 X 0.9 Km ευθυγραμμισμένο με τη βόρεια – νότια κατεύθυνση. Στις λεπτομερείς μορφολογικές εικόνες, η ημικυκλική μορφή περιβάλλεται από μια ζώνη κατάρρευσης και ύφεσης (Lykousis et al., 2008).

Το πολυδεσμικό σήμα της οπισθοσκέδασης από το ηφαιστειο λάσπης είναι εμφανώς πιο έντονο από το τριγύρω περιβάλλον, αλλά μόνο σε μια περιορισμένη περιοχή στην κορυφή του ηφαιστείου λάσπης, ενώ δεν εντοπίζονται εκτεταμένες ροές στις πλαγιές του. Ωστόσο, μια πιο προσεκτική ματιά στον χάρτη οπισθοσκέδασης του ηφαιστείου

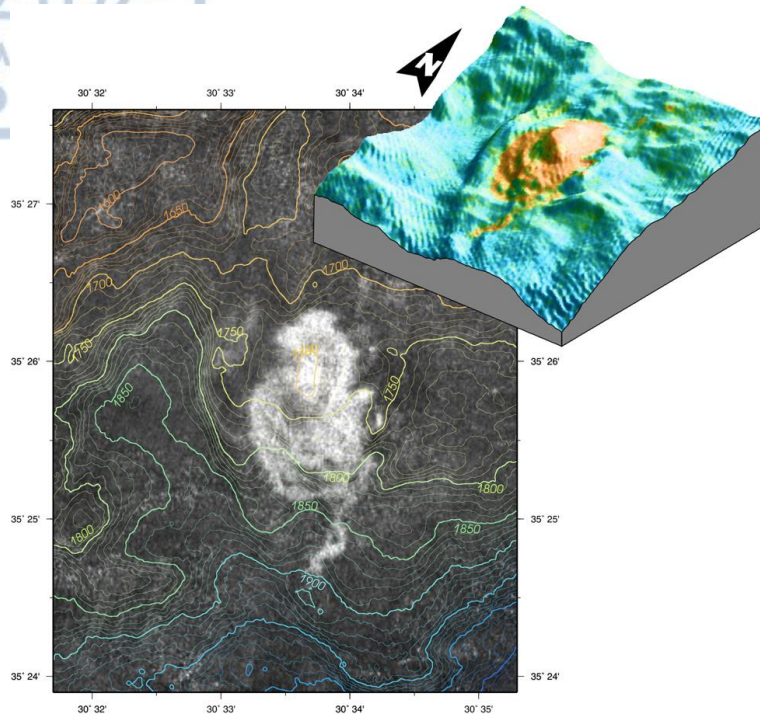


λάσπης Καζάν, αποκαλύπτει μια καλοσηματισμένη γραμμική δομή, η οποία είναι πολύ χαρακτηριστική στα νότια και υπονοεί την ύπαρξη μικρών ροών λάσπης. Η εκτεταμένη οπισθοσκέδαση αξιολογεί μια περιοχή στην κορυφή του βουνού η οποία αναμενόταν να παρουσιάζει εντονότερη δραστηριότητα, ενώ ομόκεντρες διαφοροποιήσεις σε αυτήν την οπισθοσκέδαση φαίνεται να ανταποκρίνονται σε διαφορετικές μορφολογικές πλαγιές. Το νότιο περιθώριο παρουσιάζει καθαρά δύο λοβοειδείς δομές οι οποίες δείχνουν τις κινήσεις των ροών λάσπης από τον κεντρικό δόμο προς τα βόρεια.

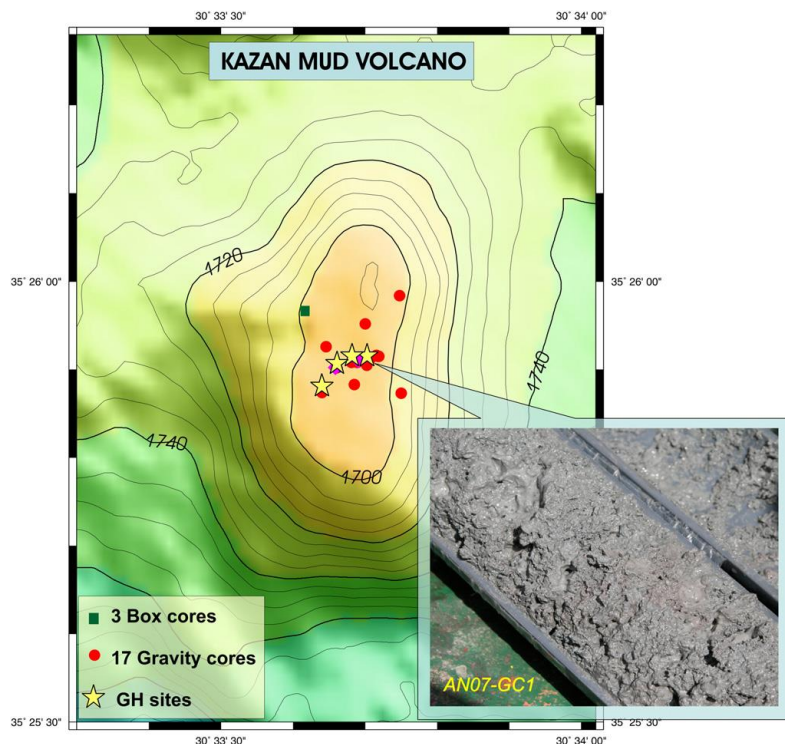
Συνολικά, στο ηφαίστειο λάσπης Καζάν διενεργήθηκαν 20 πυρηνοληψίες κατά την διάρκεια των δύο ερευνητικών αποστολών, 17 βαρυτικές και 3 σε πυρήνες καρότων. Οι υδρίτες ανακτήθηκαν για πρώτη φορά από το ηφαίστειο αυτό, στην πρώτη αποστολή. Συνολικά και στις δύο αποστολές συλλέχθηκαν υδρίτες από 6 βαρυτικές γεωτρήσεις και από 1 γεώτρηση καρότου, από τέσσερις διαφορετικές περιοχές στην κορυφή του βουνού. Οι κρύσταλλοι των υδριτών εμφανίζονται στην περιοχή σαν μικρά ριζοειδή εξογκώματα και χαρακτηρίζονται γενικά από μια γενικά διασκορπισμένη κατανομή κατά μήκος των ιζημάτων και των υλικών, σε βάθη μέσα στα υλικά αυτά, μεγαλύτερα των 0,3m (Lykousis et al., 2008).



19. Περιοχή χαρτογράφησης οπισθοσκέδασης και αναλυτικής απεικόνισης 3-D του ηφαιστείου λάσπης Καζάν (Lykousis et al., 2008).



20. Αναλυτικός χάρτης επεξεργασμένης οπισθοσκέδασης και ανακλαστικός χάρτης 3-D του ηφαιστείου λάσπης Καζάν. Η εικόνα δείχνει την έκταση και την ενεργή δραστηριότητα στην περιοχή με το άσπρο και το πορτοκαλί χρώμα (Lykousis et al., 2008).

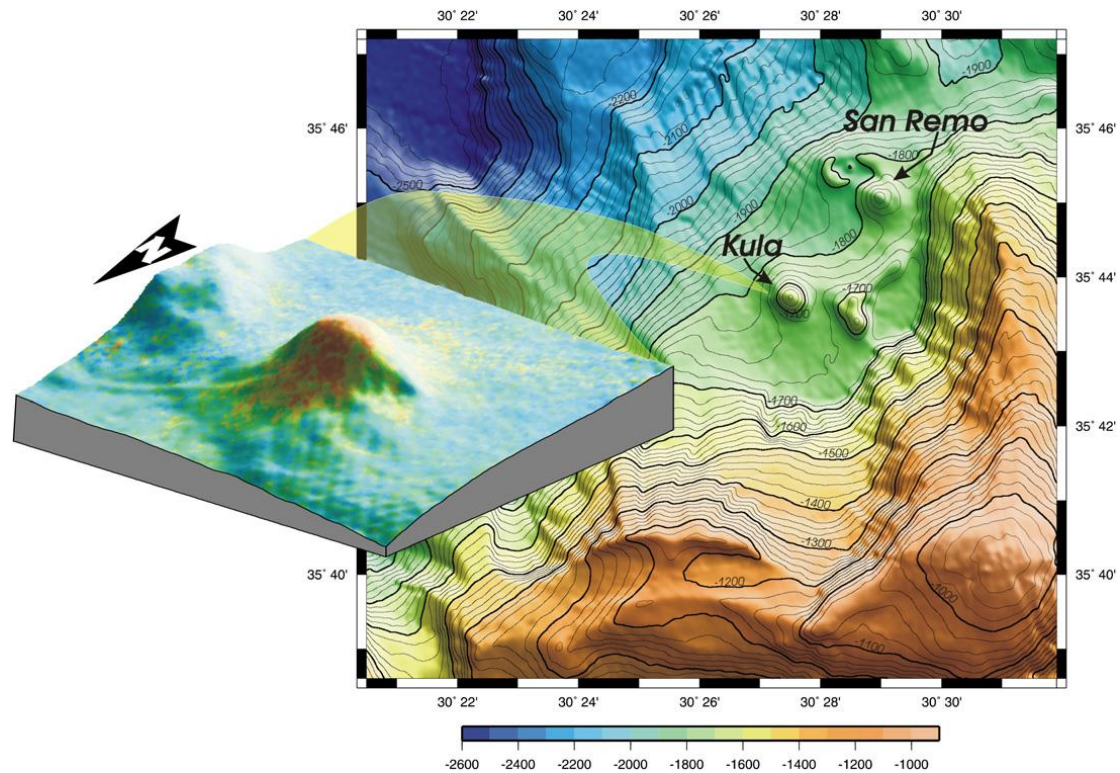


21. Μικροτοπογραφικός χάρτης της κορυφής του ηφαιστείου λάσπης Καζάν, με δειγματοληψία ιζημάτων που ανακτήθηκε στις περιοχές με τα κίτρινα αστέρια και περιείχαν υδρίτες. Φωτογραφία ενεργών υδριτών σε διάσπαση κατά μήκος της πυρινοληψίας AN07-GC1. Η ισοδιάσταση στον χάρτη είναι 5m ενώ ο πυρήνας της γεώτρησης έχει διάμετρο 7cm (Lykousis et al., 2008).



## 2.5 Ηφαιστειο λάσπης Κούλα.

Το σύμπλεγμα του ηφαιστείου λάσπης Κούλα και αυτό του Σαν Ρέμο, είναι τοποθετημένο σε ένα μικρής έκτασης τριγωνικό πλάτωμα, το οποίο οριοθετείται στα ανατολικά και στα νότια από θαλάσσια βουνά στο βόρειο άκρο του συμπλέγματος Αναξαγόρας (Lykousis et al., 2008). Στον βαρυμετρικό χάρτη εντοπίζονται στο

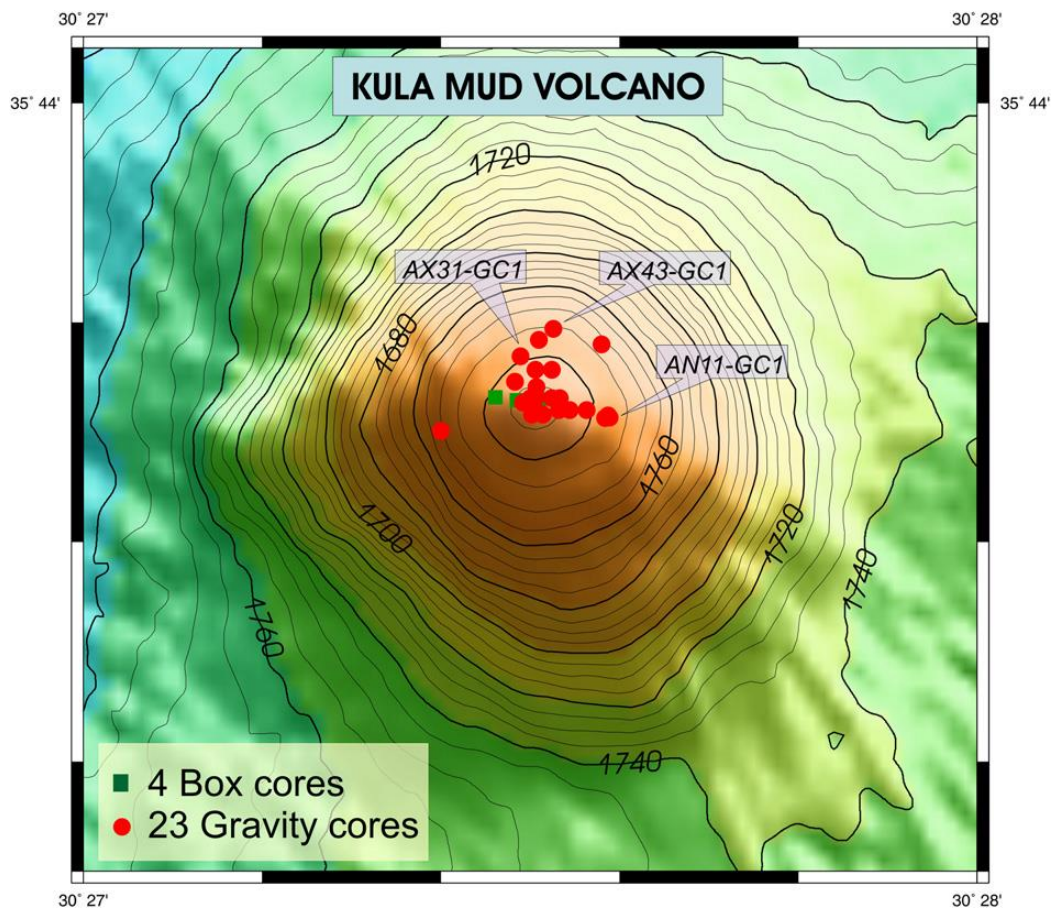


22. Βαθυμετρικός χάρτη της περιοχής του υποθαλάσσιου ηφαιστείου Κούλα και Σαν Ρέμο και 3-D προοπτική όψη οπισθοσκέδασης του ηφαιστείου Κούλα. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 20m (Lykousis et al., 2008).

σύνολο 4 οικοδομήματα με τη μορφή βουνών. Το ανατολικότερο από αυτά, το οποίο είναι το κοντινότερο στην πλαγιά του Αναξαγόρα, αποτελεί μια ακανόνιστη μορφή με την κορυφή του να βρίσκεται σε βάθος 1650m και επεκτείνεται στα βορειοανατολικά ως ένα χαμηλό τόξο επαύξεσης. Στα δυτικά αυτού, το ηφαιστειο λάσπης Κούλα αποτελεί ένα μεγάλο ημικυκλικό βουνό, με διάμετρο 1 Km και ύψος 100 m (Woodside et al., 1998). Στα βορειοδυτικά, μια κωνική μορφή βουνού εμφανίζεται ύψος 50 m και διάμετρο 1 Km, δημιουργώντας το ηφαιστειο λάσπης Σαν Ρέμο (Woodside et al., 1997). Η τέταρτη δομή, στα βορειοδυτικά του ηφαιστείου Σαν Ρέμο, εμφανίζεται ως μια δομή ηφαιστείου λάσπης η οποία φαίνεται να έχει καταρρεύσει και διατηρείται σήμερα μόνο ένα τμήμα του δυτικού τμήματος του κρατήρα. Τα ηφαιστεια λάσπης Κούλα και Σαν Ρέμο αρχικά ανακαλύφθηκαν σαν δομές από τις εικόνες οπισθοσκέδασης που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Simrad EM-12 και στην συνέχεια ταυτοποιήθηκαν ως ηφαιστεια λάσπης με δείγματα που συλλέχθηκαν μετέπειτα (Woodside et al., 1997). Ο πρώτος πυρήνας που συλλέχθηκε από το ηφαιστειο Κούλα περιείχε μικρές συμπαγείς ποσότητες υδριτών σε μέγεθος ρυζιού, οι οποίοι αποτέλεσαν και τους πρώτους υδρίτες που συλλέχθηκαν ποτέ από το γεωλογικό υπόβαθρο της Μεσογείου (Woodside et al., 1997, 1998). Η πολυδεσμική

οπισθοσκέδαση επάνω στο ηφαιστείο Κούλα δεν εμφανίζεται τόσο έντονη, εκτός από το βορειοδυτικό τμήμα της κορυφής του ηφαιστείου λάσπης. Αυτή η περιοχή αποτέλεσε και την μόνη περιοχή που κατά την διάρκεια του προγράμματος ερευνών MEDINAUT/MEDINETH και του προγράμματος Αναξόφοβος, εντοπίστηκαν πρόσφατες ροές λάσπης σε ένα σχετικά ομοιόμορφο δόμο, καλυμμένο από ημιπελαγικά ιζήματα. Το ηφαιστείο λάσπης Σαν Ρέμο, το οποίο δεν παρουσιάζει υψηλές χαρακτηριστικές μετρήσεις στα δεδομένα της πολυδεσμικής οπισθοσκέδασης, φαίνεται να είναι ανενεργό. Σε ένα πυρήνα που ανακτήθηκε από αυτό το ηφαιστείο (πυρήνας TTR-6-239C), η ύπαρξη καστανοκόκκινων, φτωχά ταξινομημένων υλικών λάσπης και λατυποπαγών που επικαλύπτονται από κανονικά πελαγικά ιζήματα που περιέχουν sargopels S1, S3 και στρώματα τέφρας (Woodside et al., 1997), αποδεικνύει ότι η τελευταία ηφαιστειακή δραστηριότητα του Σαν Ρέμο ήταν περίπου πριν από 80 kyrs BP (Lykousis et al., 2008).

Οι 27 πυρήνες που ανακτήθηκαν από το ηφαιστείο λάσπης Κούλα, 23 πυρήνες βαρύτητας και 4 πυρήνες καρότων, έδειξαν μια δομή τόσο με πελαγική υφή όσο και με μια τυπική ηφαιστειακή υφή λατυποπαγών λάσπης. Οι πυρήνες ιζημάτων που

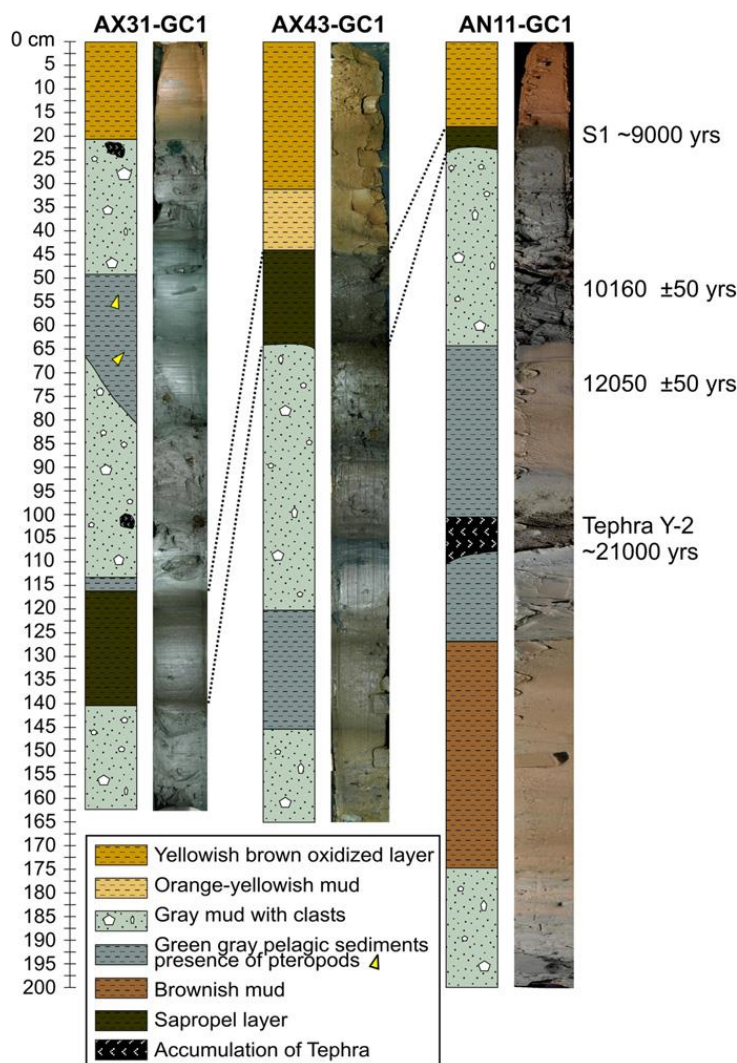


23. Μικροτοπογραφικός σκιαγραφημένος χρωματισμένος χάρτης του ηφαιστείου λάσπης Κούλα με τις τοποθεσίες των δειγματοληψιών. Η ισοδιάσταση είναι 5m (Lykousis et al., 2008).

συλλέχτηκαν από την κορυφή του ηφαιστείου λάσπης Κούλα έδειξε την ύπαρξη λατυποπαγών λάσπης, τα οποία είναι εκτεθειμένα μόνο στο υπόβαθρο της κορυφής του ηφαιστείου. Οι πυρήνες που συλλέχτηκαν από το πάνω μέρος της δομής του



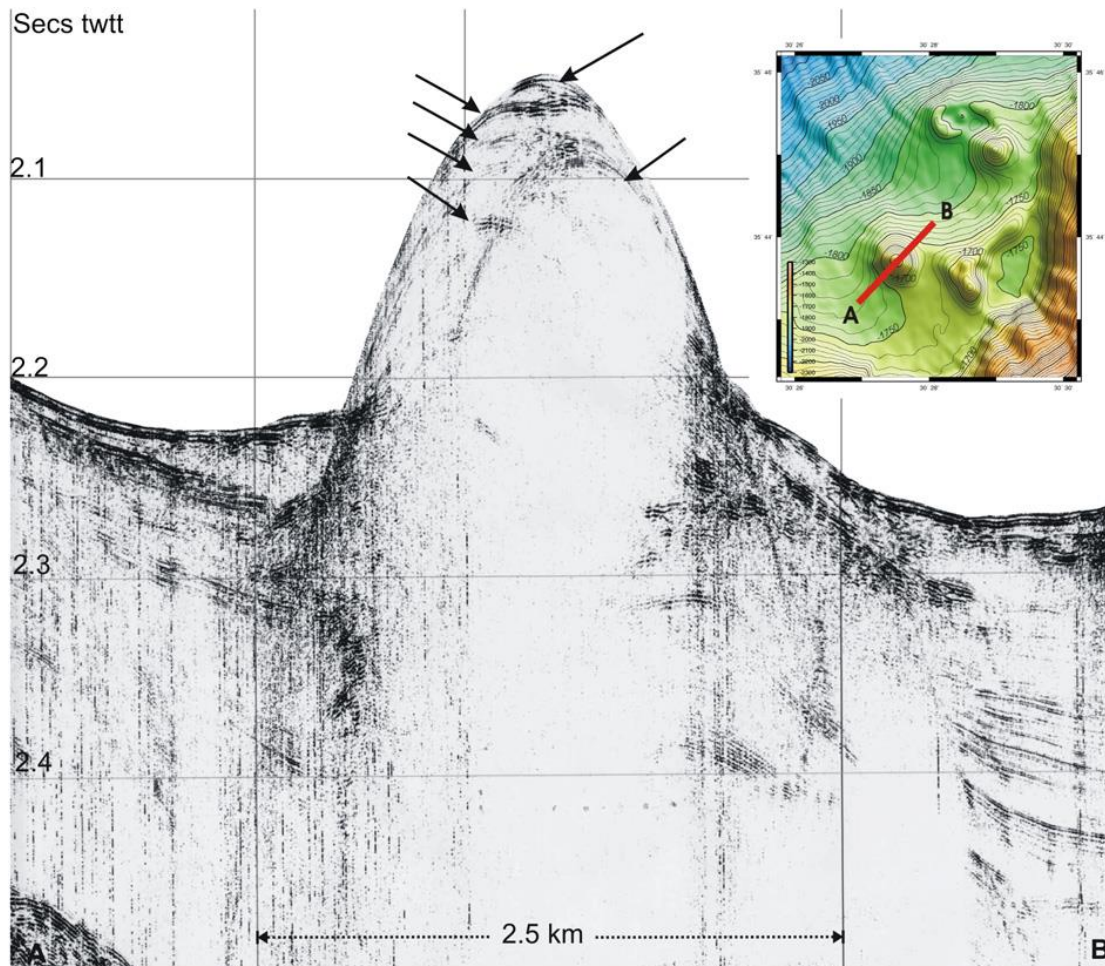
ηφαιστείου, παρουσιάζουν την τυπική ημιπελαγική κάθετη ακολουθία της Ανατολικής Μεσογείου, η οποία ξεκινά από λάσπες ηλικίας κάτω Μειόκαινου, Sapropel S1, ημιπελαγική λάσπη ηλικίας κάτω Ολόκαινου και επιφανειακά οξειδωμένα στρώματα. Και οι δύο ανακαλύψεις οδηγούν στο ασφαλές συμπέρασμα ότι η πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα είναι περιορισμένη στην κορυφή του ηφαιστείου Κούλα, όπως προκύπτει και από την απευθείας παρατήρηση (Zitter et al., 2005). Επιπρόσθετα, μερικοί πελαγικοί πυρήνες συλλέχτηκαν από την πλευρά της κορυφής που αντιπροσωπεύεται από πελαγικές ακολουθίες ηλικίας κάτω Πλειστόκαινου, 21 kyrs, και αποκόπτεται από 2-4 ροές λάσπης πάχους 10-30cm, οι οποίες είναι ενσωματωμένες στην κάθετη πελαγική ακολουθία (Εικόνα 24). Οι μετρήσεις AMS και οι σχετικές θέσεις των ροών λατυποπαγών λάσπης πάνω από το στρώμα S1 'sapropelic' με οργανική ύλη (αποθέσεις 6,5-9 kyrs BP), μαζί με το στρώμα στάχτης (21 kyrs BP) Cape Riva (Y-5) (Vougioukalakis et al., 2004), δείχνουν επαναδραστηριοποίηση του ηφαιστείου Κούλα κάθε 5-10 kyrs (Lykousis et al., 2008).



24.Επιλεγμένοι πυρήνες ιζημάτων από την κορυφή του ηφαιστείου λάσπης Κούλα που δείχνουν διαφορετικές ροές λάσπης επικαθήμενες σε κανονικά πελαγικά ιζήματα ηλικίας κάτω Πλειστοκαίνου. Οι σχετικές ηλικίες εξάγονται από το sapropel S1 και την τέφρα Y2 καθώς και τα δεδομένα AMS (Lykousis et al., 2008).

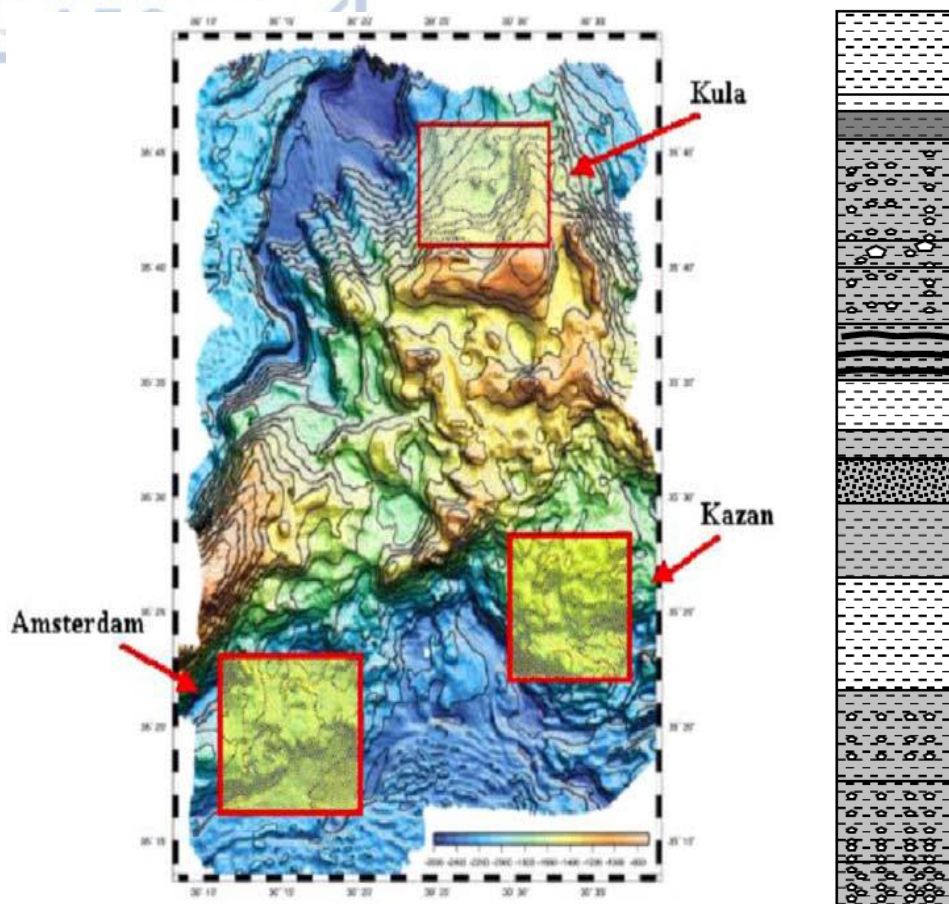


Η μορφή του βουνού λάσπης Κούλα, ως μια κωνική εκτεταμένη επιμήκυνση, αντικατοπτρίζεται επίσης στο προφίλ airgun που διέσχισε τη δομή αυτή κατά το πρόγραμμα Αναξόφοβος. Προφανώς, η πιο ενδιαφέρουσα δομή είναι οι 3-4 κωνικοί υποθαλάσσιοι κατοπτρισμοί κοντά στην κορυφή, η οποία θυμίζει ένα θαμμένο ηφαιστείο λάσπης ή κέντρα εκρηξιγενών γεγονότων (τα βέλη στην εικόνα 25) (Lykousis et al., 2008).



25. Προφίλ airgun το οποίο διασχίζει το πεδίο του ηφαιστείου λάσπης Κούλα. Οι κωνικές υποθαλάσσιες ανακλάσεις στην κορυφή της δομής αντιπροσωπεύουν παλαιότερα θαμμένα ηφαιστεια λάσπης ή κέντρα παλαιότερων εκρηξιγενών ακολουθιών που υποδεικνύεται από τα βέλη (Lykousis et al., 2008).

Κατά τη διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος Αναξίμανδρος, ανακτήθηκε ο πυρήνας AN11-GC1 σε μια περιοχή του ηφαιστείου λάσπης Κούλα όπου εντοπίστηκε μέσα σε αυτόν ένα λεπτό ηφαιστειακό στρώμα τέφρας. Στην Εικόνα 26 παρουσιάζονται σχηματικά τα ιζηματογενή στρώματα στον πυρήνα AN11-GC1. Το βάθος στην περιοχή της γεώτρησης ήταν 1644 m και το μήκος του δείγματος ήταν 200 cm. Το καλά μελετημένο οργανικό στρώμα S1 (Cita et al., 1991) έχει ταυτοποιηθεί σε βάθος 23-29 cm μέσα στον πυρήνα, ενώ ανάμεσα στα 103-107 cm είναι παρών ένα λεπτό γκρι στρώμα στάχτης με χαρακτηριστική ασυμφωνία στο πάνω και κάτω όριο επαφής του (Vougioukalakis et al., 2004).

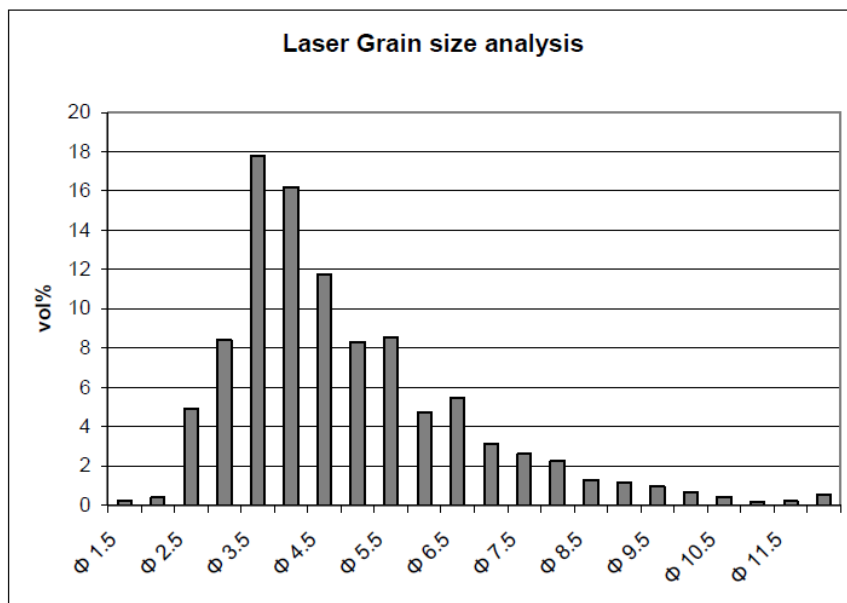


26. Βαθυμετρικός χάρτης του συμπλέγματος θαλάσσιων ηφαιστειών λάσπης Αναξιμανδρος με την περιοχή του ηφαιστείου Κούλα στα αριστερά και ο πυρήνας βαρύτητας της πυρηνοληψίας AN11-GC1 στα δεξιά (Vougioukalakis et al., 2004).

Τα δείγματα της λεπτής τέφρας που συλλέχθηκαν, ξεπλύθηκαν με αποσταγμένο νερό, στη συνέχεια προστέθηκε  $H_2O_2$  και Calgonit και στο τέλος υποβλήθηκαν ελαφρώς σε ένα λουτρό υπερήχων ώστε να αποβληθούν τα οργανικά υλικά, τα ανθρακικά υπολείμματα και κόκκοι συγκόλλησης. Ένα μέρος του δείγματος κοσκινίστηκε σε κόσκινα  $>250$ ,  $>125$ ,  $>66$  και  $<66$   $\mu m$  και τα υλικά στην συνέχεια εξετάστηκαν με λεπτές τομές (Vougioukalakis et al., 2004). Πραγματοποιήθηκε ακόμα κοκκομετρική ταξινόμηση με λέιζερ, με την χρήση του οργάνου του IPME Cilas Laser 1064, το οποίο διαθέτει στεγνή ανάλυση δειγμάτων διαμετρήματος 0,1-500  $\mu m$ . Τα αποτελέσματα της κοκκομετρίας φαίνονται στην Εικόνα 27. Η  $\frac{1}{2}\Phi$  κατανομή της ταξινομημένης τέφρας αντικατοπτρίζεται καθαρά σε ένα μηχανισμό αποθέσεως (Vougioukalakis et al., 2004).

Τα επεξεργασμένα τμήματα των πυρήνων μελετήθηκαν και με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM και με οπτικό μικροσκόπιο. Τα δείγματα διαμέτρου  $>250\mu m$  αναλύθηκαν επίσης μικροσκοπικά στο SEM. Τα δείγματα διαμέτρου  $>250\mu m$  αποτελούνται από θραύσματα ελαφρόπετρας σε ποσοστό περίπου 60%, πλαγκτονικά και βενθικά τρηματοφόρα σε ποσοστό 40% και από λίγους κρυστάλλους

$\Phi$	vol %
$\Phi$ 1.5	0.2
$\Phi$ 2	0.4
$\Phi$ 2.5	4.9
$\Phi$ 3	8.4
$\Phi$ 3.5	17.8
$\Phi$ 4	16.2
$\Phi$ 4.5	11.7
$\Phi$ 5	8.3
$\Phi$ 5.5	8.5
$\Phi$ 6	4.8
$\Phi$ 6.5	5.5
$\Phi$ 7	3.1
$\Phi$ 7.5	2.6
$\Phi$ 8	2.2
$\Phi$ 8.5	1.3
$\Phi$ 9	1.1
$\Phi$ 9.5	0.9
$\Phi$ 10	0.6
$\Phi$ 10.5	0.4
$\Phi$ 11	0.2
$\Phi$ 11.5	0.2
$\Phi$ 12	0.5

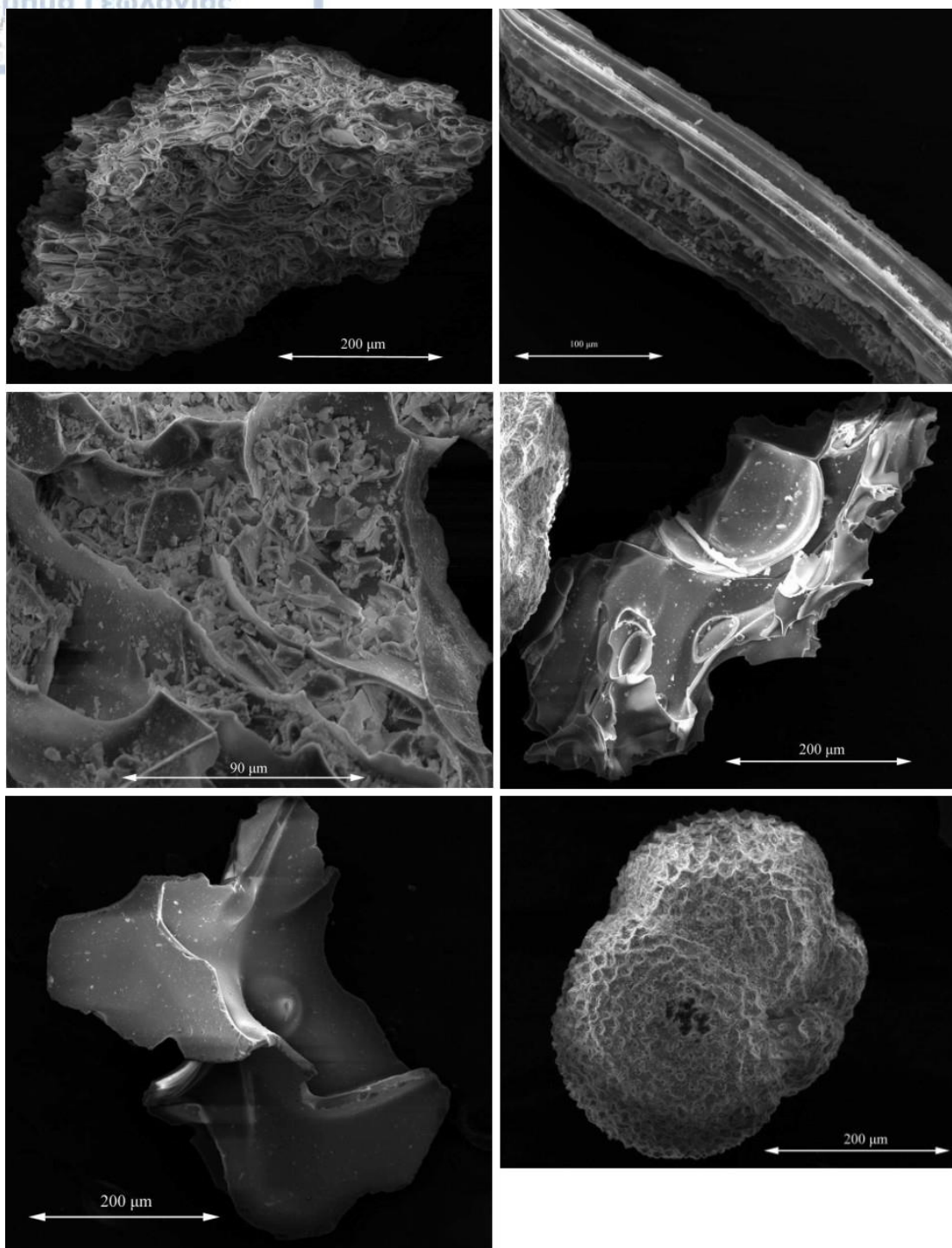


27. Ανάλυση μεγέθους ταξινομημένων δειγμάτων τέφρας με διαχωρισμό λείζερ (Vougioukalakis et al., 2004).

πλαγιόκλαστων και κλινοπυρόξενων σε ποσοστό μικρότερο του 1%. Οι μεγαλύτεροι σε μέγεθος κλάστες ελαφρόπετρας, είναι της τάξεως των 500 $\mu$ m ενώ οι μεγαλύτεροι λιθικοί κρύσταλλοι κλαστών έχουν διάμετρο 380 $\mu$ m. Το ηφαιστειακό γυαλί είναι πολύ πρόσφατης ηλικίας, χωρίς ίχνη μεταποίησης και ενυδάτωσης. Στα υλικά εντοπίζονται ομογενή και κυστοειδή θραύσματα (Εικόνα 28α) αλλά και επιμηκυμένα θραύσματα (Εικόνα 28β). Το σύνολο του καλοσχηματισμένου γυαλιού μπορεί να παρατηρηθεί στα θραύσματα των κλαστών στις ελαφρόπετρες (Εικόνα 28γ). Μερικά τοιχώματα που εμφανίζουν φυσαλιδωτή μορφή θεωρούνται παχύτερα (>8  $\mu$ m) σε σχέση με τα υπόλοιπα (Εικόνα 28ε) αλλά το γυαλί εμφανίζει παρόμοια σύσταση και με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Το κλάσμα 250-125  $\mu$ m περιέχει κυρίως ελαφρόπετρα και θραύσματα γυαλιού. Ενα ποσοστό κοντά στο 4% τρηματοφόρων και 3% των νεότερων κρυστάλλων όπως πλαγιόκλαστα, κλινοπυρόξενοι και σπανιότερα απατίτης, εντοπίζονται στο δείγμα. Στο κλάσμα των 125-66  $\mu$ m παρατηρείται μια ελαφριά αύξηση του κρυσταλλικού περιεχομένου (5%) και μια μείωση στα τρηματοφόρα (3%). Το κλάσμα των <66 $\mu$ m περιέχει θραύσματα γυαλιού, κρυστάλλους σε περιεκτικότητα 3% και πολύ λεπτά (<8 $\mu$ m) τρίμματα ανθρακικών υλικών και πηλών σε ποσοστό 12%. Συνολικά, στο δείγμα υπάρχει περιεκτικότητα γυαλιού και θραυσμάτων ελαφρόπετρας σε ποσοστό 84%, περιεκτικότητα τρηματοφόρων σε ποσοστό 12%, λεπτά ανθρακικά και πηλικά υλικά και 4% σε περιεκτικότητα νέων μαγματικών κρυστάλλων (Vougioukalakis et al., 2004).

Στο ηφαιστειακό γυαλί πραγματοποιήθηκαν 24 μετρήσεις EDS (Εικόνα 28), με την χρήση του οργάνου του IΓME Jeol GMS 560 SEM. Χρησιμοποιήθηκε επιταχυνόμενο ρεύμα έντασης 20 kV και ρεύμα στην ακτίνα έντασης 1,5 nA μαζί με μια επαναληπτική ακτίνα έντασης 2 $\mu$ m. Ο χρόνος μέτρησης ήταν 50 δευτερόλεπτα. Η ανάλυση μπορεί να επαναληφθεί σε ποσοστό 100% με ξερά υλικά Fe με FeO. Το γυαλί είναι αρκετά ομοιογενές, με ρυολιθική υφή που παρουσιάζει χημική συγγένεια με αλκαλικά υλικά. Το αποτέλεσμα του δείκτη ανάκλασης του γυαλιού έδειξε ένα αριθμό 1.505, μια τιμή η οποία έρχεται σε πλήρη συμφωνία με την περιεκτικότητα του πυριτίου στο γυαλί (Vougioukalakis et al., 2004).





28. Εικόνες (α, β, γ, δ, ε) που προέκυψαν από συστατικά της ψιλής τέφρας με την χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου SEM (Vougioukalakis et al., 2004).

AN11-GC1 (24 EDS analysis)	Druitt et al.		TR172-21PC	
	Mean	Std Dev	S80-144	85-86 cm
SiO <sub>2</sub>	70.30	0.55	71.14	71.00
TiO <sub>2</sub>	0.41	0.16	0.37	0.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.77	0.49	15.08	14.63
FeO	3.23	0.39	3.00	3.30
MnO	0.17	0.12		0.13
MgO	0.29	0.17	0.42	0.39
CaO	1.77	0.18	1.80	1.78
Na <sub>2</sub> O	5.60	0.46	5.28	5.22
K <sub>2</sub> O	3.20	0.29	2.93	2.95
Cl <sub>2</sub> O	0.29	0.10		0.27

29. Ανάλυση EDS του ηφαιστειακού γυαλιού και σύγκριση με την ανάλυση των αποθέσεων του CR (Cape Riva) στην στεριά και με τα στρώματα Y2 του πυρήνα Trident core (Vougioukalakis et al., 2004).

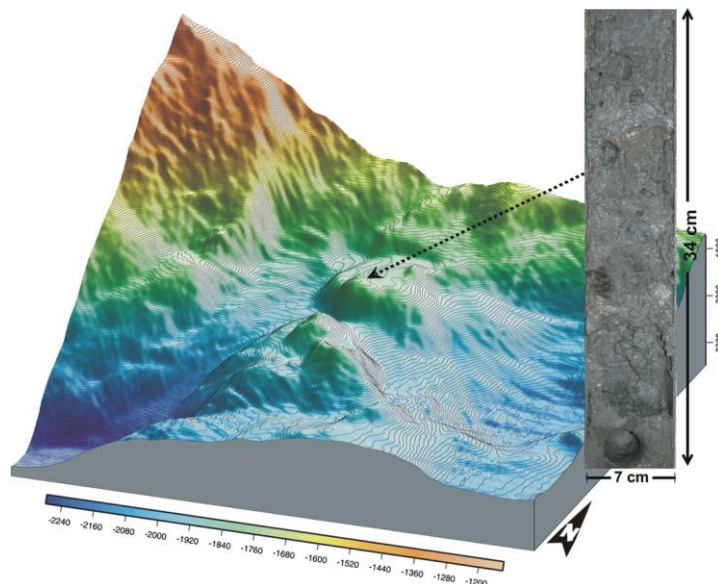
Όλα τα παραπάνω δεδομένα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τα στρώματα τέφρας έχουν εναποτεθεί ταχύτατα σε ήδη καλά ταξινομημένα στρώματα τέφρας. Ο μόνος μηχανισμός ο οποίος θα μπορούσε να δημιουργήσει αυτές τις στρωματικές αποθέσεις, είναι μια μακρινή πτώση των υλικών από ένα μεγάλο ηφαιστειογενές σύννεφο. Πολλά τέτοια στρώματα έχουν μελετηθεί κατά καιρούς στην Ανατολική Μεσόγειο. Βάση των φυσικών χαρακτηριστικών της σύστασης του γυαλιού και του δείκτη ανακλαστικότητας του, της πετρογραφικής παραγένεσης, της παρουσίας του οργανικού (sargropel) στρώματος S<sub>1</sub> και των ιζηματογενών υλικών στην περιοχή, συμπεραίνεται ότι το υπό μελέτη στρώμα τέφρας είναι ένα γνωστό και διαδεδομένο Y<sub>2</sub> στρώμα τέφρας. Το στρώμα έχει εναποτεθεί 21.000 χρόνια BP, προερχόμενο από μια έκρηξη του ηφαιστείου της Σαντορίνης, την λεγόμενη έκρηξη Cape Riva. Η σύσταση του γυαλιού και ο δείκτης ανακλαστικότητάς του είναι πολύ παρόμοια με αυτά στις αποθέσεις στην στεριά (Εικόνα 29). Βάση του βάθους των οργανικών στρωμάτων και των στρωμάτων τέφρας, ο ρυθμός ιζηματογένεσης στην περιοχή υπολογίζεται 2-4 cm/ka. Η μέθοδος ραδιοχρονολόγησης <sup>14</sup>C που πραγματοποιήθηκε στα ανθρακικά οργανικά υλικά, από το βάθος στον πυρήνα 52-53 και 72-77cm του δείγματος πυρήνα AN11-GC1, έδειξε αντίστοιχα ηλικίες 10.160 ± 50 και 10.050 ± 50 χρόνων, υποστηρίζοντας το προηγούμενο συμπέρασμα ότι το στρώμα τέφρας είναι το ίδιο με αυτό του Y<sub>2</sub>. Παρόμοιες εικόνες προέκυψαν και από τον πυρήνα 172-21 PC, ο οποίος προέρχεται από παρόμοιο βάθος, 500 Km ανατολικά της Κρήτης. Στον πυρήνα αυτόν, το στρώμα τέφρας S<sub>1</sub> εντοπίστηκε στα 21-40cm βάθους και το στρώμα Y<sub>2</sub> στα 85-86,5 cm βάθους (Vougioukalakis et al., 2004).

## 2.6 Ηφαίστειο λάσπης Αθήνα.

Το ηφαίστειο λάσπης Αθήνα, το οποίο ανακαλύφτηκε κατά την διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος ANAXIMANDER, τον Μάιο του 2003 (Lykoysis et al.,



2004), βρίσκεται στη νοτιοανατολική πλαγιά του συμπλέγματος Αναξίμανδρος. Η τοπογραφία στο σύνολο της εμφανίζεται με περίπλοκη μορφή με απότομες πλαγιές, δύο απομονωμένες λεκάνες και δύο τοπογραφικές δομές που μοιάζουν σαν βουνά κατά μήκος της κορυφής του υψώματος, το οποίο χωρίζει τις δύο λεκάνες. Οι δύο δομές-βουνά παρουσιάζουν τουλάχιστον δύο εμφανείς κορυφές σε βάθος 1800m, με σχετικά μεγάλο ύψος των 10-100m. Από τις δύο κορυφές στα βόρεια της δομής αυτής ανακτήθηκαν στο σύνολο 4 πυρήνες από γεωτρήσεις. Τα τυπικά λατυποπαγή λάσπης που εμφανίζονται στους πυρήνες από την νότια περιοχή και την βόρεια περιοχή της κορυφής, επιβεβαίωσαν την ενεργή ηφαιστειότητα στην περιοχή και την ύπαρξη ενεργών διαρροών μεθανίου. Από βάθος 1798m ανακτήθηκε ένας πυρήνας από την νότια κορυφή, ο οποίος περιείχε 1m λατυποπαγών λάσπης μαζί με γκριζωπά υλικά σε συνδυασμό με γωνιώδεις και υπογωνιώδεις κλάστες ιλυόλιθων, διαφορετικών λιθολογικών διαστάσεων της τάξεως 0,5-2,5cm. Στο μέσο τμήμα του ιζηματογενούς πυρήνα της γεώτρησης, εμφανίζεται πορώδες υλικό με απελευθέρωση αερίων. Η δομή με μορφή σούπας που περιέχει μεγάλα ποσοστά νερού και εμφανίζεται στην μέση της πυρηνοληψίας, υποδηλώνει τον διαχωρισμό των υδριτών. Ωστόσο, στο ηφαιστειο λάσπης Αθήνα δεν έγινε συλλογή υδριτών, πιθανώς εξαιτίας της περιορισμένης έκτασης των πυρηνοληψιών. Στον πυρήνα των ιζημάτων που συλλέχτηκαν από την βόρεια κορυφή, εμφανίζεται μια λεπτή φλέβα πάχους 2-3cm από οξειδωμένα πελαγικά ιζήματα (Lykoysis et al., 2008). Ο πυρήνας που συλλέχτηκε από βάθος 1783m αποτελούνταν κυρίως από θραύσματα μιας αυτόχθονης ανθρακικής κρούστας, από bivalves (*Luconoma Kazani*) και θερμούς αγωγούς, οι οποίοι αποτελούν χαρακτηριστικό των ενεργών περιοχών με δραστηριότητα (Salas and Woodside, 2002). Αυτό υποδεικνύει ότι στη βόρεια κορυφή είναι πιθανό να συνέβησαν εκρήξεις λατυποπαγών λάσπης τα τελευταία 0,5-1 kyrs, σίγουρα όμως απαιτούνται περαιτέρω έρευνες στην περιοχή (Lykoysis et al., 2008).



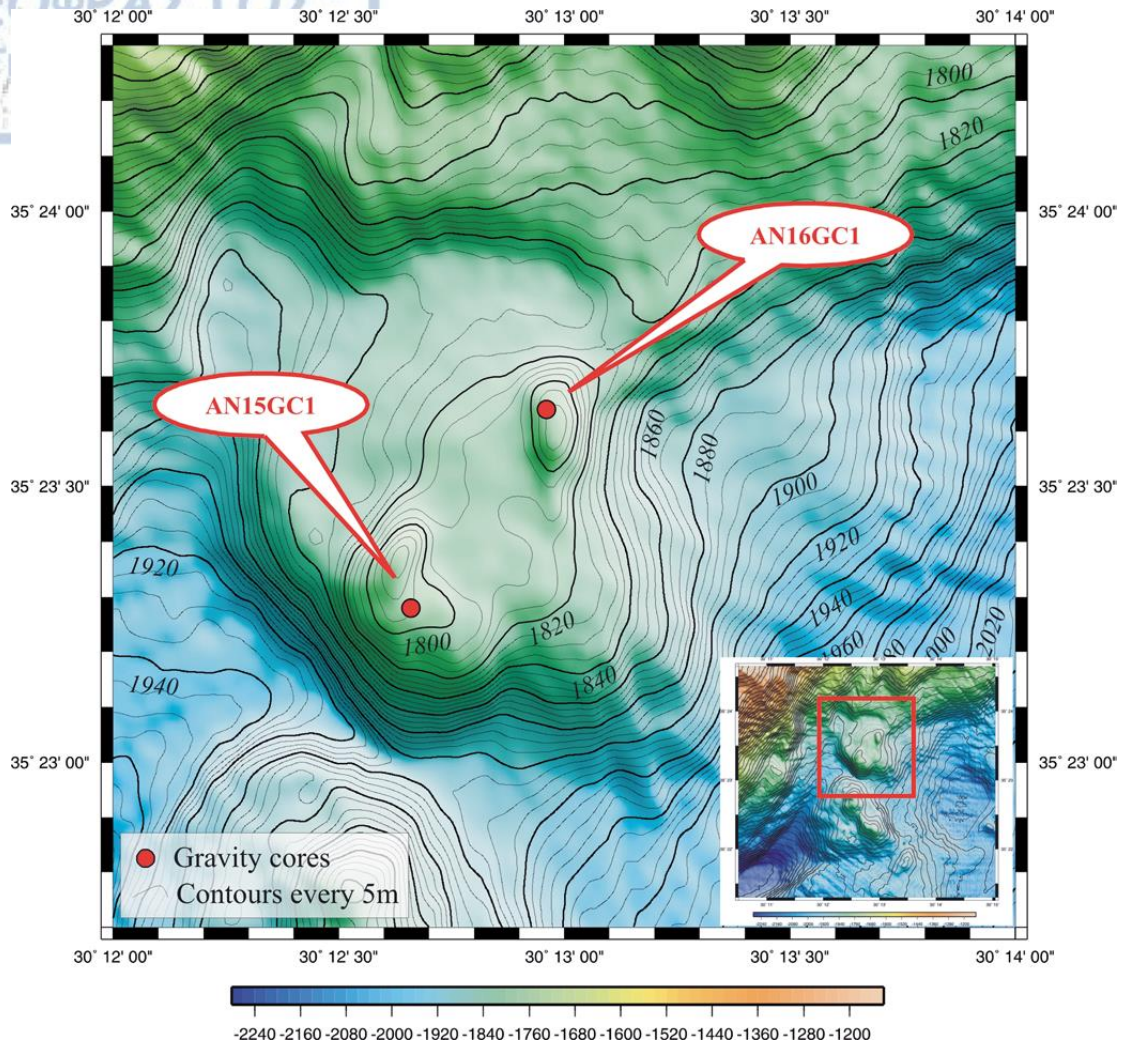
30. Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής του ηφαιστείου λάσπης Αθήνα με τμήμα του πυρήνα που συλλέχτηκε από την υποδεικνυόμενη με βέλος τοποθεσία. Ο πυρήνας δείχνει μια πιθανή περιοχή αφυδάτωσης με εξαέρωση υδριτών (Lykoysis et al., 2008).



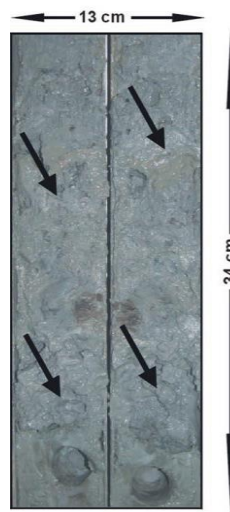
Στην ερευνητική αποστολή αυτή, διενεργήθηκε εκτεταμένη έρευνα στην περιοχή του συμπλέγματος Αναξίμανδρος με αποτέλεσμα την ανακάλυψη του νέου ηφαιστείου λάσπης Αθήνα. Η πολυδεσμική βαθυμετρική παρατήρηση που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του ηφαιστείου λάσπης Αθήνα, διενεργήθηκε με τη βοήθεια του σκάφους Aegeo του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών, χρησιμοποιώντας το σύστημα SEABEAM 2120. Ο βαθυμετρικός χάρτης του ηφαιστείου λάσπης Αθήνα δημιουργήθηκε με ένα δίκτυο μεσοδιάστασης 20m και τοποθετήθηκε στο Μερκατορικό σύστημα προβολής στις 35° Βόρεια, με ισοϋψείς των 5m. Ένας χάρτης πυκνότητας οπισθοσκέδασης δημιουργήθηκε μετά την εφαρμογή της γωνιακής διόρθωσης σε ξεχωριστές ζώνες και δείχνει τα διορθωμένα δεδομένα με 20m μεσοδιαστήματος. Τα ιζηματογενή δείγματα προέρχονται από επιλεγμένες περιοχές με υψηλή οπισθοσκέδαση με την χρήση του μηχανισμού δειγματοληψίας Benthos. Κύρια στοιχεία και ιχνοστοιχεία μετρήθηκαν με X-Ray Fluorescence Spectrometer Philips PW2400. Χρησιμοποιήθηκε ακόμα το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM Philips XL20 με ενεργειακό φασματόμετρο διασποράς για τη μικροανάλυση της ανθρακικής κρούστας (Lykousis et al., 2004).

Ο συνδυασμός της τρισδιάστατης μορφολογίας του υπόβαθρου σε συνδυασμό με την πυκνότητα της οπισθοσκέδασης των πολυδεσμικών ανακλάσεων, αποκάλυψε πολλές περιοχές με πιθανές δομές ηφαιστείων λάσπης. Οι περιοχές με πυκνή οπισθοσκέδαση και εξάρσεις συνδέονται με ροές λατυποπαγών λάσπης, οι οποίες σχηματίζουν ροές προερχόμενες από εκρήξεις λάσπης με κλάστες και πιθανώς ιζήματα με περιεκτικότητα υδριτών. Από τα τυπικά λατυποπαγή λάσπης που βρέθηκαν στους πυρήνες που συλλέχθηκαν στα νοτιοανατολικά (AN-16GC) και στις βορειοανατολικές κορυφές (AN-16GC) του συμπλέγματος Αναξίμανδρος, επιβεβαιώθηκε η ηφαιστεϊότητα και η ύπαρξη μεθανίου που αναβλύζει στην περιοχή. Η δομή αυτή ονομάστηκε ηφαιστείο λάσπης Αθήνα (Lykousis et al., 2004).

Ο πυρήνας AN-15GC που ανακτήθηκε από βάθος 1798m, έχει μήκος 1m και παρουσιάζει λατυποπαγή λάσπης με γκριζωπά υλικά τα οποία έχουν γωνιακά και ημιγωνιακά κλαστικά υλικά λάσπης, διαφορετικών λιθολογικών μορφών και μεγεθών της τάξεως 0,5-2,5cm. Εμφανίζονται ακόμα πορώδεις δομές με απελευθέρωση αερίων στα κατώτερα και μεσαία στρώματα της πυρηνοληψίας των ιζημάτων. Ωστόσο, το πιο σημαντικό υλικό που έδειξε την ύπαρξη υδριτών και την εξαέρωσή τους, ήταν τα υλικά μορφής 'σούπας' που φαίνονται στη μέση του πυρήνα (Εικόνα 32). Αυτή η διάλυση των δομών με υδρίτες, υποδεικνύει την παρουσία των υδριτών είτε στα σχετικά βαθύτερα στρώματα, είτε ότι αυτοί βρίσκονται διασκορπισμένοι με την μορφή τόσο μικρών κόκκων, που δεν διατηρήθηκαν κατά την αλλαγή της πίεσης και θερμοκρασίας όταν ο πυρήνας ανέβηκε στην επιφάνεια. Τα λατυποπαγή λάσπης καλύπτονται από μια λεπτή φλέβα πάχους 2-3cm οξειδωμένων πελαγικών ιζημάτων. Αυτό υποδεικνύει ότι η περιοχή είναι ανενεργή ως προς την έκρηξη λατυποπαγών λάσπης για τα τελευταία 0,5-1 ka (Lykousis et al., 2004).



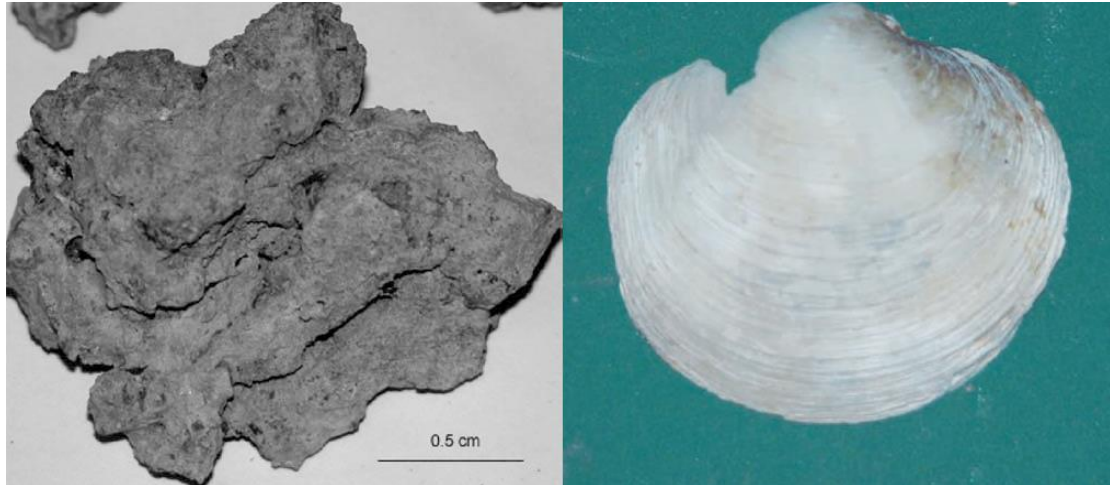
31. Αναλυτικός πολυδεσμικός χάρτης των κορυφών από όπου διενεργήθηκαν οι δειγματοληψίες στην περιοχή του ηφαιστείου λάσπης Αθήνα. Η τοποθεσία του ηφαιστείου στην ευρύτερη περιοχή του συμπλέγματος Αναξίμανδρος υποδεικνύεται στο κόκκινο τετράγωνο στον περικλειόμενο χάρτη κάτω δεξιά (Lykousis et al., 2004).



32. Τμήμα του ιζηματογενούς πυρήνα AN-15GC με τυπικά λατυποπαγή λάσπης και την δομή με μορφή 'σούπας' που οφείλεται στην εξαέρωση των υδριτών (μαύρα βέλη) (Lykousis et al., 2004).

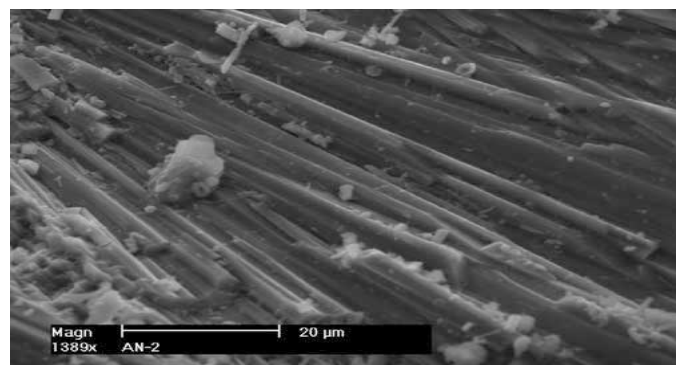


Ο πυρήνας AN-16GC ο οποίος ανακτήθηκε σε βάθος 1783m, αποτελείται κυρίως από θραύσματα μιας αυτόχθονης ανθρακικής κρούστας (Εικόνα 33), δίθυρα και θερμούς σωλήνες. Στην κορυφή του πυρήνα εμφανίζονται ολόκληρα κελύφη των δίθυρων *Lucinoma Kazani* (Εικόνα 33) (Lykousis et al., 2004). Το μαλάκιο αυτό είναι διαδεδομένο στις βενθικές κοινότητες της Ανατολικής Μεσογείου και συνδέεται με κρύες φλέβες διαρροής (Salas and Woodside 2002).



33. Αριστερά: Συμπαγές θραύσμα ανθρακικής κρούστας με πόρους και σωληνοειδείς μορφές που αποτελούν περιοχές διαφυγής του μεθανίου. Δεξιά: Κέλυφος από κοινότητες μαλάκιων κρύων φλεβών (δίθυρο *Lucinoma Kazani*) (Lykousis et al., 2004).

Η ανάλυση των κύριων στοιχείων στα θραύσματα της ανθρακικής κρούστας (Εικόνα 35) υποδεικνύει ασβεστιτική ανθρακική σύσταση αντί για μια σύσταση ανθρακικού μαγνησίου. Η στοιχειακή ανάλυση ιχνοστοιχείων δείχνει περιεκτικότητα Στροντίου, η οποία συνδέεται με την παρουσία αραγωνίτη στην ανθρακική κρούστα (εικόνα 35) (Lykousis et al., 2004). Το εύρος των στοιχείων και των ιχνοστοιχείων στο ηφαίστειο λάσπης Αθήνα, είναι παρόμοια με τις μετρήσεις στις ανθρακικές καμινάδες στα ηφαίστεια λάσπης στον κόλπο του Cadiz (Magalhaes et al., 2002). Η ανάλυση SEM δείχνει ότι η ανθρακική κρούστα αποτελείται σχεδόν εξ'ολοκλήρου από καθαρούς κρυστάλλους αραγωνίτη σε παράλληλη με ημιπαράλληλη κατεύθυνση (Εικόνα 34). Παρόμοιας αλλά τυχαίας μορφής ταξινόμησης είναι και οι κρυστάλλοι αραγωνίτη που βρέθηκαν στα ηφαίστεια λάσπης στον κόλπο του Cadiz (Lykousis et al., 2004).



34. Εικόνα SEM τυπικών αραγωνιτικών κρυστάλλων από την ανθρακική κρούστα (Lykousis et al., 2004).



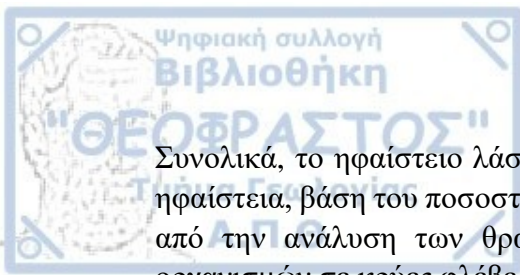
Μέρος του μεθανίου που παράγεται στα θαλάσσια ιζήματα μετατρέπεται σε CO<sub>2</sub> με αναερόβιες συνθήκες και καθιζάνει στους αυτόχθονες ασβεστόλιθους. Επιπρόσθετα, η καθίζηση είναι αποτέλεσμα μικροβιακής δραστηριότητας που σχετίζεται με ροές μεθανίου (Aloisi et al., 2002). Η πλειοψηφία των θραυσμάτων των ασβεστόλιθων από το ηφαίστειο λάσπης Αθήνα, είναι φτωχές, μέτριες συμπαγείς δομές και παρουσιάζουν πορώδεις ή σωληνοειδείς μορφές που υποδηλώνουν διαφυγή μεθανίου. Τα επιφανειακά θραύσματα του πάνω μέρους του πυρήνα εμφανίζουν μια κόκκινο-καφέ εξωτερική όψη ενώ τα ελαφρώς βαθύτερα εμφανίζουν ένα απαλό λευκό. Η ανάλυση EDS που έγινε με την χρήση του SEM, αποκάλυψε την ύπαρξη μεγάλου ποσοστού Fe, το οποίο δείχνει ότι οι διαφορές στον χρωματισμό είναι απόρροια της οξείδωσης στο πάνω μέρος του πυρήνα σε σύγκριση με την αναερόβιες συνθήκες στο κάτω μέρος του πυρήνα (Lykousis et al., 2004).

Sample	AN-2	AN-3
Sum	56.58	57.76
SiO <sub>2</sub>	4.64	5.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.12	2.33
TiO <sub>2</sub>	0.09	0.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.8	1.1
K <sub>2</sub> O	0.29	0.34
Na <sub>2</sub> O	0.42	0.35
CaO	42.76	43.74
MgO	5.38	4.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.039	0.041
MnO	0.031	0.024

35. Πίνακας ανάλυσης κύριων στοιχείων στην ανθρακική κρούστα (%), (Lykousis et al., 2004).

Sample	AN-1	AN-2	AN-3
S (%)	0.101	0.207	0.269
Cl (%)	0.170	0.281	0.092
V (ppm)	24.1	53.6	57.3
Cr (ppm)	34.1	34.8	38.7
Mn (ppm)	288.1	305.1	223.6
Co (ppm)	8.0	6.3	7.6
Ni (ppm)	27.1	34.6	42.0
Cu (ppm)	15.7	14.1	15.4
Zn (ppm)	21.2	25.5	33.0
As (ppm)	18.9	20.5	21.0
Br (ppm)	11.1	19.4	11.0
Rb (ppm)	1.1	2.5	0.5
Sr (ppm)	5498	6213	7244
Zr (ppm)	54.1	60.2	60.4
Mo (ppm)	1.1	5.7	8.5
Ba (ppm)	36.5	58.2	26.7
Pb (ppm)	9.1	8.0	8.3

36. Πίνακας ανάλυσης ιχνοστοιχείων της ανθρακικής κρούστας (Lykousis et al., 2004).

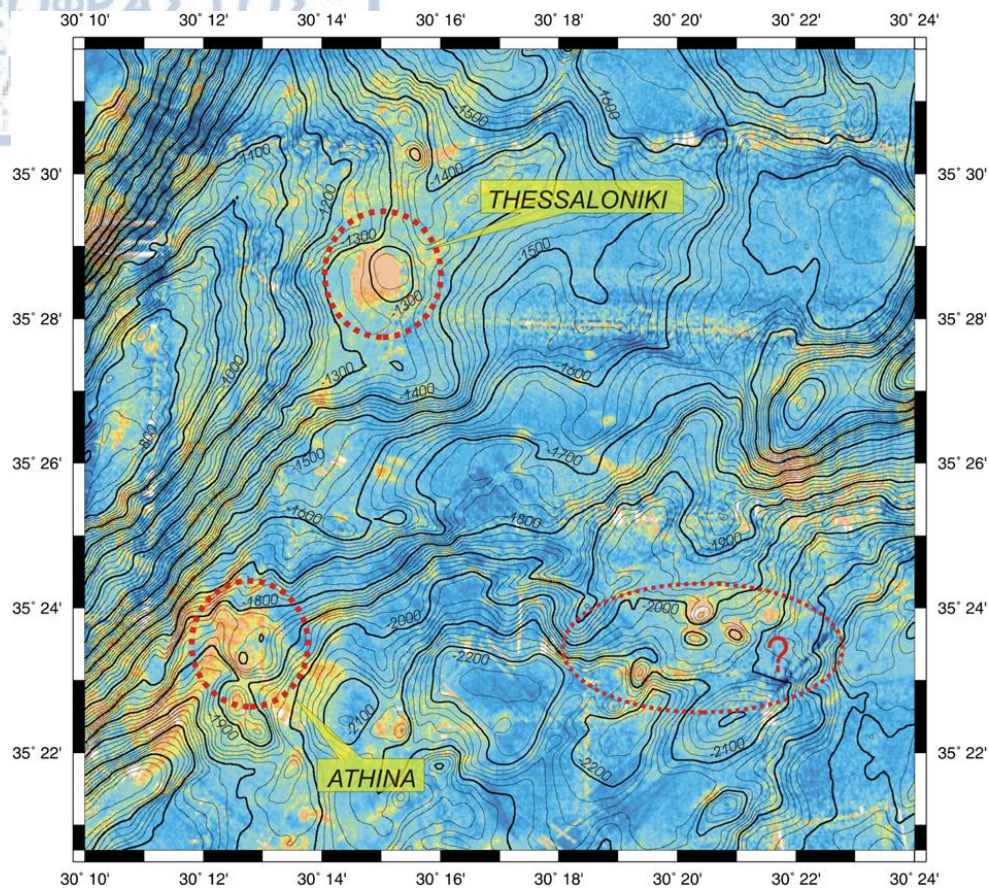


Συνολικά, το ηφαίστειο λάσπης Αθήνα, μελετήθηκε και συγκαταλέχτηκε στα ενεργά ηφαιστεια, βάση του ποσοστού της γκρι λατυποπαγούς λάσπης με αέρια που προέκυψε από την ανάλυση των θραυσμάτων της ανθρακικής φλέβας και των κοινωνικών οργανισμών σε κρύες φλέβες. Η διαπίστωση αυτή στηρίζει την παρουσία εκτεταμένης ηφαιστειότητας λάσπης στο σύμπλεγμα βουνών Αναξιμανδρος (Lykousis et al., 2004), όπως άλλωστε και στο ηφαίστειο λάσπης Αθήνα.

## 2.7 Ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη.

Στο σύμπλεγμα Αναξιμανδρος, τον Νοέμβρη του 2004 στη βορειοανατολική πλευρά του ηφαιστείου λάσπης Αθήνα, σε απόσταση 9Km κατά μήκος της ανατολικής πλαγιάς των βουνών Αναξιμένης και σε ένα βάθος 1320-1260m, βρίσκεται μια κυκλική δομή με ακτίνα 1,5Km που χαρακτηρίστηκε ως υποθαλάσσιο ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκης (Lykousis et al., 2008). Η δομή αυτή, χαρακτηρίστηκε ως πιθανό ηφαίστειο λάσπης εξαιτίας των υψηλών χαρακτηριστικών οπισθοσκέδασης που εμφάνισε κατά την πρώτη ερευνητική αποστολή (Lykousis et al., 2004) και επανεξετάστηκε και μελετήθηκε διεξοδικά κατά τη δεύτερη ερευνητική αποστολή, όπου και επιβεβαιώθηκε ως ενεργό ηφαίστειο λάσπης (Lykousis et al., 2008). Αυτή η δομή σε παλαιότερες ερευνητικές αποστολές δεν είχε εξερευνηθεί εξαιτίας του μικρού της μεγέθους παρόλο που το ANAXIPROBE ORETech σάρωσε την ανατολική εκείνη πλαγιά. Αποτελεί μια δομή υποθαλάσσιου λόφου σχήματος οβάλ, με τον μεγάλο άξονά του να είναι 1750m με απότομες κλίσεις και στα ανατολικά και στα βόρεια, σε μια περιοχή που εκτείνεται σε 1,67Km<sup>2</sup>. Στο εσωτερικό κομμάτι κοντά στην κορυφή της, η δομή γίνεται πιο κυκλική όπου ξεχωρίζουν συνολικά 3 εξάρσεις, οι δύο βρίσκονται στα δυτικά σε ύψος 1260m και η άλλη στα ανατολικά σε ύψος 1265m (Perissoratis et al., 2011). Στην περιοχή του ηφαιστείου λάσπης Θεσσαλονίκη, συλλέχτηκαν σε σύνολο 5 πυρήνες από γεωτρήσεις, όπου όλες επιβεβαίωσαν την ενεργή ηφαιστειότητά του. Δύο από του πυρήνες των ιζημάτων που συλλέχτηκαν, επιβεβαίωσαν την παρουσία υδριτών μεθανίου, κάνοντάς το σε σύνολο το τέταρτο ηφαίστειο λάσπης το οποίο έχει υδρίτες στη Μεσόγειο. Οι πυρήνες αυτοί περιέχουν όλοι 'σουπώδη' ιζήματα με μεγάλα ποσοστά νερού και αμελητέας ποσότητας λάσπης και κλαστών πετρωμάτων. Ακόμα, οι δομές όπου είχαν διαρροή υδριτών μεθανίου, ήταν ορατές σε όλη την έκταση του πυρήνα, ακόμα και όταν η λάσπη είχε κολλήσει στα εξωτερικά μέρη του σωλήνα της γεώτρησης. Τα διάσπαρτα κομμάτια νιφάδων μεθανίου σε όλο το υλικό του πυρήνα δείχνει μια πρόσφατη δραστηριότητα στο ηφαίστειο λάσπης (Lykousis et al., 2008).

Τα στοιχεία και τα δεδομένα που συλλέχτηκαν για το ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη, προέρχονται από τις δύο ερευνητικές αποστολές με το πλοίο Aegaeo το Μάιο του 2003 και τον Οκτώβρη-Νοέμβρη του 2004. Κατά τη διάρκεια της πρώτης αποστολής πραγματοποιήθηκε λεπτομερής βαθυμετρική ανάλυση και απεικόνιση οπισθοσκέδασης της περιοχής μελέτης, με την χρήση του τηλεκατευθυνόμενου βαθυσκάφους SEABEAM 2120 το οποίο λειτουργεί στα 20 KHz. Διαθέτει γωνιακό τομέα 150° με 159 ακτίνες και πλέγμα πλάτους από 7,5-11,5 φορές ανά βάθους νερού για βάθη 1-5 Km. Η πλοήγηση έγινε με την βοήθεια του Trimble 4000 GPS, παρέχοντας την θέση του πλοίου με ακρίβεια ± 10 m (Perissoratis et al., 2011). Ο βαθυμετρικός χάρτης του ηφαιστείου Θεσσαλονίκη, δημιουργήθηκε με πλέγμα ισοδιάστασης των 20m και αναπαραστάθηκε γραφικά με Μερκατορική προβολή σε κλίμακα 1:20.000 με ισοϋψείς των 5m. Τα ιζήματα συλλέχτηκαν με πυρήνες των 3m



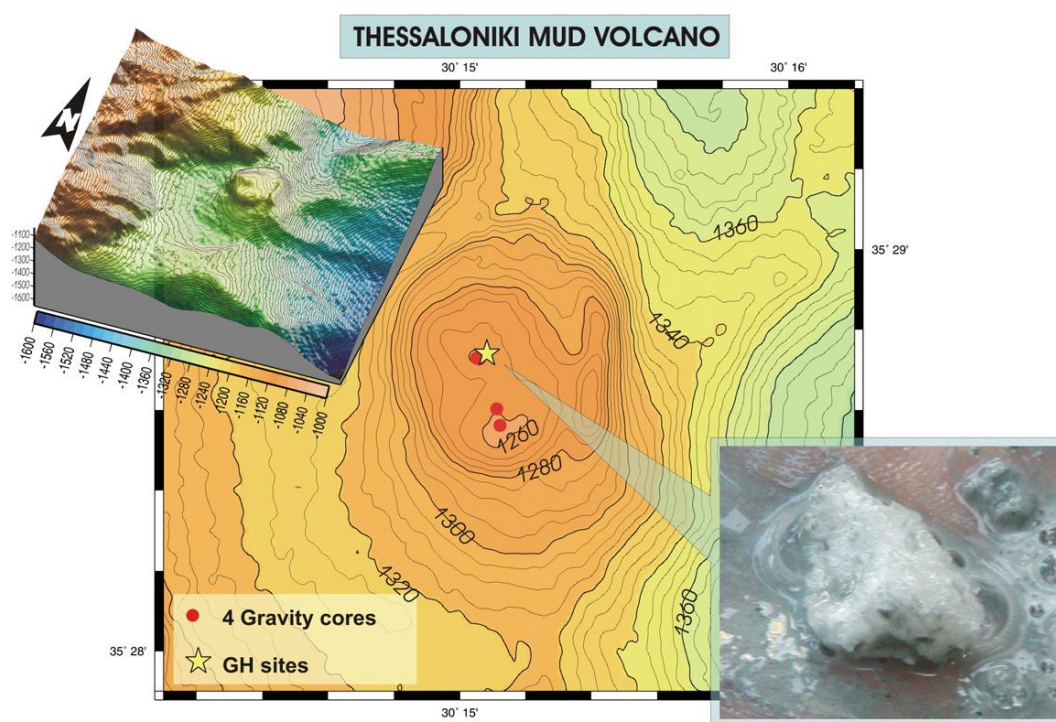
37. Πολυδεδεσμένος βαθυμετρικός και χάρτης οπισθοσκέδασης B-BΔ του ηφαιστειού λάσπης Άμστερνταμ, στον οποίο φαίνονται πλήθος δομών που μοιάζουν με βουνά με υψηλή ανακλαστικότητα που ταξινομήθηκαν ως πιθανές περιοχές ηφαιστειών λάσπης. Ο χάρτης διαθέτει λεπτομέρειες και πληροφορίες για τα ηφαιστεια λάσπης Αθήνα και Θεσσαλονίκη. Η Ισοδιάσταση είναι 20m (Lykousis et al., 2008).

με την χρήση του 73cm i.d. Benthos Instruments Gravity Core, με χωρισμένο από πριν 'μανίκι' έτσι ώστε να μειωθεί ο χρόνος που χρειάζεται για να ανοιχτούν και να ταξινομηθούν οι πυρήνες. Ο χρόνος που ήταν απαραίτητο να διασχίσουν οι πυρήνες από τον πυθμένα σε βάθος 2000m μέχρι την επιβίβασή τους στο πλοίο, μειώθηκε στα 20-25 λεπτά για να διασφαλιστεί η μικρότερη δυνατή εξαέρωση των υδριτών και διατάραξη των ιζημάτων. Μόλις οι πυρήνες ανοίγονταν, γινόταν η μέτρηση την θερμοκρασίας τους και οι υδρίτες του δείγματος που συλλεγόντουσαν τοποθετούνταν σε ψυγείο στους -70 °C (Perissoratis et al, 2011).

Η πίεση των πυρήνων πραγματοποιήθηκε με το όργανο APCA (Autoclave Piston Corer Anaximander), το οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Βερολίνου στα πλαίσια του προγράμματος ANAXIMANDER (Amann et al, 2000). Το APCA έχει τη δυνατότητα να ανακτήσει πυρήνες διαμέτρου 10cm και μήκους μέχρι και 250cm σε βάθη τα οποία φτάνουν μέχρι τα 2500m. Ακόμα διατηρεί τους ιζηματογενείς πυρήνες σε σταθερές συνθήκες πίεσης (Amann et al, 2000). Κατά τη διάρκεια της ερευνητικής αποστολής, όταν οι πυρήνες έφταναν στο κατάστρωμα του πλοίου, ο αυτόκλειστος πυρήνας τοποθετούνταν σε κάθετη θέση, ώστε να ρυθμίζεται η εξαέρωση και έμπαινε σε παγωμένο νερό ώστε να αποφευχθεί η θέρμανση εξαιτίας της έκθεσής του στο κατάστρωμα. Το αέριο που προερχόταν από



την εξαέρωση συλλεγόταν με τη βοήθεια μιας βαλβίδας όπως το έχει περιγράψει ο Heeschen et al. (2006) αλλά και άλλοι επιστήμονες. Η πίεση μετριόταν συνεχώς με μόνιτορ και η αυξανόμενη στήλη του απελευθερωμένου αερίου μετριόταν από κυλίνδρους μετατροπής. Το αέριο συλλεγόταν μέσα από ένα σύστημα με τρεις στο σύνολο βαλβίδες οι οποίες το πήγαιναν για ανάλυση στο εργαστήριο (Amann et al, 2000).



38. Τρισδιάστατος και μικροτοπογραφικός χάρτης της κορυφής του ηφαιστείου λάσπης Θεσσαλονίκη. Η ισοδιάσταση είναι 5m. Φαίνονται οι περιοχές των γεωτρήσεων και η περιοχή όπου εντοπίστηκαν δείγματα υδριτών μεθανίου (κίτρινο αστερί). Η φωτογραφία δείχνει μικρό κομμάτι υδρίτη το οποίο εξαερώνεται σταδιακά (Lykousis et al, 2008).

Συνολικά, από το ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη πραγματοποιήθηκαν στο σύνολο 5 πυρηνοληψίες, τέσσερις οι οποίες ήταν με πυρήνες βαρύτητας (AX46-GC1, AX47-GC1, AX48-GC1, AX49-GC1), και ένας αεροστεγής πυρήνας (autoclave core) (AX49-AP1). Η τοποθεσία των πυρηνοληψιών έγινε από παρόμοια ιζηματογενή περιβάλλοντα στα δύο δυτικά υψώματα της κορυφής του ηφαιστείου λάσπης Θεσσαλονίκη, σε βάθος από 1263 μέχρι 1265m. Στον παρακάτω πίνακα (Εικόνα 39), παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες σχετικά από τις τοποθεσίες των πυρηνοληψιών και τα χαρακτηριστικά τους, με επιπρόσθετες παρατηρήσεις που έγιναν από το κατάστρωμα του πλοίου



προκειμένου να διευκρινιστεί αν εμπεριέχουν υδρίτες ακόμα και αν αυτοί δεν φαίνονται σε πρώτη φάση, όπως για παράδειγμα όταν οι θερμοκρασίες του ιζήματος είναι κάτω από το όριο, περίπου 13,7 °C, όπου λαμβάνει χώρα η εξαέρωση υδριτών (Perissoratis et al, 2011).

Core no.	Latitude	Longitude	Water depth (m)	Sediment temperature	Length (cm)	G.H. presence (visual identification)	Smell of H <sub>2</sub> S gas
AX46-GC1	35°28.603'	30°15.113'	1263	14,4°C	110	No	Yes
AX47-GC1	35°28.562'	30°15.123'	1265	12,3°C	167	No	Yes
AX48-GG1	35°28.729'	30°15.052'	1264	8.4–10.7°C	130	Yes	Yes
AX49-GC1	35°28.728'	30°15.060'	1264	No data	228	Yes	Yes

(b)

Core no.	Latitude	Longitude	Water depth (m)	Length (cm)	Pressure (bars)	GH presence	Gas vol. (litres)
AX49-API	35°28.728'	30°15.060'	1.264	0.70	105	Yes	3.1

39. Πίνακας μετρήσεων από τους πυρήνες των γεωτρήσεων στο ηφαιστειο λάσπη Θεσσαλονίκη. (α) πυρήνες βαρύτητας, (b) αεροστεγής πυρήνας (Perissoratis et al, 2011).

Η γενική εικόνα που παρουσιάζουν οι πυρήνες στην περιοχή του ηφαιστείου λάσπη Θεσσαλονίκη, εμφανίζει τα τυπικά λατυποπαγή λάσπη με πολύ φτωχή ταξινόμηση ιζημάτων με λασπώδη υφή υλικών, με γωνιώδεις προς υπογωνιώδεις κλάστες ξενολίθων, διαφορετικών συστατικών και διαστάσεων κόκκων (0,5 – 2,5cm). Οι κλάστες υποδεικνύουν μια γεωλογική μονάδα στην οποία τα υπερπιεσμένα ιζήματα τοποθετήθηκαν στο υπόβαθρο σαν λατυποπαγή λάσπη πριν τις ακολουθίες της έκρηξης (Perissoratis et al, 2011). Δομές με πορώδη υφή σχετιζόμενες με αέρια εντοπίζονται πολύ συχνά στα ιζήματα αυτά, μιας και οι εξαερωμένοι υδρίτες σχετίζονται με τέτοια ιζήματα, τα οποία εξαερώνονται κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας τους ή μερικά λεπτά μετά την επιβίβασή τους στο σκάφος, όπου οι περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης καθιστούν τους αέριους υδρίτες ασταθείς (Kvenvolden, 1993). Παρόμοιες δομές έχουν παρατηρηθεί και σε άλλα ηφαιστεια λάσπη στην περιοχή του συμπλέγματος Αναξίμανδρος (Lykousis et al, 2009).

Ο πυρήνας AX46-GC1 ανακτήθηκε από την νότια κορυφή σε βάθος 1263m και έχει μήκος 119cm. Τα πρώτα 5cm από την κορυφή αποτελούνται από κίτρινο-γκρι οξειδωμένα στρώματα λάσπη με ανεπαίσθητα ελασματικά, διασκορπισμένα υλικά κλαστών με διάμετρο μικρότερη των 1.5cm. Υπάρχει μια σταδιακή αλλαγή στο χρώμα στα επόμενα 5-19cm προς τα κάτω, σε ένα τμήμα με πρασινο-γκρί συμπυκνωμένη λάσπη, η οποία περιέχει και λίγους κλάστες με διάμετρο μέχρι και 3cm. Το επόμενο τμήμα από τα 19 μέχρι τα 119cm είναι ίδιου χρώματος με το προηγούμενο τμήμα, αλλά με μεγάλους κλάστες διαμέτρου μέχρι και 5cm οι οποίοι αυξάνονται στα τελευταία 10cm. Επιπρόσθετα παρατηρούνται ενδείξεις εξαέρωσης των υλικών με δυνατές οσμές των υδριτών. Η θερμοκρασία των ιζημάτων κατά το άνοιγμα του σωλήνα του πυρήνα ήταν 14,4 °C λίγο παραπάνω από την θερμοκρασία του θαλάσσιου πυθμένα ενώ δεν ανιχνεύτηκαν υδρίτες (Perissoratis et al, 2011).

Από την ίδια νότια κορυφή, σε απόσταση 80m προς τα βόρεια και σε βάθος 1265m, ανακτήθηκε ο πυρήνας AX47-GC1 με μήκος 167cm. Η θερμοκρασία των ιζημάτων κατά το άνοιγμα του πυρήνα ήταν 12,3 °C. Στην κορυφή του πυρήνα παρατηρήθηκε

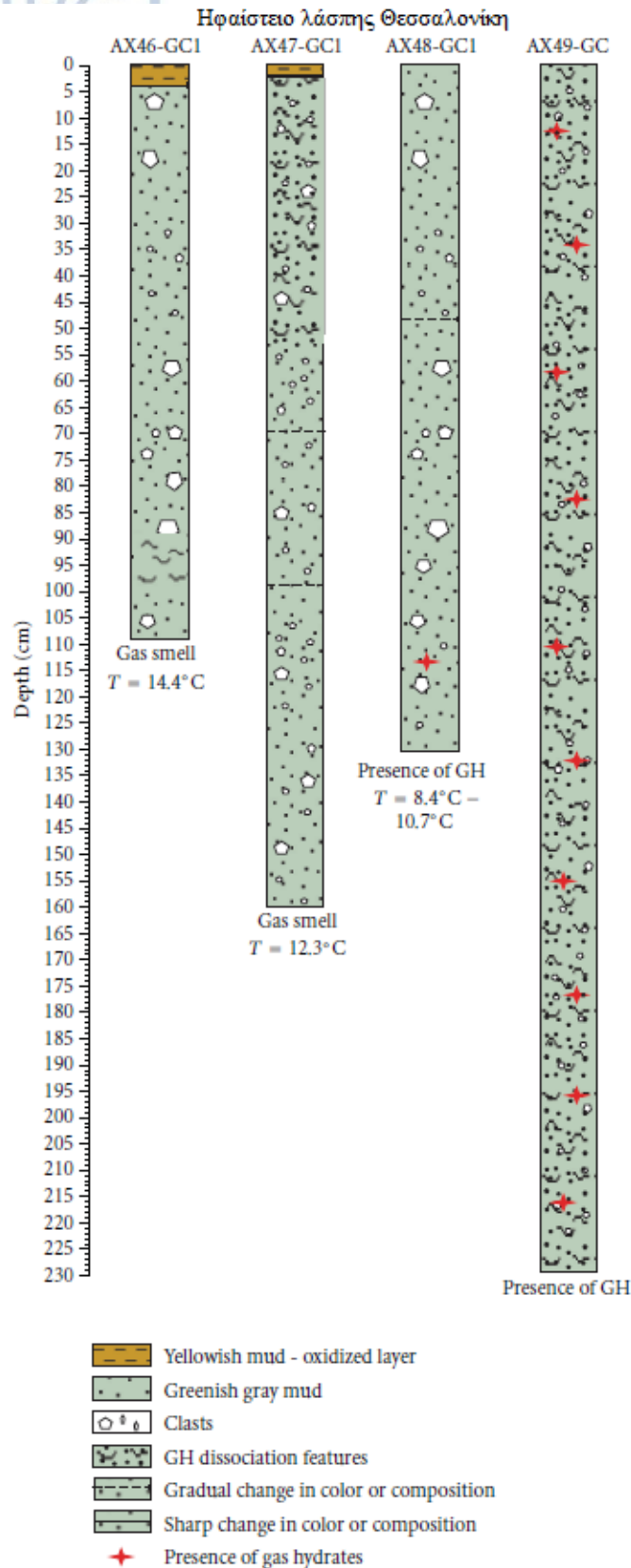
ένα λεπτό οξειδωμένο στρώμα πάχους 3cm κίτρινο-γκρι χρώματος, το οποίο ακολούθησε ένα σκούρο τμήμα μήκους 3-78cm πράσινο-γκρι λάσπης, με περιστασιακούς κλάστες. Τα υλικά εμφανίζονται με περισσότερο 'σουπόδη' μορφή στα πρώτα 41cm και στη συνέχεια γίνονται πιο 'στυφά' με μια μειούμενη ελασματική μορφή στα 64 με 65cm. Τα επόμενο τμήμα του πυρήνα, στα 78-167cm, περιέχει μεγάλους κλάστες διαμετρήματος έως και 2,5cm και δύο σκοτεινού χρώματος ελασματικά στρώματα στα 79-85cm και στα 96-99cm. Τα ιζήματα μετατρέπονται σε πιο στυφά στον πάτο της στήλης ενώ δεν ανιχνεύτηκαν υδρίτες στην γεώτρηση αυτή (Perissoratis et al, 2011).

Στη βόρεια κορυφή του ηφαιστείου λάσπης ανακτήθηκε ο πυρήνας AX48-GC1 από βάθος 1264cm. Η θερμοκρασία των ιζημάτων στο κατάστρωμα μετρήθηκε ότι ήταν από 8,4 έως 10,7 °C. Στην κορυφή του πυρήνα δεν παρατηρήθηκαν οξειδωμένα στρώματα, γεγονός που δείχνει μια πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα την περιοχή μιας και το άνω μέρος των λατυποπαγών στην περιοχή δεν είχε αρκετό χρονικό διάστημα να οξειδωθεί ή να επικαλυφτεί από τα τυπικά ημιπελαγικά ιζήματα του βυθού. Σε όλο το μήκος του πυρήνα παρατηρήθηκαν πράσινα-γκρι υλικά λάσπης με διάσπαρτα μεγάλα πετρώματα και κλάστες. Οι αέριοι υδρίτες στον πυρήνα αυτόν, εντοπίστηκαν κυρίως ανάμεσα στα 110 με 120cm όπου η απομάκρυνσή τους δημιούργησε πολλές δομές εξαέρωσης που οφείλονται για τα μαλακή και πολλές φορές 'σουπόδη' υφή των ιζημάτων (Εικόνα 40). Τα περισσότερα υλικά των κλαστών και των πετρωμάτων εμφανίζονται στα κατώτερα τμήματα του πυρήνα όπου τα ιζήματα γίνονται πιο στυφά σε βάθος 55cm (Perissoratis et al, 2011).



40. Κομμάτι του πυρήνα AX48-GC1 στο μήκος 99-124cm. Χαρακτηριστική είναι η μαλακή υφή του κομματιού στα 110-120cm εξαιτίας της περιεκτικότητας του σε υδρίτες (Perissoratis et al, 2011).

Ο πυρήνας AX49-GC1 αποτελεί τον μακρύτερο που συλλέχθηκε (μήκος 228cm), και προέρχεται και αυτός από την ίδια βόρεια κορυφή στην ίδια τοποθεσία και βάθος με τον πυρήνα AX48-GC1. Περιέχει γκρι λάσπη με αφρώδη υφή και σύσταση, μαζί με πολλές δομές εξαέρωσης οι οποίες δημιουργήθηκαν από την παρουσία των υδριτών που εμφανίζονται κατά μήκος όλου του μήκους του πυρήνα και την διαφυγή τους (Perissoratis et al, 2011).



41. Περιγραφή των πυρήνων βαρύτητας του ηφαιστείου λάσπης Θεσσαλονίκη (Perissoratis et al, 2011).

Στους πυρήνες βαρύτητας που ανακτήθηκαν από το ηφαιστειο λάσπης Θεσσαλονίκη, έγινε γεωθερμική ανάλυση και στις ροές λάσπης (ανάλυση ιχνοστοιχείων) και στους κλάστες (ανάλυση κύριων στοιχείων). Τα αποτελέσματα των ιχνοστοιχείων στις ροές λάσπης των δύο πυρήνων βαρύτητας (Εικόνα 41 α) παρουσίασαν οργανικό άνθρακα ( $C_{org}$ ),  $Na_2O$ , Mg, Rd, Sr και Cu τα οποία δεν μεταβάλλονται προς τα κάτω μέρη του πυρήνα. Ο συνολικός άνθρακας ( $C_{tot}$ ) βρίσκεται σε υψηλότερα ποσοστά στο πάνω μέρος του πυρήνα από ότι στα κατώτερα τμήματα, σε περιοχές όπου το Zn και το S εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στην κορυφή του πυρήνα από ότι στο κάτω μέρος. Στον πυρήνα της γεώτρησης AX48-GC1 το κύριο στοιχείο είναι ο ασβεστίτης όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την παρουσία άλλων κύριων στοιχείων και το χαμηλό ποσοστό του δολομίτη, υποδεικνύουν την πρόωρη διατάραξη του υπόβαθρου από αποθέσεις φλύσχη ηλικίας Μειοκαινίου στα βόρεια της περιοχής αυτής. Το αποτέλεσμα αυτό επιπρόσθετα, υποδεικνύει ότι τα ιζήματα του ηφαιστειού λάσπης Θεσσαλονίκη είναι συγκρίσιμα με υλικά τα οποία έχουν ανακτηθεί από άλλα ηφαιστεια λάσπης στην Ανατολική Μεσόγειο όπως σε αυτό της Αθήνας αλλά και σε αυτά στον κόλπο του Cadiz (Perissoratis et al, 2011).

Η περιεκτικότητα του μεθανίου μετρήθηκε στους δύο βαρυτικούς πυρήνες. Στον πυρήνα AX47-GC1 δεν μετρήθηκαν αέριοι υδρίτες αλλά τα ιζήματα παρατηρήθηκαν ως υγρά με υφή σούπας. Αντίθετα, στον πυρήνα AX49-GC1 παρατηρήθηκαν υδρίτες κατά την παρατήρησή τους στο κατάστρωμα του πλοίου. Οι μετρήσεις μεθανίου στον πυρήνα AX47-GC1 ήταν της τάξεως 2800  $\mu\text{mol/Kg}$  υγρού ιζήματος, με το μέγιστο να φτάνει στα 4000  $\mu\text{mol/Kg}$  υγρού ιζήματος μέσα στον πυρήνα σε βάθος 100cm μέσα στον πυρήνα. Η συγκέντρωση του μεθανίου και στα δύο υψώματα της κορυφής στα δυτικά του ηφαιστειού λάσπης εμφανίζεται μεγάλη, παρά τη διαφοροποίηση της περιεκτικότητας του μεθανίου στα ιζήματα. Ωστόσο, εξαιτίας της εξαέρωσης που εμφανίζουν αυτοί οι συμβατικοί πυρήνες κατά την ανάκτησή τους και την συνεχή απώλεια του μεθανίου μέχρι και σε ποσοστό της τάξεως 90%, δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε σημαντική διαφοροποίηση στην συγκέντρωση του μεθανίου μιας και οι συγκεντρώσεις εμφανίζονται πού χαμηλότερες από τον κορεσμό του μεθανίου κατά την παρουσία των υδριτών (περίπου 100  $\text{mmol/Kg}$  σε πορώδες νερό). Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αυτή η παρατήρηση της εμφάνισης του μεθανίου στον έναν πυρήνα αλλά όχι στον άλλον πυρήνα, παρόλο που η περιεκτικότητα του μεθανίου είναι ίδια, να οφείλεται στο μέγεθος των κρυστάλλων του μεθανίου, με τους μικρότερους κρυστάλλους να εξαφανίζονται πιο γρήγορα (Perissoratis et al, 2011).

Η σταθερή συγκέντρωση του μεθανίου στον αεροστεγή πυρήνα, στα βόρεια του ηφαιστειού λάσπης Θεσσαλονίκη με όνομα AX49-API, υπολογίστηκε περίπου σε πορώδες νερό 180  $\text{mmol/Kg}$  σε βάθος όπου δεν υπάρχει παρουσία θειούχων. Για να υπολογιστεί ο όγκος των υδριτών από την παρουσία του μεθανίου, σε σχέση με τον όγκο του πυρήνα, το σύνολο του αερίου που συλλέχτηκε, συσχετίστηκε με τον όγκο της στήλης από το βάθος του πυρήνα έως τη ζώνη ελάττωσης των θειικών, δεδομένου ότι στο βάθος αυτό υπάρχει μια ομοιόμορφη διανομή του διαλυμένου και συσχετισμένου με  $CH_4$  μεθανίου. Στον πυρήνα AX47-GC1 οι υδρίτες καταλαμβάνουν όγκο σε ποσοστό 0,7% επί του συνολικού όγκου. Το αέριο εμφανίζεται ως σχεδόν διαλυμένο προπάνιο και βουτάνιο επιτρέποντας ωστόσο τον σχηματισμό των υδριτών. (Perissoratis et al., 2011).



(a)

Core	Sample depth (cm)	C <sub>tot</sub> %	C <sub>org</sub> %	S %	Na <sub>2</sub> O %	Mg %	Sr %	Rb %	Zn ppm	Cu ppm
AX48GC1	9 cm	2,57	0,37	0,27	1,48	0,142	0,022	0,08	87	56
"	30 cm	2,05	0,35	0,44	1,75	0,146	0,019	0,10	94	78
"	65 cm	2,20	0,32	0,48	1,62	0,134	0,027	0,08	100	74
"	110 cm	1,70	0,32	0,40	1,75	0,137	0,023	0,08	104	78
AX49GC1	12 cm	2,85	0,44	0,58	1,75	0,151	0,024	0,09	89	73
"	50 cm	2,25	0,48	0,62	1,75	0,150	0,023	0,09	102	72
"	70 cm	1,45	0,39	0,48	1,75	0,158	0,016	0,08	86	69
"	105 cm	1,75	0,43	0,58	1,62	0,146	0,023	0,08	94	76

(b)

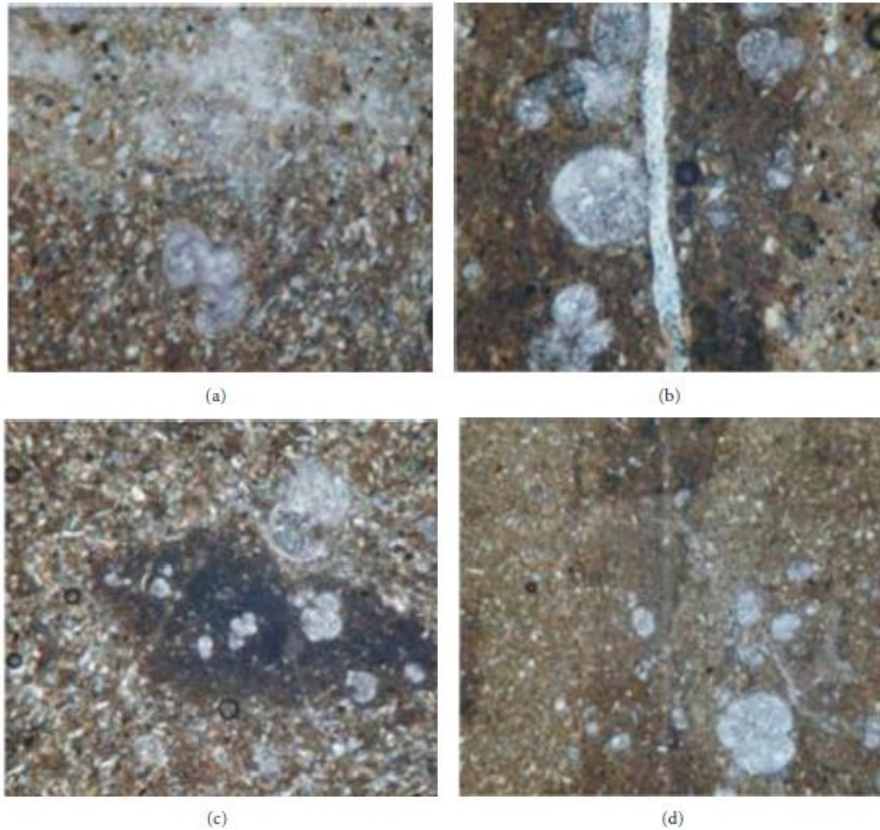
Mineral	%
Calcite	57
Quartz	12
Montmorillonite	5
Kaolinite	8
Glaucophane	4
Albite	6
SiO <sub>2</sub>	5
Dolomite	3

42.(a) Πίνακας ανάλυσης ιχνοστοιχείων από τις ροές λάσπης στους πυρήνες AX48-GC1 και AX49-GC1, (b) πίνακας ανάλυσης κύριων στοιχείων (%) από τους κλάστες πετρωμάτων στον πυρήνα AX48-GC1 (Perissoratis et al, 2011).

Κατά τη μελέτη των λατυποπαγών λάσπης και των κλαστών των πετρωμάτων, η παρουσία των κίτρινο-καφέ οξειδωμένων στρωμάτων στα πρώτα εκατοστά στα πάνω στρώματα των δύο πυρηνοληψιών βαρύτητας, στα οποία δεν παρατηρήθηκαν υδρίτες, δείχνουν πιθανώς ότι οι δύο περιοχές αυτές είναι ανενεργές και δεν παρουσιάζουν ηφαιστειακή δραστηριότητα τα τελευταία μερικά εκατοντάδες χρόνια. Τα λατυποπαγή τα οποία προέρχονται από πρόσφατες εκρήξεις χαρακτηρίζονται από συμπυκνωμένα ιζήματα γκρι χρώματος και από έλλειψη οξειδωμένων καλυμμάτων ημιπελαγικών ιζημάτων (Perissoratis et al., 2011). Συχνά, είναι δυνατό να γίνει μια εκτίμηση της ηλικίας της έκρηξης χρησιμοποιώντας το πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων και τη μέτρηση του ρυθμού ιζηματογένεσης, η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι 2-5 cm/ka (Ioakim et al., 2005). Η σύσταση της λάσπης στο σύνολο των πυρήνων είναι κυρίως λασπώδεις πηλοί με θραύσματα άμμου σε ποσοστό 5-7% και κακά ταξινομημένης άμμου μεγέθους 6,2-7,8 phi, η οποία περιέχει χερσογενή υλικά και μικρά στοιχεία βιογενετικών υλικών, κυρίως πλαγκτονικά foraminifera (Perissoratis et al., 2011).

Οι κλάστες που προέρχονται από την ακολουθία της έκρηξης ενός ηφαιστείου λάσπης, αποτελούνται από ένα χαοτικό μείγμα υλικών τα οποία προέρχονται από υπερπιεσμένα υλικά και λιθολογικές μονάδες στις οποίες έλαβε χώρο η έκρηξη. Τα υλικά αυτά μπορούν να μας παράσχουν σημαντικές γεωλογικές πληροφορίες σχετικά με τις βαθιές λιθολογικές μονάδες που βρίσκονται κάτω από το ηφαίστειο λάσπης καθώς και για την στρωματογραφία της περιοχής. Στην τοποθεσία του ηφαιστείου λάσπης Θεσσαλονίκη, πραγματοποιήθηκε λιθομικροπαλαιοντολογική μελέτη 39 δειγμάτων από τους κλάστες των λατυποπαγών λάσπης. Οι κλάστες αυτοί διαφέρουν ως προς το μέγεθός τους (2-5cm σε μήκος), και προέρχονται από ομοιογενή υλικά λατυποπαγών λάσπης τα οποία συλλέχθηκαν από πυρήνες βαρύτητας, κατά την διάρκεια της δεύτερης αποστολής του προγράμματος ANAXIMANDER. Τα δείγματα πλύθηκαν και ταξινομήθηκαν ανάλογα με τα γενικά τους χαρακτηριστικά δηλαδή με την σύσταση, το χρώμα, το μέγεθος

κόκκων, την αντίδραση με HCl, και την σφαιρική τους. Αρκετοί κλάστες επιλέχθηκαν για περαιτέρω ανάλυση με πετρογραφικό πολωτικό μικροσκόπιο NIKON. Επιπρόσθετα τα πιο ενδιαφέροντα δείγματα πλύθηκαν και κοσκινίστηκαν από κόσκινο 150 $\mu$ m. Τα θραύσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν και για την ανάλυση πλαγκτονικών οργανισμών όπως foraminifera (Perissoratis et al., 2011).



43.(a-d) Εικόνες του πολωτικού μικροσκοπίου από τμήματα των κλαστών των λατυποπαγών λάσπης. Είναι βιοκλαστικά ανθρακικά wackstones με Globigerinidae πλαγκτονική foraminifera (Perissoratis et al, 2011).

Οι κλάστες των πυρήνων του ηφαιστείου Θεσσαλονίκης (AX46-GC1, AX47-GC1, AX48-GC1 και AX49-AP1) ανήκουν σε δύο κατηγορίες, στους απολιθωματοφόρους μικρίτες και στους τριματοφόρους βιομικρίτες. Οι δύο αυτές κατηγορίες αναγνωρίστηκαν και σε άλλα ηφαίστεια λάσπης του συμπλέγματος Αναξιμανδρος κατά την διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος. Οι απολιθωματοφόροι μικρίτες εντοπίζονται κυρίως με μια γωνιώδη υπογωνιώδη μορφή, μικρού μεγέθους, με ένα ελαφρύ γκρι χρώμα, είναι συμπαγείς και περιέχουν ποσοστό (10-60%) καλά διατηρημένων πελαγικών τριματοφόρων foraminifera σε μικριτικό ανθρακικό υλικό. Οι πορώδεις θάλαμοι συνήθως είναι πληρωμένοι με ανθρακικούς σπαρίτες ή πυρίτιο. Τα πλαγκτονικά είδη που εντοπίζονται είναι η *Orbulina suturalis*, *Globigerinoides trilobus*, *Globigerinoides* sp. και *Globoquadrina dehiscens*, τα οποία δείχνουν μια ηλικία κάτω με μέσου Μειόκαινου και ένα ανοιχτό θαλάσσιο περιβάλλον (Lykousis et al, 2009). Οι τριματοφόροι βιομικρίτες εμφανίζουν μια γωνιώδη υπογωνιώδη μορφή, με καφέ-γκρι χρώματα, περιέχουν θραύσματα από πλαγκτονική foraminifera, μαζί με συσσωματώματα ασβεστίτη και λασπώδη γωνιακά κομμάτια χαλαζία μέσα σε μικριτικό αρενιτικό υλικό. Τα απολιθωμένα είδη που εντοπίζονται είναι η *Orbulina*

universa, *Orbulina suturalis*, *Globigerinoides trilobus*, *Globoquadrina repethens* και *Globigenoides obliquus*, τα οποία δείχνουν ηλικία άνω Μειόκαινου και σε ένα ανοιχτό θαλάσσιο αποθετικό περιβάλλον (Bolli and Saunders, 1985; Perissoratis et al, 2011).

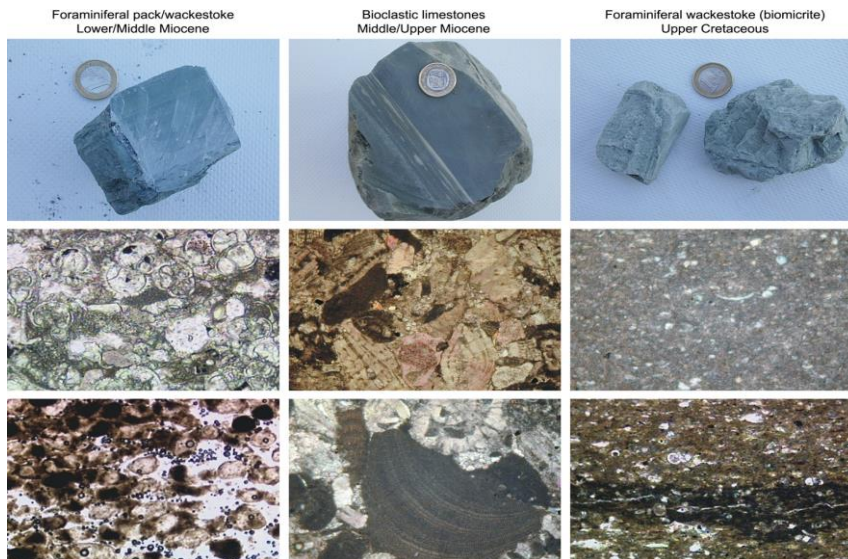
Γενικά, στο ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη, η ανάλυση των πυρήνων έδειξε την ύπαρξη υδριτών στα υλικά της λατυποπαγούς λάσπης του ηφαιστείου. Αποτελεί το ρηχότερο από τα ηφαίστεια που μελετήθηκαν στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος, με βάθος από 1315 έως 1260m με τρεις εξάρσεις στην κορυφή. Οι υδρίτες μεθανίου ανιχνεύτηκαν στους 3 από τους 5 στο σύνολο πυρήνες με τη μορφή νιφάδων ενώ ο αεροστεγής πυρήνας έδωσε με διαδικασίες εξαέρωσης 3,1 λίτρα υδριτών, κυρίως μεθανίου. Η ηλικία από τους κλάστες του ηφαιστείου υπολογίζεται στο κάτω με μέσο Μειόκαινο ενώ η θερμοκρασία στον πυθμένα μετρήθηκε 13,7 °C και η πίεση 12,9 MPa, γεγονός που υποδεικνύει ότι οι υδρίτες στο σημείο αυτό βρίσκονται στο ανώτατο όριο της ζώνης ισορροπίας, ενώ με μικρές ανεπαίσθητες αλλαγές σε αύξηση της θερμοκρασίας ή μείωση της πίεσης, ξεκινά η εξαέρωσή τους. Έτσι, η δομή αυτή αποτελεί την κατάλληλη τοποθεσία για περαιτέρω μελέτη της δραστηριότητας στα ενεργά ηφαίστεια λάσπης, αλλά και μελέτη πάνω στην σταθερότητα του φυσικού αερίου και υδριτών και την πιθανή επίδραση που έχουν αυτοί στο περιβάλλον) (Perissoratis et al., 2011).

## 2.8 Λιθο-Βιοστρωματογραφική ανάλυση των υλικών λάσπης και κλαστών στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος.

Τα ηφαίστεια λάσπης στο σύμπλεγμα βουνών Αναξίμανδρος εκχύνουν ένα φτωχά ταξινομημένο υλικό, το οποίο αποτελείται από λατυποπαγή λάσπης που περιέχουν κλάστες πετρωμάτων και προέρχονται από υλικά κάτω από τον πυθμένα. Τα υλικά αυτά επειδή προέρχονται κάτω από το θαλάσσιο βυθό, δίνουν πολύτιμες πληροφορίες για την ακολουθία των πετρωμάτων στις περιοχές αυτές (Lykousis et al., 2008). Η μορφολογία, η πετρογραφία και η βιοστρωματογραφία των κλαστών στα λατυποπαγή λάσπης στα ηφαίστεια λάσπης Άμστερνταμ, Κούλα και Καζάν βοηθάει σημαντικά ώστε να προσδιοριστεί η κατώτερη στρωματογραφία και κατ' επέκταση να δοθεί μια καλύτερη εικόνα για την δημιουργία και την εξέλιξη των ηφαιστειών λάσπης στην ευρύτερη περιοχή του συμπλέγματος Αναξίμανδρος (Lykousis et al., 2008). Επιπρόσθετα η μικροφασική ανάλυση που διενεργήθηκε σε λεπτές τομές με την χρήση μικροσκοπίου και ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X (XRD), έδωσε παραπάνω πληροφορίες και ακριβείς εκτιμήσεις ως προς την σχετική ηλικία των μητρικών πετρωμάτων των υλικών και την εξακρίβωση της ακολουθίας των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τον σχηματισμό των πετρωμάτων. Παρόλα αυτά, κατά γενική ομολογία, τα θραύσματα των πετρωμάτων φαίνεται να είναι παρόμοιας προέλευσης με τα υλικά των ηφαιστειών λάσπης, κυρίως ασβεστόλιθοι, άμμοι, ιλύς και αργιλικά πετρώματα. Φαίνεται ότι διαφορετικά πετρώματα όπως ηλόλιθοι και θραύσματα ηφαιστειακών πετρωμάτων όπως οφιόλιθοι, σεπρεντινίτες, περιδοτίτες και άλλα, εμφανίζονται περισσότερο στο ηφαίστειο λάσπης Κούλα και σε πιο περιορισμένες ποσότητες στο ηφαίστειο λάσπης Καζάν. Οι συγκεντρώσεις των πλαγκτονικών και βενθικών τριματοφόρων foraminifera που εντοπίζονται στα λατυποπαγή λάσπης, είναι χαρακτηριστικά της άνω Κρητιδικής, κάτω-μέσου με άνω Ηωκαίνου και Μειοκαινικής ηλικίας (Lykousis et al, 2008).

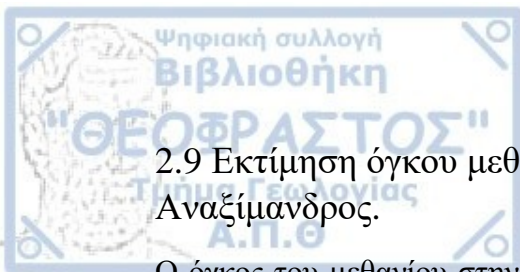


Τα λατυποπαγή των κλαστών που ανακτήθηκαν και περιεγράφηκαν από κάθε ηφαίστειο λάσπης ξεχωριστά, περιέχουν απολιθωμένους μικρίτες και τρηματοφόρους μικρίτες όπως αναλύθηκε και στο ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη, καθώς και ιλυόλιθους, οργανικά συντρίμια πλούσια σε ιλυόλιθους, ιζηματογενείς ασβεστοψαμμίτες - καλκαρενίτες χαλαζία και ιλυόλιθους με καλκαρενίτες. Η ηλικία αυτών των θραυσμάτων δείχνει ότι η ηλικία των ασβεστόλιθων είναι άνω Κρητιδικού, τα πυριτικά πετρώματα είναι ηλικίας Παλαιοκαίνου, οι βιογενετικοί ασβεστόλιθοι είναι ηλικίας Ηωκαίνου και οι ιλυόλιθοι είναι ηλικίας Μειοκαίνου. Τα πετρώματα μεγαλύτερης ηλικίας που εντοπίστηκαν στους βαρυτικούς πυρήνες, περιέχουν foraminifera άνω Κρητιδικής ηλικίας. Τα πετρώματα αυτά ανακτήθηκαν από το ηφαίστειο λάσπης Άμστερνταμ μαζί με βιοκλαστικούς νηριτικούς ασβεστόλιθους τυπικής ηλικίας κάτω-μέσου με άνω Ηωκαινικής εποχής, όπου ήταν παρούσες στην περιοχή μεγάλες βενθικές κοινότητες foraminifera, όπως Νουμουλίτες gr, laevigatus, N.disordinus, Gyroidinella magna, Sphaerogypsina sp., Discocyclina sp., Operculina sp., Amphistegina sp., Rotaliidae, και Globigerinidae μαζί με φύκια Melobesoideae. Στα τεμάχια foraminifera εντοπίζονται κομμάτια κελυφών από ελασματοβράγχια και εχινόδερμα μαζί με μεγάλη παρουσία σπόγγων Globigerinidae κάτω με μέσου Μειοκαινικής εποχής, τα οποία συλλέχτηκαν κυρίως στο ηφαίστειο Κούλα (Lykousis et al., 2008). Τα αρχικά αποτελέσματα της μικροπαλαιοντολογικής ανάλυσης των κλαστών στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος, υποδεικνύουν ομοιότητες με τα δεδομένα στην επιφάνεια του νησιού της Ρόδου και Ρω στα βορειοανατολικά του συμπλέγματος (Galeos 1986), τα οποία έχουν χρονολογηθεί με ηλικία άνω Κρητιδικού με Μειόκαινου (Lykousis et al, 2008).



44.Μακροσκοπικές και μικροσκοπικές φωτογραφίες των κλαστών που δείχνουν κύριες βιοφάσεις που έχουν μελετηθεί στα λατυποπαγή του συμπλέγματος Αναξίμανδρος (Lykousis et al, 2008).





## 2.9 Εκτίμηση όγκου μεθανίου και ισορροπία υδριτών στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος.

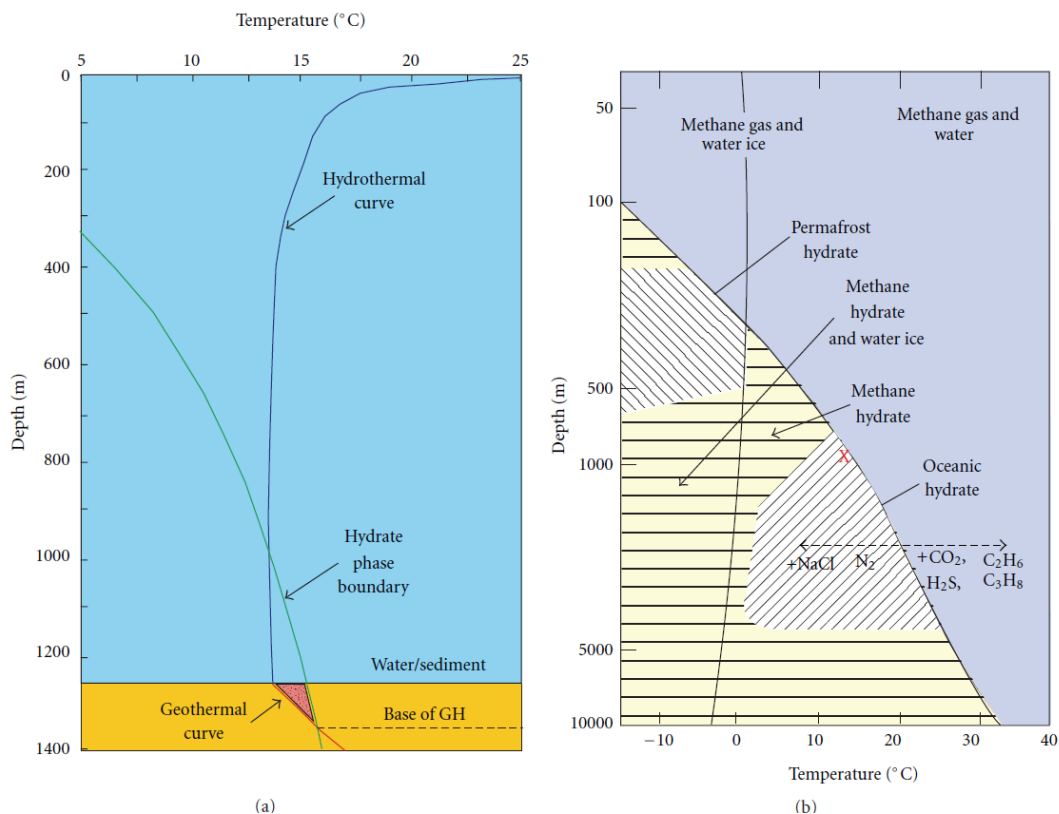
Ο όγκος του μεθανίου στην λάσπη που προήλθε από το σύμπλεγμα των ηφαιστειών λάσπης Αναξίμανδρος, εκτιμήθηκε με απευθείας μετρήσεις στη συγκέντρωση του μεθανίου από τους πυρήνες που ανακτήθηκαν στο κατάστρωμα του ερευνητικού σκάφους. Χρησιμοποιήθηκε αργή αποσυμπίεση των υλικών στους 6 αυτόκλειστους πυρήνες, σε περισσότερους από 60 βαρυτικούς πυρήνες ενώ οι εικόνες που προέκυψαν από την οπισθοσκέδαση βοήθησαν στο να εκτιμηθεί ο όγκος του μεθανίου, καθώς οι περιοχές με έντονη ακουστικότητα υποδεικνύουν περιοχές με πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα και εμπεριέχουν φυσαλίδες μεθανίου, αέριους υδρίτες και κλάστες λάσπης με λασπώδη ηφαιστειακά ιζήματα. Η ποσότητα του μεθανίου που συλλέχθηκε μετά τις διαδικασίες αποσυμπίεσης ανήλθε στην τάξη των 50 I μεθανίου σε 1,5m ιζήματος από τον πυρήνα του ηφαιστείου λάσπης Άμστερνταμ, 23 I και 5 I στο ηφαίστειο λάσπης Καζάν και 3 I σε αυτό της Θεσσαλονίκης. Βάση αυτών των μετρήσεων ο συνολικός όγκος του μεθανίου είτε με ελεύθερη μορφή είτε με αέριους υδρίτες, στα ανώτερα ιζηματογενή στρώματα μέχρι βάθους 2m, εκτιμήθηκε  $0,052 \text{ Km}^3$  στο ηφαίστειο λάσπης Άμστερνταμ σε μια έκταση  $26 \text{ Km}^2$  και περίπου  $0,012 \text{ Km}^3$  στα μικρότερα ηφαίστεια λάσπης του συμπλέγματος Αναξίμανδρος σε συνολική έκταση  $20 \text{ Km}^2$ . Αυτές οι μετρήσεις προέρχονται από άμεση παρατήρηση όμως είναι πιθανό να υπάρχουν μεγαλύτερα ποσοστά συγκέντρωσης υδριτών στην ζώνη της ισορροπίας των αέριων υδριτών (Lykousis et al., 2008).

Η απροσδόκητη ανακάλυψη υδριτών στο ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη αποτέλεσε σημαντική είδηση, καθώς αν και αυτό είναι σε σχετικό μικρό βάθος στα 1260m και είναι ενεργό, βρίσκεται στο όριο της ζώνης ισορροπίας των υδριτών περίπου  $1100 \pm 100 \text{ m}$  στην Ανατολική Μεσόγειο. Οι υδρίτες μεθανίου στο ηφαίστειο αυτό εμφανίζουν ευαισθησία σε μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης, και κυρίως στις μεταβολές του επιπέδου της θάλασσας ή στις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας του πυθμένα. Τέτοιες μεταβολές στις μεταβολές της θερμοκρασίας του νερού στην Μεσόγειο έχουν παρατηρηθεί σε κλίμακα δεκαετίας. Έτσι το ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη είναι το κατάλληλο για την μελέτη της περιοδικής δραστηριότητας των ηφαιστειών λάσπης, της περιβαλλοντικής τους επίδρασης και της ζώνης ισορροπίας των υδριτών στην Μεσόγειο θάλασσα (Lykousis et al., 2008).

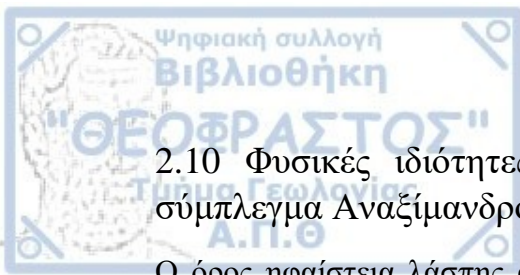
Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη σε βάθος 1265m έδειξαν ότι οι υδρίτες εντοπίζονται στα 1265m βάθους, ενώ επικαλύπτονται από λεπτά ιζηματογενή στρώματα πάχους 220cm. Η θερμοκρασία του βυθού ήταν  $13,75 \text{ }^\circ\text{C}$  και η γεωθερμική βαθμίδα εκτιμήθηκε ότι είναι  $30\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C/Km}$  ή και περισσότερο, βάση παλαιότερων μετρήσεων στο ηφαίστειο λάσπης Όλυμπος. Κατά την διάρκεια της ερευνητικής αποστολής MIMES το 2004, μια μέτρηση των ζεστών ροών η οποία έγινε στο ηφαίστειο λάσπης Άμστερνταμ από τους Feseker και Foucher, έδειξε σημαντική θέρμανση των ιζημάτων της τάξεως των  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  στα άνω 10m της λάσπης (Perissoratis et al., 2011). Σε άλλες περιοχές οι θερμές ροές δείχνουν μια μεγαλύτερη γεωθερμική βαθμίδα, όπως για παράδειγμα στο ενεργό κέντρο στο ηφαίστειο Isis με θερμοκρασία  $2,78 \text{ }^\circ\text{C}$  (Feseker et al., 2009).

Το διάγραμμα της ζώνης ισορροπίας των υδριτών, βάση των παραμέτρων που αναφέρθηκαν, δείχνει ότι οι υδρίτες στο ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη βρίσκονται στο υπάρχον όριο ισορροπίας των υδριτών μεθανίου και δεν επεκτείνονται σε μεγαλύτερο βάθος κάτω από μερικά μέτρα στο ηφαίστειο. Αυτό σημαίνει ότι με τις παραμικρές περιβαλλοντικές μεταβολές οι υδρίτες μπορούν να εξαερωθούν και να απελευθερώσουν νερό και μεθάνιο. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να είναι μια αλλαγή στην πίεση του πυθμένα ή μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του νερού. Παρόλο που οι ποσότητες του μεθανίου που εντοπίστηκαν στον αυτόκλειστο πυρήνα στο ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη είναι σε μικρές ποσότητες και ο συνολικός όγκος των υδριτών δεν αναμένεται να είναι μεγάλος βάσει του βάθους όπου οι υδρίτες μπορούν να βρίσκονται σε σταθερή κατάσταση, δεν γνωρίζουμε την πιθανή έκταση που πιθανώς να καλύπτουν οι υδρίτες στην περιοχή αυτή και στα βάθη αυτά της Ανατολικής Μεσογείου. Η μελέτη τους πρέπει να συνεχιστεί περαιτέρω (Perissoratis et al., 2011).

Η συνολική συγκέντρωση και εκτίμηση του όγκου του μεθανίου που εντοπίστηκε στην περιοχή του συμπλέγματος Αναξιμανδρος, μπορεί να συγκριθεί με τις εκτιμήσεις των συγκεντρώσεων στα ηφαίστεια λάσπης του Κόλπου του Cadiz. Σε σύγκριση με τα αποθέματα στην Μαύρη Θάλασσα, εντοπίζονται περίπου  $10^3$  φορές μικρότερα αποθέματα σε σχέση με τα  $0,1-1 \times 10^{12} \text{ m}^3$  των συνολικών αποθεμάτων μεθανίου που έχουν υπολογιστεί στα ηφαίστεια λάσπης στην κεντρική περιοχή στη Μαύρη Θάλασσα (Lykousis et al., 2008).



45. (a): Διάγραμμα ισορροπίας υδριτών από την ευρύτερη περιοχή του ηφαιστείου λάσπης Θεσσαλονίκη, (b): διάγραμμα ισορροπίας των υδριτών στην περιοχή των υδριτών στο ηφαίστειο λάσπης Θεσσαλονίκη (Perissoratis et al, 2011).



## 2.10 Φυσικές ιδιότητες ιζημάτων και ιζηματογενείς διεργασίες στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος.

Ο όρος ηφαίστεια λάσπης αναφέρεται στο εύρος των ιζηματογενών διεργασιών οι οποίες είναι αποτέλεσμα εξαγωγής των αργιλωδών υλικών και παρατηρούνται τόσο σε στεριά όσο και στο θαλάσσιο πυθμένα (Milkov, 2000). Η παρουσία των ηφαιστειών λάσπης σχετίζεται με την παρουσία ροών μεθανίου στα ανώτερα επίπεδα, σε συνδυασμό με κρύες φλέβες στα στρώματα του πυθμένα (Charlou et al., 2003), ανθρακικών καλυμμάτων (Aloisi et al., 2002) και υδρίτες μεθανίων κάτω από συγκεκριμένες παραμέτρους (Casas et al., 2006). Έτσι διαδραματίζουν ένα σημαντικό ρόλο για τη μελέτη της ισορροπίας των ιζημάτων, τις κλιματικές και περιβαλλοντικές μελέτες και την αλληλεπίδραση μεταξύ την μικροβιακής ζωής και των ρευστών στον πυθμένα (Olu et al., 2004). Οι φυσικές ιδιότητες των θαλάσσιων ιζημάτων είναι σημαντικές προκειμένου να γίνουν κατανοητά τα γεωλογικά γεγονότα στα θαλάσσια περιβάλλοντα ενώ διαδραματίζουν πρωταρχικό ρόλο για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών και της μετανάστευσης των αερίων και κατ' επέκταση, την επιρροή τους στις φυσικές μικροβιολογικές κοινωνίες και στον σχηματισμό αερίων υδριτών (Casas et al., 2006). Κατά την ευρωπαϊκή ερευνητική αποστολή Anaximander project, η έρευνα επικεντρώθηκε στη λεπτομερή ανάλυση της σχέσης μεταξύ των φυσικών δυνατοτήτων και των ιζηματογενών χαρακτηριστικών των ιζημάτων με υδρίτες που ανακτήθηκαν από τα ηφαίστεια λάσπης του συμπλέγματος Αναξίμανδρος. Ο στόχος ήταν να προσδιοριστεί ο τύπος των ιζημάτων με τα ηφαίστεια λάσπης ώστε να προσδιοριστούν οι διεργασίες δημιουργίας τους και να προσδιοριστούν οι ιζηματογενείς αλλαγές των φυσικών ιδιοτήτων σε αυτά τα ιζήματα (Casas et al, 2006).

Στην διάρκεια της πρώτης ερευνητικής αποστολής του προγράμματος, η οποία έγινε με το ερευνητικό σκάφος R/V Aegaeo, συλλέχθηκαν τέσσερις πυρήνες βαρύτητας (An05GC1, An07GC4, An14GC1, An13GC1), από τα ηφαίστεια λάσπης Άμστερνταμ, Καζάν, Κούλα στο σύμπλεγμα Αναξίμανδρος. Η εργαστηριακή μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, συνδυάζει τις μετρήσεις που έγιναν προκειμένου να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της σύστασης και την υφή των τυπικών ιζημάτων στην περιοχή, αλλά και τις φυσικές ιδιότητες των διαφόρων τύπων των ιζημάτων (Casas et al., 2006). Η ανάλυση της υφής δίνει πληροφορίες για το μέγεθος των κόκκων των ιζημάτων, το οποίο καθορίζει τους μηχανισμούς μεταφοράς και απόθεσής τους. Η ανάλυση έγινε με επιλογή των κόκκων με το χέρι, ενώ ακολούθησε το κοσκίνισμα για τα θραύσματα μεγαλύτερα των 2000 μm, δοκιμαστικός σωλήνας για τα θραύσματα μεγέθους 2000-50 μm και τα θραύσματα μεγέθους μικρότερα των 50μ μπήκαν σε Sedigraph 5100D. Επιπρόσθετα, όλος ο πυρήνας υποβλήθηκε σε μη καταστροφική μέτρηση υψηλής ανάλυσης με το όργανο Multi-Sensor Core Logger (MSCL). Οι παράμετροι οι οποίες μετρήθηκαν είναι ο όγκος της υγρασίας με ακτίνες γάμμα (GRAPE), η μαγνητική ευαισθησία και η ταχύτητα των κυμάτων P. Ο τυπικός ρυθμός της δειγματοληψίας ήταν μία μέτρηση ανά 1cm (Casas et al, 2006).

Core	Core length	Depth	φ	λ	Mud volcano
An05GC1	131 cm	2030 m	35° 20' 002	30° 16' 263	Amsterdam
An07GC4	148 cm	1700 m	35° 25' 908	30° 33' 689	Kazan
An13GC1	81 cm	1636 m	35° 43' 701	30° 27' 400	Kula
An14GC1	85.5 cm	1636 m	35° 43' 716	30° 27' 502	Kula

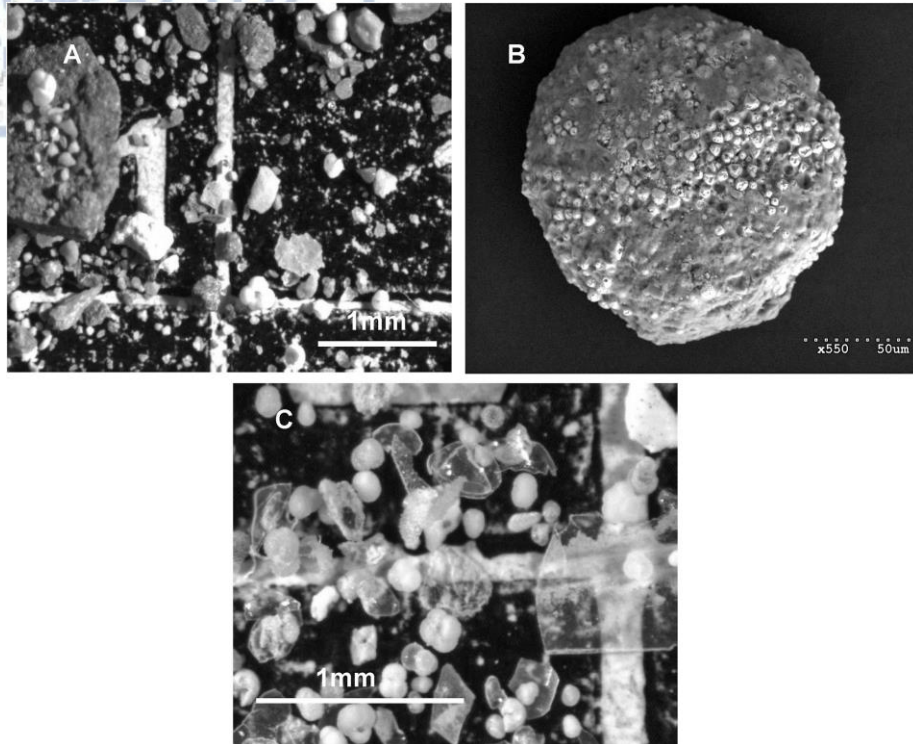
46. Πίνακας τοποθεσίας και βάθους των πυρήνων που αναλύθηκαν από τα ηφαιστεια λάσπης (Casas et al, 2006).

Η ανάλυση της σύστασης είναι σημαντική προκειμένου να προσδιοριστεί η φύση και η προέλευση των ιζημάτων. Η ανάλυση συνδυάζει την σύσταση των θραυσμάτων της άμμου και των ανθρακικών ασβεστολιθικών υλικών. Τα θραύσματα της άμμου προσδιορίστηκαν και ταξινομήθηκαν οπτικά με 350 κόκκους ανά δειγματοληψία με οπτικό μικροσκόπιο. Το υλικό των ανθρακικών ασβεστόλιθων στα δείγματα προσδιορίστηκε με την μέθοδο της αερομέτρησης, με τροποποιημένο μετρητή ασβεστίου Bernard. Οι μετρήσεις σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες συμπεριλαμβάνουν τους δείκτες της περιεκτικότητας του νερού, της πυκνότητας των κόκκων, του πορώδους και της αντοχής των στρωμάτων. Οι δείκτες των ιδιοτήτων αυτών προσδιορίστηκαν από βαρυμετρικές τεχνικές όπως συσχέτιση, διορθώσεις βαρύτητας και όγκου των αλάτων όπως υποδείχτηκε από τον Hamilton (1970).

Οι τέσσερις πυρήνες που μελετήθηκαν προέρχονται από διαφορετικά ιζηματογενή περιβάλλοντα. Οι πυρήνες An05GC1, An07GC4 και An14GC1 προέρχονται από περιοχές μέσα από τον κρατήρα του ηφαιστείου λάσπης Άμστερνταμ και από τις κορυφές των ηφαιστειών λάσπης Καζάν και Κούλα. Ο πυρήνας An13GC1 προέρχεται από τις εξωτερικές ροές οι οποίες δημιούργησαν την εκτεταμένη πλευρά στο ηφαιστειο λάσπης Κούλα. Η στρωματογραφία των πυρήνων An05GC1, An07GC4 και An14GC1 διαμορφώνεται από λατυποπαγή λάσπης, τα οποία χαρακτηρίζονται από μια λασπώδη υφή, με διασκορπισμένα υλικά και φτωχά ταξινομημένα ιζήματα με γωνιακούς προς υπογωνιακούς κλάστες διαφορετικών διαστάσεων ιλιόλιθου. Εμφανίζονται δομές που απελευθερώνουν μεθάνιο κατά μήκος όλων των ιζηματογενών πυρήνων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι υδρίτες στα ιζήματα αυτά εξαερώνονται μόλις ανοίγει ο πυρήνας στην επιφάνεια του σκάφους εξαιτίας της αλλαγής των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας, συνθήκες που επηρεάζουν την ισορροπία των υδριτών. Στην κορυφή του πυρήνα An05GC1 παρατηρήθηκαν κελύφη από δίθυρα όπως *Lucinoma kazani*, τα οποία έχουν παρατηρηθεί και σε άλλα ηφαιστεια λάσπης όπως της Αθήνας (Casas et al, 2006). Αντίθετα, στον πυρήνα An013GC1, παρατηρήθηκαν λατυποπαγή λάσπης τα οποία καλύπτονται από ημιπελαγικά ιζήματα (50cm πάχους) σε αντίθεση με τα δύο είδη ιζημάτων από κάτω τους τα οποία εμφανίζονται οξειδωμένα (πρώτα 12cm). Μαζί με τα ημιπελαγικά ιζήματα αναγνωρίστηκε ένα μαύρο στρώμα πλούσιο σε οργανικά υλικά ανάμεσα σε 15 με 33 cmbsf, ηλικίας S1 sapropel εποχής Ολόκαινου (Rijk et al., 1999; Casas et al., 2006).

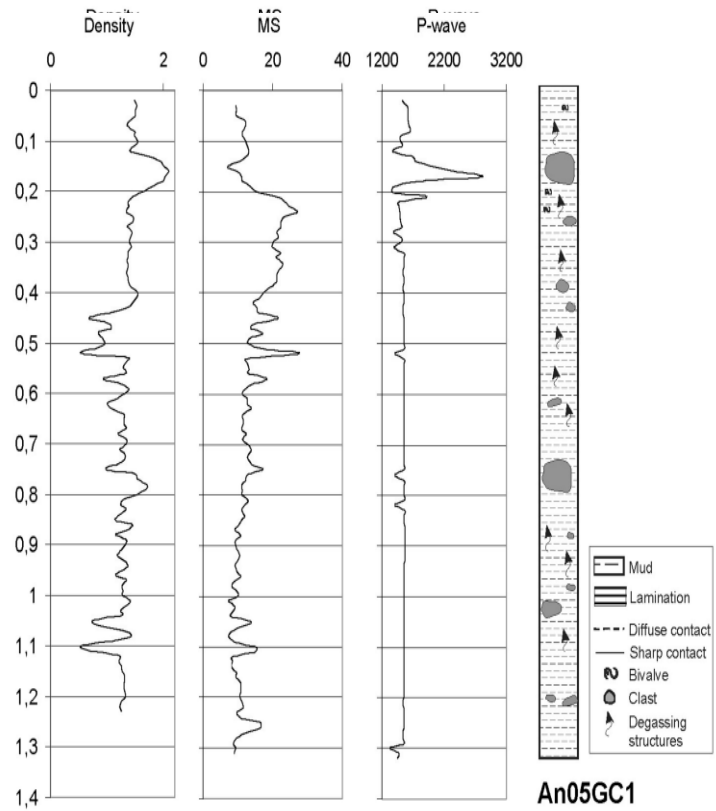
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των μεγεθών στο λασπώδες υλικό των λατυποπαγών λάσπης και των ημιπελαγικών λασπών, δείχνει χαμηλή, μη κανονική κατανομή των υλικών ανάμεσα στους πυρήνες. Σύμφωνα με τα ποσοστά των υλικών των τριών κύριων μεγεθών των θραυσμάτων, τα περισσότερα από τα δείγματα που αναλύθηκαν ταξινομήθηκαν ως ιλιώδης πηλός (55-67% πηλό) και πηλώδης ιλύς (46% ιλύς) με μικρά ποσοστά άμμου (7%) και χαλικιών (<10%). Ο μέσος όρος των κόκκων



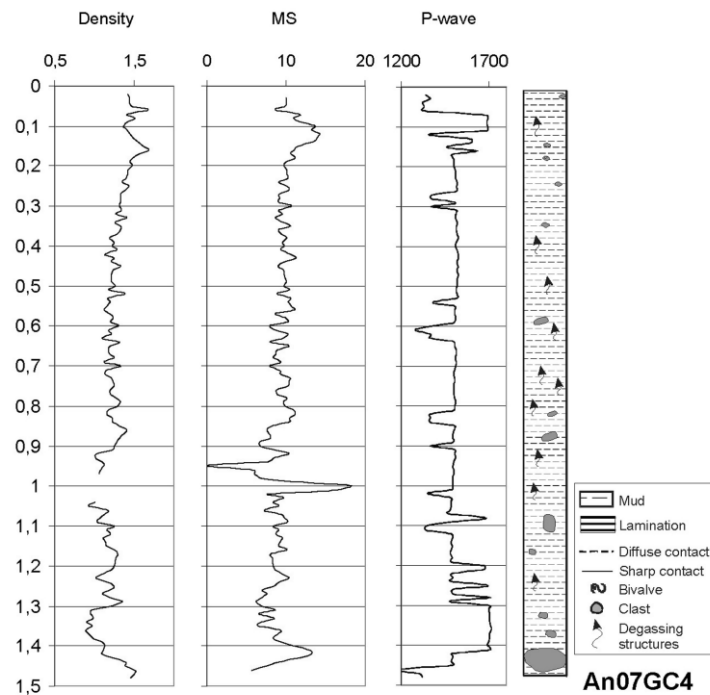


47.(A)Μικροσκοπική εικόνα των λατυποπαγών λάσπης με τερηγόνα συστατικά στα θραύσματα άμμου, (B) Ηλεκτρονική μικροσκοπική εικόνα αλλοιωμένων κρυστάλλων πυριτών τα οποία είναι συστατικά των λατυποπαγών λάσπης, (C ) Εικόνα μικροσκοπίου ημιπελαγικών ιζημάτων με βιογενή συστατικά των θραυσμάτων άμμου (Casas et al, 2006).

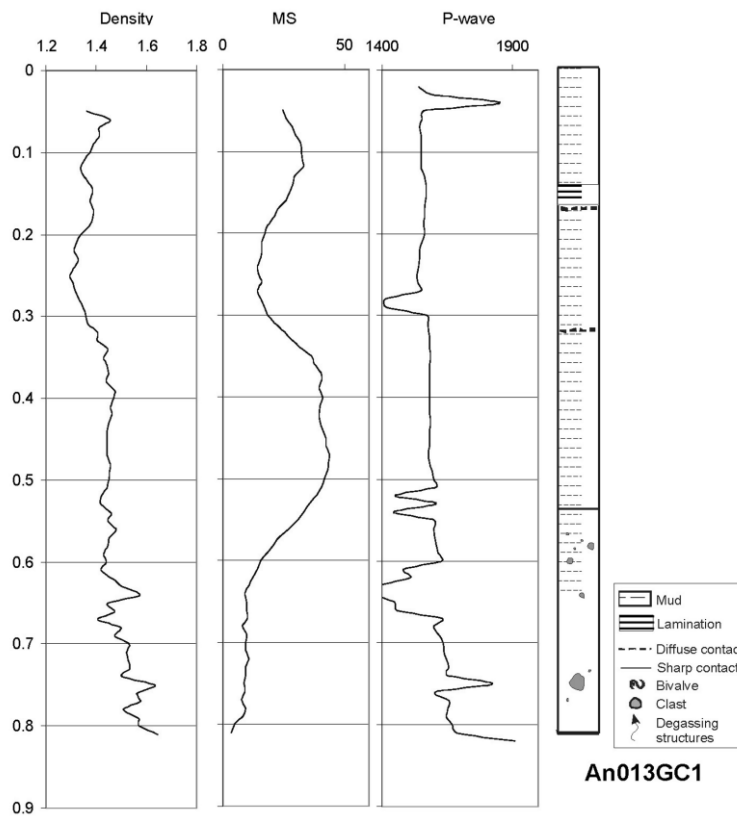
κυμαίνεται ανάμεσα στα 5 με 8,7 ρhi. Τα θραύσματα άμμου των λατυποπαγών λάσπης χαρακτηρίζονται κυρίως από χερσογενή υλικά. Η μέση αξία σε αυτά τα τερηγόνα συστατικά ανέρχεται στην τάξη μεταξύ 89 με 99%. Αποτελούνται κυρίως από χαλαζία, ελαφρά ορνκτά, θραύσματα πετρωμάτων και οξειδωμένου πυρίτη σε ποσοστό έως 7%. Στον πυρήνα An05GC1 παρατηρούνται θραύσματα σχετικά βαριών πετρωμάτων σε μέγιστο ποσοστό 32%. Τα θραύσματα της άμμου στα ημιπελαγικά ιζήματα δείχνουν την ύπαρξη ενός υψηλού ποσοστού βιογενετικών υλικών που αγγίζει την τάξη του 100%. Τα υλικά αυτά είναι foraminifera. Οι ανθρακικοί ασβεστίτες στα λατυποπαγή λάσπης αγγίζουν ένα ποσοστό μικρότερο του 29% το οποίο δείχνει μικρές διαφορές μεταξύ των πυρήνων. Στις ημιπελαγικές λάσπες η περιεκτικότητα των ανθρακικών υλικών κυμαίνονται από 34% έως 49% (Casas et al, 2006). Η γεωλογική ερμηνεία των ιζηματογενών χαρακτηριστικών δείχνει ότι οι πυρήνες οι οποίοι έχουν συλλεχτεί από τον κρατήρα των ηφαιστειών του συμπλέγματος Αναξίμανδρος, από τα ηφαιστεια Κούλα, Καζάν και Άμστερνταμ, σχηματίστηκαν από λατυποπαγή λάσπης τα οποία καλύπτουν την επιφάνεια και υποδεικνύουν πρόσφατη δραστηριότητα ή τουλάχιστον όχι μια περίοδο αδράνειας. Η παρουσία των λατυποπαγών λάσπης υποδεικνύει ανεξάρτητα μεταξύ τους ηφαιστειακά γεγονότα, εξαιτίας της απουσίας της οξείδωσης σε αυτά και περικλεισμένων ημιπελαγικών πετρωμάτων. Ωστόσο, η ιζηματολογική ανάλυση του πυρήνα An13GC1 από την πλαγιά του ηφαιστείου Κούλα, εμφανίζει μια παλαιά ροή



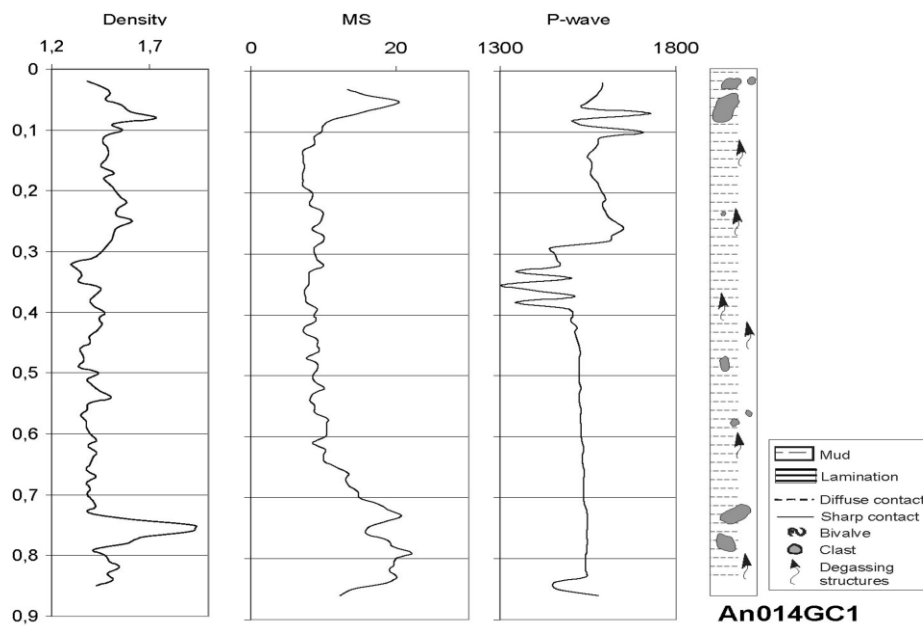
48. Διάγραμμα του πυρήνα με κάθετη κατανομή της ελεύθερης πυκνότητας ( $\text{g/cm}^3$ ), της μαγνητικής ευαισθησίας, ( $10^{-6}$  SI), την ταχύτητα των κυμάτων P ( $\text{m/s}$ ) και των ιζημάτων του πυρήνα An05GC1. Κατακόρυφη κλίμακα σε m (D. Casas et al, 2006).



49. Διάγραμμα του πυρήνα με κάθετη κατανομή της ελεύθερης πυκνότητας ( $\text{g/cm}^3$ ), της μαγνητικής ευαισθησίας, ( $10^{-6}$  SI), την ταχύτητα των κυμάτων P ( $\text{m/s}$ ) και των ιζημάτων του πυρήνα An07GC4. Κατακόρυφη κλίμακα σε m (D. Casas et al, 2006).



50. Διάγραμμα του πυρήνα με κάθετη κατανομή της ελεύθερης πυκνότητας ( $\text{g/cm}^3$ ), της μαγνητικής ευαισθησίας, ( $10^{-6}$  SI), της ταχύτητας των κυμάτων P (m/s) και των ίζημάτων του πυρήνα An13GC1. Κατακόρυφη κλίμακα σε m (Casas et al, 2006).



51. Διάγραμμα του πυρήνα με κάθετη κατανομή της ελεύθερης πυκνότητας ( $\text{g/cm}^3$ ), της μαγνητικής ευαισθησίας, ( $10^{-6}$  SI), την ταχύτητα των κυμάτων P (m/s) και των ίζημάτων του πυρήνα An14GC1. Κατακόρυφη κλίμακα σε m (D. Casas et al, 2006).

λάσπης. Μετά την απόθεση των λατυποπαγών λάσπης, τα ιζήματα επηρεάστηκαν εξαιτίας της επαφής τους με το θαλάσσιο νερό και οξειδώθηκαν, ενώ στην συνέχεια επικάθησαν από πάνω και τα ημιπελαγικά ιζήματα. Η λεπτή διαδοχή της τάξεως των 50cm των ημιπελαγικών ιζημάτων δείχνει μια παρατεταμένη περίοδο χωρίς την δημιουργία ροών λάσπης στο νότιο κομμάτι του ηφαιστείου. Οι διάσπαρτοι υδρίτες που ανακτήθηκαν από τους πυρήνες δείχνει μια διασπορά μικρών ποσοτήτων (Casas et al, 2006). Στα λατυποπαγή λάσπης τα οποία βρίσκονται στις ενεργές περιοχές των ηφαιστειών λάσπης όπως σε αυτό του Άμστερνταμ, ανιχνεύτηκαν υδρίτες. Αντίθετα, οι υδρίτες απουσιάζουν από τα λατυποπαγή λάσπης και τα ημιπελαγικά ιζήματα που βρίσκονται έξω από τις ενεργές περιοχές του ηφαιστείου (Lykousis et al, 2003).

Ως προς τις φυσικές ιδιότητες των υλικών, ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του MSCL είναι το γεγονός ότι μας επιτρέπει να πάρουμε δεδομένα υψηλής ανάλυσης και συνεχή καταγραφή των δεδομένων και των φυσικών ιδιοτήτων των ιζημάτων. Τα δεδομένα των μετρήσεων από το MSCL που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, δεν αναπαριστούσαν τις πραγματικές συνθήκες της αδιατάρακτης κατάστασης των ιζημάτων σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Μας δίνουν παρόλα αυτά πληροφορίες για την λιθολογία και την φύση των πετρωμάτων ξενιστών (Casas et al, 2006).

Ανάμεσα σε κάποιες από τις φυσικές ιδιότητες οι οποίες μετρήθηκαν με τον σένσορα MSCL, βρέθηκε μια μικρή συσχέτιση μεταξύ τους. Σε γενικές γραμμές υψηλή πυκνότητα ανταποκρίνεται με χαμηλή μαγνητική ευαισθησία, αλλά δεν υπάρχει η στατιστική συσχέτιση για να υποστηριχτεί η τάση αυτή. Μια μικρή θετική συσχέτιση ( $R=0.47$ ) ανάμεσα στην πυκνότητα και στην ταχύτητα των κυμάτων P παρατηρήθηκε μόνο στον πυρήνα An13GC1. Οι παρατηρήσεις αυτές υποδεικνύουν ότι το βάθος αυτό, το οποίο συσχετίζεται με την πυκνότητα ( $R= 0.72$ ), αποτελεί σημαντικό παράγοντα, ο οποίος επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες των ιζημάτων και ειδικότερα την ταχύτητα (Casas et al, 2006).

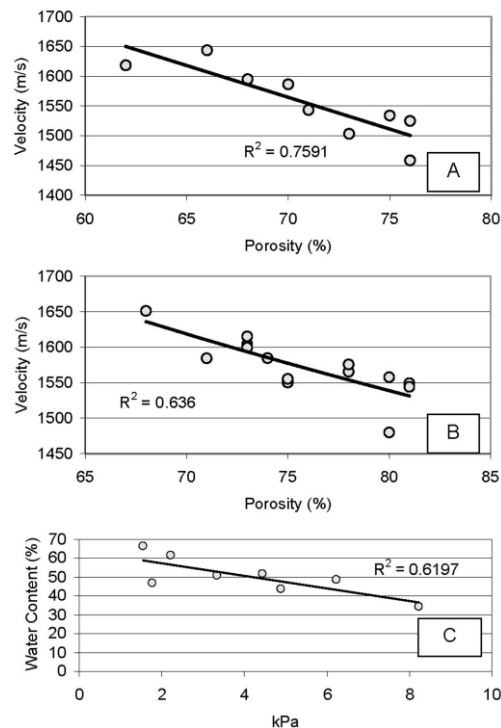
Η σχέση μεταξύ των φυσικών ιδιοτήτων και της λιθολογίας δείχνει μια συσχέτιση με την πυκνότητα και την μαγνητική ευαισθησία. Η μεγάλη πυκνότητα στους πυρήνες An05GC1, An07GC4 και An14GC1 φαίνεται να συνδέεται με την ύπαρξη μεγάλων κλαστών ή μικρότερων κλαστών. Αντίθετα, η ποικιλία του μεγέθους της πυκνότητας στους πυρήνες An07GC4 και An14GC1 φαίνεται να συνδέεται με την παρουσία ιλύς ( $R=0.69$ ) και άμμου ( $R=0.47$ ) καθώς και με την μεταβλητότητα των χαλικιών ( $R=0.78$ ), της ιλύος ( $R= -0.75$ ) και του πηλού ( $R= -0.78$ ). Η πυκνότητα στον πυρήνα An13GC1 έδειξε μια συσχέτιση μεταξύ των ιζηματολογικών παραμέτρων όπως της πυκνότητας της άμμου ( $R=0.58$ ), της πυκνότητας του χαλικιού ( $R=0.65$ ) και της πυκνότητας του πηλού ( $R= -0.73$ ). Οι συσχετίσεις αυτές προέκυψαν από τα ποσοστά διαφοροποίησης της άμμου, του πηλού και χαλικιού καθώς αυξάνεται το βάθος του πυρήνα και ταυτόχρονα αυξάνεται και η πυκνότητα ( $R=0.72$ ) ως αποτέλεσμα της παγίωσης της υπερφόρτωσης (Casas et al, 2006).

Κατά τη μέτρηση της μαγνητικής ευαισθησίας βρέθηκε μια συμβατή συσχέτιση με τον πηλό ( $R=0.49$ ) στον πυρήνα An07GC4 και με την ιλύ ( $R= -0.6$ ) στον πυρήνα An14GC1. Ωστόσο το μέγεθος της μαγνητικής ευαισθησίας φαίνεται να συνδέεται με τα καλά σχηματισμένα και ταξινομημένα κομμάτια. Στον πυρήνα An13GC1 η μαγνητική ευαισθησία, ακόμη συσχετίζεται με την ποσότητα σε ανθρακικά συστατικά



( $R=0.73$ ), την ιλύ ( $R=0.43$ ), το χαλίκι ( $R= -0.58$ ) και την άμμο ( $R= -0.58$ ). Αυτές οι συσχετίσεις αντικατοπτρίζονται στα διαφορετικού είδους ιζήματα, με μεγάλη μαγνητική ευαισθησία, που οφείλεται στην παρουσία των ημιπελαγικών στρωμάτων και μικρής μαγνητικής ευαισθησίας που οφείλεται στην παρουσία ημιπελαγικών ιζημάτων, πλούσια σε οργανική ύλη και στα λατυποπαγή λάσπης. Στην περίπτωση αυτή, η ιλύς παίζει σημαντικό ρόλο μιας και αποτελεί το πιο ανεξάρτητο υλικό σε σχέση με τα υπόλοιπα, και εξηγεί κατ' επέκταση την μεγάλη μαγνητική ευαισθησία των τιμών σε αυτόν τον πυρήνα (Casas et al, 2006).

Τα διαγράμματα της ταχύτητας σε σχέση με το πορώδες είναι αρκετά χρήσιμα ώστε να διαχωριστεί το στάδιο της συμπαγοποίησης των ιζημάτων με την έκταση της διαγένεσης (Casas et al, 2006). Σε γενικές γραμμές, η αύξηση της συμπαγοποίησης στα μαλακά ιζήματα τείνει να αυξήσει την ταχύτητα μέσω την μείωσης της πυκνότητας, ενώ η τσιμεντοποίηση δημιουργεί μεγάλη ταχύτητα εξαιτίας της μεγάλης δυσκαμψίας των ιζημάτων με μικρή ή και καθόλου μείωση του πορώδους (Dadey and Klaus, 1992). Στο διάγραμμα των μετρήσεων της ταχύτητας με το πορώδες των ιζημάτων από τον πυρήνα An01GC1 και τον πυρήνα An013GC1, παρατηρείται μια γενική τάση της αύξησης της ταχύτητας καθώς το πορώδες μειώνεται (Εικόνα 52). Μια αύξηση της ταχύτητας των κυμάτων P παρατηρείται μόνο στα ιζήματα με μεγάλες πυκνότητες ( $R=0.47$ ) στον πυρήνα An013GC1. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι υπάρχει μια γραμμική αντιστοιχία και μια σχετικά καλή συσχέτιση και για τις δύο αυτές μετρήσεις. Οι παρατηρήσεις αυτές υποδεικνύουν ότι το βάθος αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα ο οποίος επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες των ιζημάτων ειδικά την ταχύτητα στον πυρήνα An013GC1 (Casas et al, 2006).



52.Γράφημα που δείχνει την συσχέτιση μεταξύ του πορώδους (%) και την ταχύτητα των κυμάτων P (m/s) στους πυρήνες An014GC1 (A) και An013GC1 (B). (C) Γράφημα συσχέτισης μεταξύ αντοχής των στρωμάτων (kPa) και ποσοστού νερού (%) στον πυρήνα An014GC1 (Casas et al, 2006).

Οι ιδιότητες των δεικτών, αποτελούν ογκομετρικούς παράγοντες οι οποίοι έχουν προκύψει από το υγρό και αποξηραμένο ζύγισμα των υλικών και από τον όγκο των απομονωμένων κομματιών. Ωστόσο, η σχέση μεταξύ κάποιων δεικτών καθορίζεται ακόμα από τη λιθολογία, ειδικά από την πυκνότητα των κόκκων η οποία αποτελεί και τη μόνη παράμετρο η οποία σχετίζεται με τη φύση της ορυκτολογίας των δειγμάτων. Η ταξινόμηση των μεγεθών των κόκκων στην εργαστηριακή ανάλυση, έδειξε ότι παρόλο που με την οπτική παρατήρηση οι κόκκοι φαινόταν διαφορετικοί ως προς τους τύπους τους, εν τέλει σχεδόν όλοι οι κόκκοι που συλλέχτηκαν είχαν την ίδια τάξη μεγέθους. Εξαιτίας αυτής την χαμηλής ποικιλομορφίας των μεγεθών στους κόκκους των ιζημάτων, φαίνεται ότι η μεγαλύτερη συνεισφορά στην ποικιλομορφία προέρχεται από τις χημικές ιδιότητες των χημικών και ορυκτολογικών διαφοροποιήσεων ή προέρχεται από την εδραίωση των ιζημάτων εξαιτίας της υπερφόρτωσης (Casas et al, 2006).

Η μέση πυκνότητα κόκκων των ιζημάτων περιγράφεται ως  $2,641 \text{ g/cm}^3$  για τα ημιπελαγικά ιζήματα και ως  $2,709 \text{ g/cm}^3$  για τα υλικά των λατυποπαγών λάσπης (Casas et al, 2006). Οι τιμές αυτές της πυκνότητας είναι κοντά στις τιμές των περισσότερων συστατικών των ιζημάτων όπως ο χαλαζίας ( $2,64 \text{ g/cm}^3$ ), ο ασβεστίτης ( $2,71 \text{ g/cm}^3$ ) και των ορυκτών του πηλού τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη διαφοροποίηση στην πυκνότητα των κόκκων, παρά το γεγονός ότι τα τυπικά ορυκτά (καολινίτης, μονμοριλονίτης, σμεκτίτης) παρουσιάζουν τυπικές πυκνότητες μεταξύ  $2,2$  και  $2,7 \text{ g/cm}^3$  (Johnson and Olhoeft, 1984).

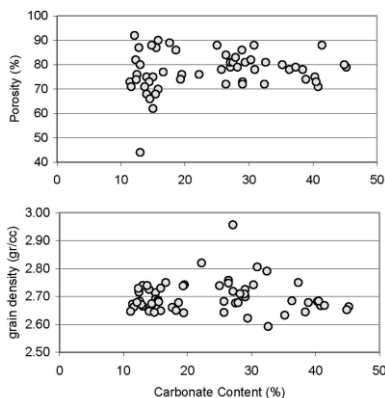
Ανάμεσα στους πυρήνες An05GC1 και An014GC1 εμφανίζεται μια συσχέτιση ανάμεσα στο πορώδες και το βάθος της πυρηνοληψίας, καθώς το πορώδες αυξάνεται με το βάθος, σε αντίθεση με τον πυρήνα An07GC4 ο οποίος δεν εμφανίζει συσχέτιση. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να ερμηνευτεί με την παρουσία δομών με πορώδεις δομές που απελευθερώνουν αέρια, αποτέλεσμα της αποσυμπίεσης που ακολούθησε μετά τη συλλογή των δειγμάτων. Το φαινόμενο αυτό είναι λιγότερο εμφανές στον πυρήνα An13GC1, ο οποίος προέρχεται έξω από τον κρατήρα του ηφαιστείου λάσπης και κατ' επέκταση έχει διαφορετική λιθολογία και στρωματογραφία. Στην περίπτωση αυτή το πορώδες και το βάθος της πυρηνοληψίας ανταποκρίνονται αρνητικά ( $R = -0.75$ ) (Casas et al, 2006).

Το ανθρακικό περιεχόμενο αποτελεί μια παράμετρο η οποία συνήθως έχει μεγάλη επίδραση στις φυσικές ιδιότητες των ιζημάτων. Ιζήματα με πυριτικά και πηλιτικά ορυκτά, συνήθως εμφανίζουν μεγαλύτερο πορώδες από τα ανθρακικά, έτσι η αύξηση της παρουσίας των ανθρακικών υλικών τείνει να συσχετιστεί με τη μείωση του πορώδους. Παρόμοια σχέση έχει παρατηρηθεί ανάμεσα στην πυκνότητα του ελεύθερου νερού και των ανθρακικών υλικών. Η συσχέτιση αυτή παρόλα αυτά δεν είναι εμφανής στα ιζήματα που ανακτήθηκαν από το σύμπλεγμα Αναξίμανδρος. Το διάγραμμα των ανθρακικών πετρωμάτων και του πορώδους, δείχνει μια περιοχή σημείων χωρίς εμφανή συσχέτιση (Εικόνα 53). Το διάγραμμα των ανθρακικών υλικών με την πυκνότητα των κόκκων, επιβεβαιώνει ότι οι δύο παράμετροι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η πυκνότητα των κόκκων εκτιμάται ότι συγκεντρώνεται σε διαφορετικές ομάδες των δειγμάτων στα λατυποπαγή λάσπης με χαμηλό ποσοστό ανθρακικών υλικών και στα διασκορπισμένα ημιπελαγικά δείγματα με υψηλά ποσοστά ανθρακικών υλικών. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι η σύσταση των λατυποπαγών λάσπης

αποτελείται από ομοιογενοποιημένες ομάδες ορυκτών, ενώ τα ημιπελαγικά δείγματα αποτελούνται από διαφοροποιημένες ομάδες πηλτικών ορυκτών και βιογενών συστατικών (Casas et al, 2006).

Η διατμηματική δύναμη εξαρτάται από τις δυνάμεις συνοχής και την τριβή ανάμεσα στα τραχιά σωματίδια των ιζημάτων. Η προχωρημένη συμπαγοποίηση εξαιτίας της παραμόρφωσης, είναι αποτέλεσμα της ενδιάμεσης αποβολής του νερού από τους πόρους των ιζημάτων και αυξάνει το συντελεστή τριβής στην αντοχή των ιζημάτων. Σε γενικές γραμμές, στη θάλασσα, η αντοχή των ιζηματογενών στρωμάτων εξαρτάται από την σύσταση του νερού. Ωστόσο τα αποτελέσματα έδειξαν μικρή συσχέτιση μεταξύ του βάθους και κατ' επέκταση οι φυσικές ιδιότητες επηρεάζονται από την συμπαγοποίηση στους πυρήνες An05GC1, An07GC4 και An14GC1. Η δύναμη των στρωμάτων και η σύσταση του νερού απέτυχαν να δείξουν κάποια αποδεκτή συσχέτιση, όταν όλα τα δεδομένα που μετρήθηκαν ληφθήκαν υπόψιν στις μετρήσεις (Casas et al, 2006). Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι αυτό ίσως σχετίζεται με τις αλλαγές στις δυνάμεις συνοχής οι οποίες αναπτύσσονται στα πλούσια σε πηλό ιζήματα, εξαιτίας της ποικιλομορφίας στην ορυκτολογία των πηλών (Schmincke et al, 1995). Ωστόσο, στα δείγματα των εξαερωμένων πυρήνων, ένα ποσοστό των αερίων που απελευθερώνονται από το πορώδες, είναι αποτέλεσμα της αποσυμπίεσης που ακολουθείται μετά από τη συλλογή των δειγμάτων. Στον πυρήνα An14GC1 περιγράφεται μια αρνητική σχέση καθώς το ποσοστό των υδριτών στα λατυποπαγή λάσπης επηρεάζει την αντοχή των στρωμάτων και υπολογίζεται μεγαλύτερη από την πραγματική μετρημένη σχέση. Ακόμα η αποσυμπίεση πιθανώς να είναι υπεύθυνη για την σχετικά μικρή μετρηθείσα δύναμη (Casas et al, 2006).

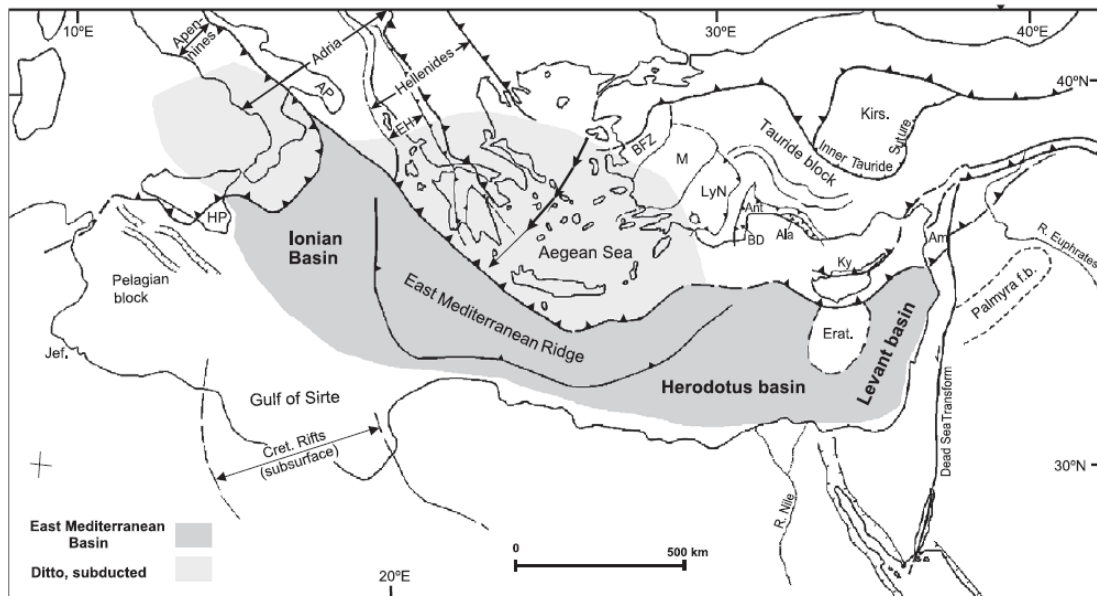
Η περιεκτικότητα του νερού δείχνει μια μικρή συσχέτιση με το βάθος της πυρηνοληψίας καθώς γενικά διαφαίνεται μια τάση μείωσης στην περιεκτικότητα καθώς προχωράμε σε μεγαλύτερα βάθη. Το καλύτερο αποτέλεσμα φαίνεται στον πυρήνα An13GC1 ( $R = -0.61$ ), όπου υπάρχει μια κανονική συμπεριφορά ως προς την περιεκτικότητα του νερού σε σύγκριση με άλλες μεταβλητές όπως της αύξησης της πυκνότητας ( $R = -0.82$ ) και της ταχύτητας ( $R = -0.56$ ), οι οποίες σχετίζονται με την μείωση της περιεκτικότητας του νερού και του πορώδους ( $R = 0.80$ ) αλλά και του κύριου μεγέθους των μονάδων κόκκων phi ( $R = 0.67$ ) (Casas et al, 2006).



53. Γραφική απεικόνιση της σχέσης του πορώδους (%) και των ανθρακικών συστατικών (%) και της πυκνότητας των κόκκων (%) και του ανθρακικού υλικού (%) των αναλυμένων δειγμάτων (Casas et al, 2006).

## 2.11 Προέλευση του υποβάθρου της Ανατολικής Μεσογείου

Το υπόβαθρο της Ανατολικής Μεσογείου σύμφωνα με τους μελετητές αποτελεί απομεινάρτι του ωκεανού της Νεοτηθύως της Μεσοζωικής εποχής (Robertson and Dixon 1984). Στα ανατολικά και στα νότια, έχει διατηρηθεί το αρχικό παθητικό περιθώριο, ενώ στα βόρεια και στα δυτικά τα παθητικά περιθώρια έχουν αλλοιωθεί από την πρόσφατη υποβύθιση και σύγκλιση των τεκτονικών πλακών. Οι μελέτες των σεισμικών μετρήσεων έδειξαν ότι το υπόβαθρο της Ανατολικής Μεσογείου έχει μέχρι και 10 Km πάχους πιθανώς ωκεάνιων στρωμάτων και ηπειρωτικών στρωμάτων, τα οποία επικαλύπτονται από ιζήματα πάχους 6 έως 12 Km (Garfunkel, 2004). Οι μετρήσεις αυτές υποστηρίζονται από τη θετική ανωμαλία του Bouguer που εμφανίζεται πάνω από το υπόβαθρο. Σε αντίθεση, η Αφρικανική-Αραβική ήπειρος επεκτείνεται δίπλα στο παθητικό περιθώριο του υποβάθρου αυτού, με το πάχος των ηπειρωτικών καλυμμάτων να κυμαίνεται 30 – 35 Km. Μια τέτοια αλλαγή στην δομή του φλοιού, οδηγεί στην ερμηνεία ότι το υπόβαθρο της Ανατολικής Μεσογείου σχηματίστηκε ως αποτέλεσμα της δημιουργίας ρωγμών οι οποίες με την σειρά τους οδήγησαν στην αποκόλληση και στην βόρεια κίνηση των τεμαχίων μακριά από τα παθητικά περιθώρια. Παρόλο που η υπόθεση αυτή είναι ευρέως αποδεκτή ωστόσο η ιστορία των ρωγμών και η αρχική θέση των τεμαχίων δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητά (Garfunkel, 2004).



54. Το υπόβαθρο της Ανατολικής Μεσογείου και η προέκταση των υποβυθιζόμενων τεμαχίων. Το τόξο με τα βέλη στο Αιγαίο πέλαγος δείχνει το μέγεθος την αποστροφής του περιθωρίου στις Εξωτερικές Ελληνίδες που σχετίζονται με την Ευρασία (Garfunkel, 2004).

Οι σημαντικές πληροφορίες που παίρνουμε για το υπόβαθρο της Α. Μεσογείου προέρχονται από τα παθητικά περιθώρια, σε συνδυασμό με πληροφορίες όπως την αρχική τοποθεσία των τεμαχίων, την ταυτότητά τους και την κίνησή τους, η οποία τα οδήγησε στα βόρεια του υποβάθρου. Στο βόρειο όριο του υποβάθρου της Α. Μεσογείου, εντοπίζεται έντονη τεκτονική δραστηριότητα γεγονός που εγείρει το ερώτημα εάν η τεκτονική δραστηριότητα ήταν παράγοντας κατά τον σχηματισμό του υποβάθρου. Το βόρειο όριο του υποβάθρου, παρουσιάζει αρκετά ιδιαίτερα τμήματα.



Στο ανατολικό άκρο εμφανίζεται το Κυπριακό τόξο το οποίο είναι τεκτονικά ενεργό και έχει παραμορφωθεί στο άνω Καινοζωικό (Garfunkel, 2004). Η συνεχής ιζηματογένεση και η έλλειψη παραμόρφωσης στη νότιο Κύπρο και η νεαρή ηλικιακά ανύψωση δείχνει ότι το τμήμα αυτό ήταν ενεργό μόνο κάποια στιγμή στο Μειόκαινο, ενώ νωρίτερα, κατά το Καινοζωικό, ήταν ανενεργό. Το δυτικό όριο της Κύπρου δεν δείχνει κάποια νεότερη παραμόρφωση. Ακόμα, στα δυτικά, με την χρήση τομογραφίας εντοπίστηκε η υποβύθιση του υπόβαθρου της Α. Μεσογείου κάτω από το Αιγαίο. Η υποβύθιση αυτή κατά μήκος του τόξου του Αιγαίου, είναι απόρροια της δυτικής υποχώρησης της υποβυθιζόμενης πλάκας, η οποία οδήγησε στη σύγχρονη επέκταση της θάλασσας του Αιγαίου και τη δεξιόστροφη περιστροφή των Εξωτερικών Ελληνίδων. Η περιστροφή αυτή, περίπου 45-50°, ξεκίνησε πριν από περίπου 25-30 Ma, γεγονός που δείχνει την σύγκρουση μεταξύ των νότιων Ελληνίδων με το υπόβαθρο της Α. Μεσογείου ξεκίνησε τουλάχιστον από εκείνη την περίοδο (Garfunkel, 2004).

## 2.12 Εστιακοί σεισμικοί μηχανισμοί στο νότιο Αιγαίο και Κύπρο.

Η Ελληνική ζώνη υποβύθισης στα νότια του Αιγαίου ανήκει σε μια από τις πιο ενεργές τεκτονικά περιοχές της Ευρώπης. Για αυτόν τον λόγο έχει προσελκύσει πάνω της πολλές έρευνες. Στο κομμάτι της τεκτονικής καταπόνησης της μικροπλάκας του Αιγαίου, παρατηρήθηκε πίεση παράλληλα με το Ελληνικό τόξο από το υπόβαθρο στο Ηράκλειο έως στα δυτικά του υπόβαθρου του Καμιλονησιού και στην βόρεια Κάρπαθο στα ανατολικά (Friederich et al., 2014). Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται με τη διάδοση της διανυσματικής ταχύτητας στο νότιο μέρος της μικροπλάκας του Αιγαίου η οποία σχηματίστηκε κυρίως από την απόσυρση της ελληνικής πλάκας στο νότιο Αιγαίο (Reilinger, 2010). Το πεδίο τάσεων την Κέρκυρα, της νότιας Καρπάθου και της Γκόκοβα φαίνεται να έχει επηρεαστεί από περιφερειακές ζώνες υποβύθισης οι οποίες αναπτύσσονται υπο-οριζόντια πιέζοντας την υπερκείμενη πλάκα, οδηγώντας την περιστροφή του συμπίεστικού άξονα προς τις μικρότερες βυθίσεις. Το φαινόμενο αυτό υποδηλώνεται από το σύμπλεγμα Ζάντε. Το συμπίεστικό κομμάτι του ηφαιστειακού τόξου πιθανώς να έχει επηρεαστεί από μαγματικές διαδικασίες στον μανδύα (Friederich et al., 2014).

Στην Ανατολική Μεσόγειο, το Κυπριακό τόξο χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη σεισμικότητα σε σχέση με το Ελληνικό τόξο. Η γεωμετρία του Κυπριακού τόξου έχει παρόμοια γεωμετρία με του Ελληνικού τόξου. Ωστόσο, η κίνηση της πλάκας στην Ανατολική Μεσόγειο και η σεισμική δραστηριότητα δείχνει ότι ο τεκτονισμός στις δύο πλάκες διαφέρει. Η σύγκληση του Ελληνικού τόξου εμφανίζει μια ταχύτητα 20-40 mm yr<sup>-1</sup> δηλαδή τρεις φορές πιο γρήγορη υποβύθιση από το Κυπριακό τόξο. Η μεγάλη ταχύτητα δείχνει ξεκάθαρα και μια πιο έντονη τεκτονική δραστηριότητα ακόμα και στα βαθύτερα επίπεδα έως τα 300 Km. Η κατεύθυνση των δύο πλακών, σε συνδυασμό και με την γεωμετρία την οποία εμφανίζουν, εμφανίζει διαφορές. Κατά μήκος του Κυπριακού τόξου, η κατεύθυνση της σχετικής κίνησής του είναι φυσιολογική στη δυτική πλευρά του, και υποπαράλληλη στην ανατολική πλευρά. Κατά μήκος του Ελληνικού τόξου, η κατεύθυνση της σχετικής κίνησης είναι φυσιολογική στο κεντρικό κομμάτι του τόξου στην περιοχή της Κρήτης και μετατρέπεται σε σχετικά πλάγια κατά μήκος των ανατολικών και δυτικών τμημάτων του τόξου εξαιτίας της γεωμετρίας του. Το ελληνικό τόξο εξαρτάται από την υποβύθισή του ως προς το μήκος του, ενώ το Κυπριακό τόξο το οποίο είναι το μισό σε μήκος από το Ελληνικό, εξαρτάται από την



υποβύθιση, την κατάρρευση και την διαμπερή κίνησή του. Συνοψίζοντας τα δύο τόξα έχουν σημαντικές διαφορές ως προς τον βαθμό και την κατεύθυνση της σχετικής τους κίνησης κατά μήκος των τόξων (Wdowinski et al., 2006).

Οι θαλάσσιες γεωφυσικές μελέτες στα νότια και στα δυτικά του Κυπριακού τόξου έχουν εμφανίσει γεωλογικές δομές οι οποίες εμφανίζουν μια βόρεια με νότια καταβύθιση κατά μήκος του τόξου. Οι πιο γνωστές δομές βρίσκονται ανάμεσα στην Κύπρο και στο σύμπλεγμα θαλάσσιων ηφαιστειών Ερατοσθένης, το οποίο αποτελεί ηπειρωτικό θραύσμα ενσωματωμένο με τον ωκεάνιο φλοιό της Ανατολικής Μεσογείου. Οι δομές αυτές υποδεικνύουν ότι τα θαλάσσια βουνά ξεκίνησαν να εμφανίζουν μια ώθηση κάτω από το ενεργό Κυπριακό περιθώριο κατά το Άνω Μειόκαινο με Κάτω Πλειόκαινο (5 Ma) (Robertson 1998). Στο δυτικό κομμάτι δεν εντοπίστηκαν γεωλογικές δομές οι οποίες να υποδηλώνουν σύγκρουση ανάμεσα στην πλάκα της Ανατολίας και την Νούμπιας. Ερμηνεύεται όμως η δημιουργία των γεωλογικών δομών στο ύψωμα της Φλωρεντίας στο βορειοδυτικό με νοτιοανατολικό δεξιό σύμπλεγμα, το οποίο σχηματίστηκε κατά μήκος της βόρειου-νότιου σύγκρουσης ανάμεσα στις δύο πλάκες. Η έλλειψη πρόσφατων γεωλογικών δομών νότια και δυτικά της Κύπρου, δείχνουν μια σημερινή βορειοανατολική – νοτιοδυτική σύγκρουση ανάμεσα στην πλάκα της Ανατολίας και της Νούμπιας, γεγονός που υπονοεί την πρόσφατη αλλαγή της κίνησης του Κυπριακού τόξου. Εξαιτίας του χαμηλού βαθμού υποβύθισης και του μικρού χρονικού διαστήματος από την αλλαγή της σχετικής κίνησης της πλάκας, δεν έχουν σχηματιστεί ακόμα γεωλογικές δομές στα δυτικά του Κυπριακού τόξου (Wdowinski et al, 2006).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Δυνητική αξιολόγηση υδριτών μεθανίου

### 3.1 Σημασία και αποθέματα υδριτών μεθανίου.

Τα τελευταία χρόνια, πολλές κυβερνήσεις ανά τον κόσμο συμπεριλαμβανομένης και αυτής των ΗΠΑ, του Καναδά, της Ρωσίας, της Ινδίας και της Ιαπωνίας, έχουν ενδιαφερθεί για τις πιθανές δυνατότητες του μεθανίου και των υδριτών. Οι υδρίτες αντιπροσωπεύουν ένα από τα μεγαλύτερα ανεκμετάλλευτα αποθέματα ενέργειας στον πλανήτη και σύμφωνα με κάποιες εκτιμήσεις, πιθανώς να τροφοδοτήσουν τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες για τα επόμενα 1000 χρόνια. Σταδιακά, έχει αρχίσει να αναπτύσσεται σημαντική γνώση σχετικά με τη φύση και τις ιδιότητές τους. Ωστόσο, τα τεχνολογικά προβλήματα και οι οικονομικοί παράγοντες δίνουν βαρύτητα στην εξόρυξη του φυσικού αερίου και όχι στους υδρίτες. Οι υδρίτες μεθανίου χαρακτηρίζονται ως το ενεργειακό καύσιμο του μέλλοντος βάσει της περιεκτικότητας σε μεθάνιο παγιδευμένο σε αυτούς. Ακόμα, ένας λόγος που παρουσιάζουν ενδιαφέρον αποτελεί και η επίδραση που έχουν στην κλιματική αλλαγή. Η περιεκτικότητα του οργανικού άνθρακα στους υδρίτες μεθανίου, εκτιμάται ότι είναι διπλάσια σε σχέση με όλα τα ορυκτά καύσιμα μαζί. Από ενεργειακή άποψη, η ποσότητα των υδριτών που βρίσκεται εγκλωβισμένη κάτω από τους ωκεανούς και τα Αρκτικά 'πέρμαφροστ' εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 53% όλων των 'απολιθωμένων' αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο), μια ποσότητα κοντά στους 10,000 γιγατόνους. Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην εξόρυξη αυτού του καυσίμου είναι ότι η στερεή του μορφή δεν καθιστά δυνατή την ανάκτησή του με τους συμβατικούς τρόπους και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στις εξορύξεις του πετρελαίου (Demirbas, Methane Gas Hydrate, 2010).

Το ποσοστό των υδριτών μεθανίου στα ωκεάνια ιζήματα, αρχικά έγινε αντιληπτό από τις σεισμικές παρατηρήσεις σε αυτά. Οι μελετητές τα θεωρούν ως το καύσιμο του μέλλοντος και πιστεύεται ότι θα καλύψουν όλες τις ενεργειακές ανάγκες τις επόμενες εκατονταετίες. Με τις ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες και την ελάττωση των ήδη υπάρχοντων αποθεμάτων, οι υδρίτες μεθανίου ίσως αποτελέσουν την πιθανή λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Οι συνθήκες οι οποίες ευνοούν την παρουσία των υδριτών μεθανίου, υπάρχουν μερικά εκατοντάδες μέτρα κάτω από τα συσσωρευτικά ηπειρωτικά περιθώρια με πλούσια σε οργανικά υλικά, ιζήματα (Gurta 2004). Έχει γίνει σαφές ότι οι υδρίτες μεθανίου αποτελούν σημαντικά συστατικά της ανώτερης γεώσφαιρας και έχουν τραβήξει την προσοχή των επιστημόνων για τρεις παράγοντες που είναι, τα αποθέματά τους, τους κινδύνους τους και το περιβάλλον (Kvenvolden 1993; Demirbas, 2010). Οι λόγοι που καθιστούν τους υδρίτες ελκυστικούς ως πιθανά ενεργειακά αποθέματα είναι δύο. Ο πρώτος είναι οι τεράστιες ποσότητες μεθανίου που εμφανίζονται απομονωμένες στις ρωγμές των δομών στα μικρά βάθη των ιζημάτων σε βάθος 2000m από την επιφάνεια της Γης. Ο δεύτερος παράγοντας είναι η ευρεία γεωγραφική κατανομή που εμφανίζουν οι υδρίτες. Έχει αναφερθεί ότι οι ενεργειακές προοπτικές των υδριτών μεθανίου είναι μεγαλύτερες από άλλες μη συμβατικές πηγές αερίων ενέργειας όπως τα κοιτάσματα ανθράκων, τα tar sands, black shales, και των συμβατικών ποσοτήτων φυσικού αερίου (Demirbas, 2010). Οι ποσότητες των πιθανών θαλάσσιων αποθεμάτων των υδριτών δεν έχει προσδιοριστεί ακόμα, αλλά δεδομένου των διαφαινόμενων μεγάλων αποθεμάτων, οι υδρίτες θα συνεχίσουν να προσελκύουν τα βλέμματα μέχρι η τεχνολογική ανάπτυξη να κάνει βιώσιμη την εξόρυξή τους (Grauls 2001). Οι υδρίτες θεωρούνται ως το μέλλον



της ενεργειακής πηγής υδρογονανθράκων και πιθανώς να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες που θα προκύψουν, ενώ και αυτοί αλλά και κάθε άλλο ελεύθερο αέριο παγιδευμένο κάτω από τη ζώνη ισορροπίας των υδριτών, πιθανώς να αποτελέσουν σημαντικά αποθέματα για το μέλλον (Demirbas, 2010).

Οι υδρίτες που εντοπίζονται στον φλοιό της Γης, απαρτίζονται από φυσικό αέριο το οποίο είναι ουσιαστικά 100% αέριο μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) (Englezos and Lee, 2005). Η ποσότητα των υδριτών εκτιμάται σε παγκόσμια κλίμακα σε 10,000 με 40,000 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα (TCM). Έχει βρεθεί ότι περίπου  $1 \text{ m}^3$  υδριτών μεθανίου απελευθερώνει περίπου  $170 \text{ m}^3$  αέριου μεθανίου σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας και πίεσης (STP), ή  $0,55 \text{ m}^3$  αέριου μεθανίου σε 30 MPa. Συνεπώς, γίνεται αμέσως κατανοητή η πιθανή συνεισφορά των υδριτών μεθανίου ως πιθανή μελλοντική πηγή ενέργειας (Englezos and Lee, 2005). Οι υδρίτες μεθανίου περιέχουν περισσότερο μεθάνιο ανά μονάδα όγκου από ότι τα πετρώματα με συμβατικά αποθέματα φυσικού αερίου (MacDonald, 1983). Ακόμα αξίζει να σημειωθεί ότι περίπου  $0,8 \text{ m}^3$  νερού απελευθερώνεται όταν  $1 \text{ m}^3$  υδριτών μεθανίου διαχωρίζεται (Englezos and Lee, 2005).

Οι εκτιμήσεις για τις ποσότητες των υδριτών σε σταθερή κατάσταση διαφέρουν σημαντικά. Η επικρατούσα άποψη λέει ότι η αξία των υδριτών εκτιμάται σε  $20,5 \times 10^{15} \text{ m}^3$  ή 21,000 (TCM). Ωστόσο, κάθε εκτίμηση ανάμεσα στα 10,000 με 40,000 (TMC) θεωρείται αποδεκτή. Όλες οι εκτιμήσεις παρόλα αυτά πρέπει να εξετάζονται με προσοχή εξαιτίας της πορώδους φύσεως των υδριτών. Οι υδρίτες έχουν την τάση να δεσμεύουν μεγάλες ποσότητες νερού και έτσι οι ποσότητες του νερού που μετατρέπονται σε υδρίτες είναι σημαντικά υπερεκτιμημένες (Englezos and Lee, 2005). Στην Εικόνα 54 φαίνονται οι εκτιμήσεις των υδριτών και των γνωστών συμβατικών αποθεμάτων φυσικού αερίου. Θεωρείται ότι 1 TMC φυσικού αερίου προερχόμενο από υδρίτες θα γίνει διαθέσιμο στις ΗΠΑ τα επόμενα 25 χρόνια (Englezos and Lee, 2005). Τέλος εκτιμάται ότι στον κόσμο υπάρχουν διαθέσιμα 370 TMC συμβατικού φυσικού αερίου. Η παγκόσμια ετήσια κατανάλωση φυσικού αερίου εκτιμάται σε 2,4 TMC, έτσι οι αέριοι υδρίτες θεωρούνται τεράστια πιθανά αποθέματα ενέργειας (Englezos and Lee, 2005).

Country or region	Minimum estimate of natural gas hydrate (TCM)	Maximum estimate of natural gas hydrate (TCM)	Mean estimate of natural gas hydrate (TCM)	Known conventional natural gas reserves (TCM)
Canada <sup>(a)</sup>	25	730		11
US <sup>(b)</sup>	-	-	8,500	5-6
China & Central Asia <sup>(c)</sup>	-	-	430	10
Japan <sup>(d)</sup>	7.4	-	-	-
World	10,000	40,000	20,500	370

(a) Scott Dallimore, Natural Resources Canada, Personal communication, April 2004; (b) Kleinberg and Brewer, 2001; (c) Sloan, 2003b; (d) Ryo Ohmura, AIST, Hokkaido, Japan, personal communication, April 2004.

Korean J. Chem. Eng. (Vol. 22, No. 5)

55. Πίνακας αποθεμάτων αέριων υδριτών και συμβατικών αποθεμάτων φυσικού αερίου (Englezos and Lee, 2005).

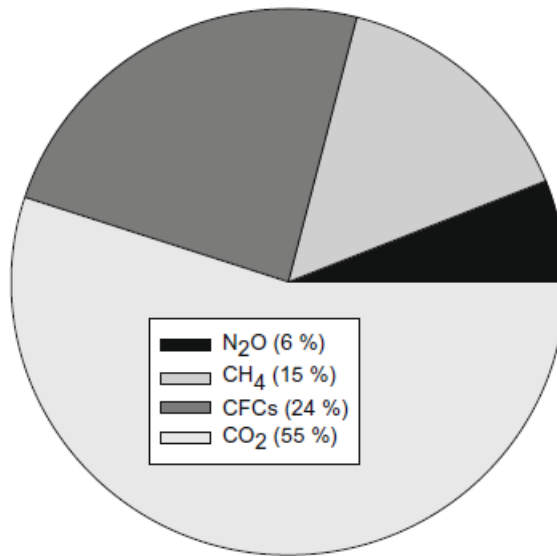
Αξίζει ακόμα να σημειωθεί ότι η ενεργειακή πυκνότητα των υδριτών μεθανίου είναι 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή των ανθρακικών στρωμάτων με μεθάνιο (CBM) και 2-5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του συμβατικού φυσικού αερίου. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι ο όγκος του  $\text{CH}_4$  σε σταθερές συνθήκες ανά όγκο του ιζήματος (Englezos and Lee, 2005). Επιπρόσθετα, ενώ τα συμβατικά αποθέματα των καυσίμων

[fossil fuels] δεν είναι όμοια κατανεμημένα, οι υδρίτες εντοπίζονται σχεδόν σε όλα τα μέρη του πλανήτη (Kleinberg and Brewer, 2001). Το αν αυτοί οι υδρίτες μεθανίου γίνεται να ανακτηθούν από το περιβάλλον μένει να φανεί με τις μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις. Τέλος, σημαντικό παράγοντα αποτελεί η σύνδεση του μεθανίου με πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, γεγονός που το θέτει στο 'μικροσκόπιο' των επιστημόνων για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του με την μελλοντική χρήση του ως πηγή ενέργειας (Englezos and Lee, 2005).

### 3.2 Κλιματική αλλαγή και επίδραση των υδριτών μεθανίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Σήμερα ο κόσμος αντιμετωπίζει δύο κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα, την παγκόσμια υπερθέρμανση και τη μόλυνση του αέρα. Και τα δύο περιβαλλοντικά προβλήματα συνδέονται με την χρήση των ορυκτών καυσίμων. Η παγκόσμια κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων είναι εντυπωσιακή και αυξάνεται σταθερά με ανησυχητικούς ρυθμούς. Η τιμή του πετρελαίου έχει τετραπλασιαστεί σε σχέση με αυτήν του 1970 και συνεχίζει να αυξάνεται τα τελευταία χρόνια, ενώ η αυξανόμενη ανησυχία για τη μόλυνση που συνδέεται με την ενέργεια και η πιθανότητα της κλιματικής αλλαγής, έχουν οδηγήσει στην επαναξιολόγηση της χρήσης της ενέργειας (Demirbas, 2010).

Περίπου το 98% των εκπομπών των υδρογονανθράκων είναι αποτέλεσμα της καύσης ορυκτών καυσίμων όπως άνθρακες, πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Η μείωση στην χρήση των ορυκτών αυτών καυσίμων θα μειώσει σημαντικά και το ποσό του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται και κατ' επέκταση θα περιοριστεί και το επίπεδο της μόλυνσης. Η μείωση στην τιμή, θεωρείται ότι θα ελέγξει τις εκπομπές των ανθράκων και προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα και τη μείωση του κόστους των τεχνολογιών που δεν χρησιμοποιούν άνθρακα όπως τεχνολογίες ενεργειακής αποδοτικότητας και εξοπλισμό διατήρησης της ενέργειας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε μειώνοντας τις ενεργειακές ανάγκες στο σύνολό τους, είτε χρησιμοποιώντας εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Το μεγάλο ζήτημα των επιστημόνων σήμερα, επικεντρώνεται στην προσπάθεια περιορισμού των εκπομπών αερίων και στην ανάπτυξη εξελεγκμένων τεχνολογιών οι οποίες εκπέμπουν λιγότερο διοξείδιο, όπως καύση υψηλής αποδοτικότητας ή και καθόλου διοξειδίου όπως η πυρηνική ενέργεια, το υδρογόνο, η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η γεωθερμία και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιπρόσθετα, οι συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> μπορούν να μειωθούν με την καύση βιομάζας καθώς το CO<sub>2</sub> είναι ουδέτερο καύσιμο. Ανάμεσα στα ορυκτά καύσιμα, το φυσικό αέριο είναι το λιγότερο υπεύθυνο για της εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Το υδροποιημένο φυσικό αέριο (LPG) εκπέμπει την μεγαλύτερη ποσότητα CO<sub>2</sub> σε σχέση με κάθε άλλο φυσικό αέριο. Την παρούσα περίοδο ο ορυκτός άνθρακας ευθύνεται για το 30-40% των εκπομπών CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα από όλα τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα. Οι εκπομπές του CO<sub>2</sub>, οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs), το CH<sub>4</sub> και το N<sub>2</sub>O είναι υπεύθυνες για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά η υπερθέρμανση του πλανήτη σχετίζεται όλο και περισσότερο με την συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα (Demirbas, 2010).



56. Συνεισφορά των αερίων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Demirbas, 2010).

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός επιστημόνων ο οποίος θεωρεί ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες έχουν αυξήσει την συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα περισσότερο από το 1/3 τα τελευταία 100 χρόνια, οδηγούν σε μια σταδιακή παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο η θεωρία αυτή της λεγόμενης παγκόσμιας υπερθέρμανσης βρίσκει πολέμιους ερευνητές, οι οποίοι θεωρούν ότι τέτοιοι ισχυρισμοί και θεωρίες είναι ατελείς και υπάρχουν πολλαπλοί παράγοντες, οι οποίοι ακόμα είναι απροσδιόριστοι ως προς τη φύση και την κατεύθυνση που παίρνει το κλίμα της Γης. Οι παράγοντες αυτοί έχουν τη δυνατότητα να τροποποιήσουν την κατεύθυνση με την οποία η θερμότητα και η ενέργεια διανέμεται ανάμεσα στην στεριά, στους ωκεανούς, στην ατμόσφαιρα και στα καλύμματα πάγων του κλιματικού συστήματος του πλανήτη. Ουσιαστικά, τέτοιες αλλαγές είναι πιθανό να έχουν επίδραση στο κλίμα του πλανήτη. Υπάρχουν αναμφίβολα άνθρωποι οι οποίοι δεν πιστεύουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Πολλοί ακόμη ισχυρίζονται ότι η υπερθέρμανση είναι εμφανής και μόνο αυτό το επιχείρημα αρκεί για να πείσει το 'ακροατήριο'. Άλλοι θεωρούν ότι η παρούσα αύξηση της θερμοκρασίας είναι αποτέλεσμα ενός μεγαλύτερου φυσικού κύκλου, καθώς το σύμπαν με τη διαστολή του από την Μεγάλη Έκρηξη διαστέλλεται και ψύχεται, κατ' επέκταση θεωρούν ότι τους επόμενους δύο αιώνες είναι πιθανό να υπάρξει μια τάση μείωσης της θερμοκρασίας παρόλο που σήμερα διαφαίνεται αύξηση. Οι επιστήμονες ακόμα δεν έχουν καταλήξει σε ένα συμπέρασμα ως προς το πόσο γρήγορα και έντονα θα συνεχιστεί η υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι μελέτες έδειξαν ότι το CO<sub>2</sub> σε συγκεντρώσεις, παίζει σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο αυτό, παρόλο που το περισσευούμενο CO<sub>2</sub> μπορεί να απορροφηθεί από τα φυτά ή να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα σε κάποιες περιπτώσεις (Demirbas, 2010).

Οι υδρίτες πιθανώς να επηρεάζουν το κλίμα της Γης, καθώς όταν θερμανθούν ή αποσυμπιεστούν, αποσυντίθενται και διαλύονται σε νερό και αέριο μεθάνιο, το οποίο είναι ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου, τα οποία θεωρούνται υπεύθυνα για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Η απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων μεθανίου στην

ατμόσφαιρα σίγουρα μπορεί να επηρεάσει την υπερθέρμανση του πλανήτη (Demirbas, 2010). Έχει βρεθεί από έρευνες ότι τα επίπεδα μεθανίου στην ατμόσφαιρα ήταν χαμηλότερα την εποχή των Παγετώνων από ότι την μεταπαγετώδη εποχή (Chapellaz et al, 1993). Στην πραγματικότητα το μεθάνιο είναι πολλές φορές πιο 'αποτελεσματικό' ως αέριο του θερμοκηπίου σε σχέση με το CO<sub>2</sub>. Έτσι, αν οι ροές του μεθανίου από τη διάλυση των υδριτών καταλήξουν στην ατμόσφαιρα, τότε αυτό αναμφίβολα θα επιβαρύνει το φαινόμενο της υπερθέρμανσης. Επιπρόσθετα, καθώς η Γη θερμαίνεται, αυξάνεται και η θερμοκρασία του νερού στον πυθμένα της θάλασσας με αποτέλεσμα οι υδρίτες να αποσυντίθενται στις θαλάσσιες περιοχές όπου βρίσκονται παγιδευμένοι. Το γεγονός αυτό θα επιβάρυνε ακόμη περισσότερο το πρόβλημα της υπερθέρμανσης εξαιτίας των αερίων του θερμοκηπίου. Το μεθάνιο μπορεί να απελευθερωθεί από τους υδρίτες στην ατμόσφαιρα με την αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, το επίπεδο της θάλασσας ανεβαίνει ελάχιστα ώστε το ζεστό νερό να καλύψει παγωμένες Αρκτικές περιοχές με αποτέλεσμα τα επηρεάζεται η ζώνη ισορροπίας των υδριτών στα ιζήματα και έτσι απελευθερώνεται μεθάνιο στην ατμόσφαιρα (Demirbas, 2010).

Η αποσύνθεση των υδριτών μεθανίου κατά το λιώσιμο των πάγων έχει συνδεθεί με το πέρας της εποχής των Παγετώνων πριν από κάποια εκατομμύρια χρόνια. Η παρουσία μεγάλων αποθεμάτων υδριτών στους ωκεανούς, δείχνει τη σημαντική επίδραση της παγετώδους εποχής (Paul et al., 1991). Κατά τον σχηματισμό των μεγάλων καλυμμάτων πάγου το επίπεδο της θάλασσας μειώθηκε, μειώνοντας και την πίεση του ωκεανού στα στρώματα των υδριτών. Τα ρηγά αποθέματα των υδριτών έγιναν ασταθή και απελευθέρωσαν μεθάνιο στην ατμόσφαιρα, το οποίο βοήθησε στη θέρμανση του πλανήτη και τη λήξη της παγετώδους εποχής. Το σενάριο αυτό παρόλα αυτά, παραμένει υπό αμφισβήτηση καθώς τα αποθέματα των πέρμαφροστ περιέχουν πολύ περισσότερες ποσότητες μεθανίου σε σχέση με αυτήν στην παγετώδεις περιόδους, όπου τα 'πέρμαφροστ' ήταν πολύ περισσότερο εξαπλωμένα σε σχέση με το πού εμφανίζονται σήμερα (Demirbas, 2010). Επιπρόσθετα, η διάλυση των υδριτών έχει συσχετιστεί με την ανοξία στους ωκεανούς και τη μαζική εξαφάνιση της θαλάσσιας πανίδας στο τέλος του Περμίου. Η οξειδωση του μεθανίου μέσα στον θαλάσσιο ωκεανό θα μπορούσε να έχει δεσμεύσει ένα μεγάλο μέρος του διαλυμένου οξυγόνου μέσα σε αυτόν (Matsumoto 1995).

Οι γεωτρήσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου που διενεργούνται στα πέρμαφροστ ή σε θαλάσσιες περιοχές προκειμένου να φτάσουν σε συμβατικά κοιτάσματα, πολλές φορές έρχονται σε επαφή με υδρίτες μεθανίου, τους οποίους οι εταιρίες πολλές φορές αποφεύγουν εξαιτίας της έλλειψης κατανόησης για τους μηχανισμούς και τις θερμικές δυνατότητες των ιδρυτών στα ιζήματα ξενιστές (Demirbas, 2010).

Η αφθονία του μεθανίου στην ατμόσφαιρα το 1998 ήταν 1745 ppb, πολύ μεγαλύτερη από το 1750 όπου ήταν 700 ppb. Την ίδια περίοδο το CO<sub>2</sub> αυξήθηκε από 278 ppm σε 365 ppm. Υπάρχει μια μεγάλη αλλά άγνωστη ακριβώς ποσότητα μεθανίου στους υδρίτες μεθανίου στον ωκεάνιο πυθμένα, καθώς ο φλοιός της Γης περιέχει τεράστιες ποσότητες μεθανίου. Μεγάλες ποσότητες μεθανίου παράγονται αναερόβια με τη μεθανογένεση, ενώ άλλες πηγές είναι τα ηφαίστεια λάσπης, τα οποία συνδέονται με την ύπαρξη βαθιών γεωλογικών ρηγμάτων και ζωικές εντερικές ζυμώσεις. Το μεθάνιο έχει 21 φορές περισσότερη επίδραση στην υπερθέρμανση από ότι η αντίστοιχη μάζα



διοξειδίου του άνθρακα. Η ατμόσφαιρα της Γης διαθέτει πολλές δυνητικές πηγές μεθανίου, μια εξ των οποίων είναι και οι υδρίτες μεθανίου οι οποίοι υπάρχουν σε ένα μεταβατικό στάδιο ισορροπίας με το περιβάλλον. Η ισορροπία αυτή επηρεάζεται από περιβαλλοντολογικούς παράγοντες όπως η πίεση και η θερμοκρασία. Η ποσότητα του μεθανίου η οποία είναι εγκλωβισμένη στους υδρίτες, είναι ίσως 3000 φορές περισσότερη από αυτήν της ατμόσφαιρας και αυτή η τεράστια ποσότητα μεθανίου αν απελευθερωθεί ίσως έχει καταστροφικές συνέπειες για το παγκόσμιο κλίμα (Demirbas, 2010).

Στα θαλάσσια ιζήματα είναι δυνατό να προκαλείται κατάρρευση των δομών ή ολίσθηση. Σε ορισμένες περιπτώσεις η κίνηση αυτή των ιζημάτων πιθανώς οφείλεται στην αποσύνθεση των υδριτών και κατ' επέκταση στην αύξηση του απελευθερωμένου αερίου. Σε ηπειρωτικές περιοχές, η συνεχής ιζηματογένεση πολλές φορές οδηγεί στην ταφή των ιζημάτων με υδρίτες σε τέτοια βάθη στα οποία οι υδρίτες δεν είναι πλέον σε σταθερή κατάσταση και σχετίζονται με διάλυση σε ένα μίγμα νερού με υγρή και αέρια υφή. Η διάλυση των υδριτών δημιουργεί μια ζώνη αδυναμίας στα ιζήματα, όπου μελλοντικά η πλαγιά αυτή μπορεί να αστοχήσει δίνοντας βαρυτικές κατολισθήσεις και σεισμούς. Οι αλλαγές αυτές σε μεγάλη κλίμακα χρόνου, έχουν μετατρέψει τα πρώην στερεά ιζήματα σε λασπώδη με αποτέλεσμα να συνδέονται με διαπυρισμό, ηφαιστειακή λάσπη, ροές λάσπης, οι οποίες δομές εξαρτώνται από την σύσταση των ιζημάτων και την τοπογραφία του πυθμένα (Demirbas, 2010).

Συνολικά, οι υδρίτες εντοπίζονται σε ρηχά ιζηματογενή πετρώματα στον φλοιό της Γης, το οποίο γενικά χαρακτηρίζεται ως ένα σταθερό σύστημα ισορροπίας ανάμεσα στα συστατικά του, τα οποία είναι τα ιζήματα, το νερό των πόρων, οι ροές των ρευστών, η πίεση, η θερμοκρασία, το υπερκείμενο νερό και οι υδρίτες. Αφαιρώντας μία μεταβλητή από το σύστημα ισορροπίας, πιθανώς να έχει απόρροια την αποσταθεροποίηση ολόκληρου του συστήματος με αποτέλεσμα οι επιπτώσεις στο περιβάλλον να είναι μη αναστρέψιμες. Οι αποσταθεροποιητικοί παράγοντες μπορεί να είναι είτε κάποια φυσική διαταραχή, είτε μια διαταραχή η οποία σχετίζεται με εξορύξεις. Οι μελέτες σε γενικές γραμμές έχουν δείξει ότι οι υδρίτες μεθανίου έχουν τη δυναμική να επηρεάσουν το παγκόσμιο κλίμα και το γεωλογικό περιβάλλον ακόμα και σε καταστροφική κλίμακα (Demirbas, 2010).

### 3.3 Θετικές χρήσεις των υδριτών και αποθήκευση αερίων.

Τα φυσικά αποθέματα των υδριτών στον πλανήτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγές αερίων οι οποίες μπορούν να καλύψουν τεράστιες ενεργειακές ανάγκες στην παγκόσμια οικονομία. Η εκτιμώμενη ποσότητα του μεθανίου σε σταθερή κατάσταση αποθεμάτων είναι περίπου  $10^{16}$  m<sup>3</sup> (Englezos, 1993). Επιπρόσθετα, υπάρχουν εκτιμήσεις που δείχνουν ότι υπάρχουν παγκοσμίως παρόντα, περισσότερα οργανικά αποθέματα ως υδρίτες μεθανίου σε σχέση με κάθε άλλο ορυκτό καύσιμο (Booth et al., 1996). Πιστεύεται ότι αν εξορυχθεί μόλις το 1% των εκτιμώμενων αποθεμάτων του μεθανίου από τους υδρίτες θα καλυφτούν οι ενεργειακές ανάγκες της Αμερικής για οχτώ δεκαετίες. Γενικά, υπάρχουν τρεις τρόποι παραγωγής μεθανίου από τα αποθέματα των υδριτών. Η πρώτη είναι με μείωση της πίεσης στους ταμιευτήρες με στόχο η πίεση να πέσει κάτω από το σημείο ισορροπίας των υδριτών. Ο δεύτερος τρόπος είναι με την

αύξηση της θερμοκρασίας στους ταμειυτήρες με θέρμανση ώστε η θερμοκρασία να φτάσει πάνω από το όριο ισορροπίας των υδριτών. Η τρίτη μέθοδος είναι με την προσθήκη εναλλακτικών αερίων ή καταλυτών όπως CO<sub>2</sub> ή μεθανόλης, τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν το μεθάνιο στις δομές των υδριτών ή μπορούν να αλλάξουν τις συνθήκες ισορροπίας των εν λόγω υδριτών (Eslamimanesh et al., 2012). Παρόλο που το μεθάνιο δεν έχει εξορυχθεί από τα αποθέματα υδριτών σε εμπορικό επίπεδο και ο ΕΡΡΑ δεν το έχει συμπεριλάβει στις αναφορές των μελλοντικών φυσικών αποθεμάτων, αναμένεται να αρχίσει η εκμετάλλευσή του τα επόμενα 15 χρόνια κυρίως για τον λόγο ότι τα συμβατικά αποθέματα φυσικού αερίου στερεύουν με γοργούς ρυθμούς (Eslamimanesh et al., 2012).

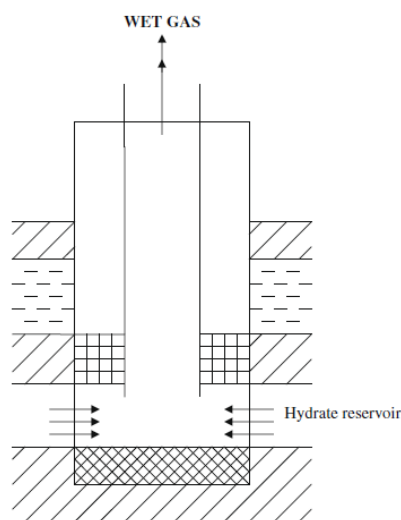
Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι οι δομές των υδριτών μεθανίου έχουν σημαντικές χρήσεις ως μέσο αποθήκευσης αερίων. Για παράδειγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποθηκευτικό μέσο του φυσικού αερίου ή των υδρογονανθράκων για την μεταφορά τους, σαν μέσο ψύξης. Η αποθήκευση και η μεταφορά με την μορφή υδριτών έχει πλεονεκτήματα τα οποία είναι η ασφάλεια για την διαδικασία της μεταφοράς και μικρότερη ποσότητα όγκου σε σχέση με συμβατικές μεθόδους αποθήκευσης όπως η υγροποίηση. Λεπτομερείς οικονομικές αναλύσεις έδειξαν ότι το κεφάλαιο που απαιτείται για την μεταφορά του φυσικού αερίου με την μορφή αερίων υδριτών, είναι χαμηλότερο από αυτό που απαιτείται για την τεχνική της υγροποίησης του φυσικού αερίου (LNG), κυρίως εξαιτίας της χαμηλής επένδυσης σε εγκαταστάσεις και εξοπλισμό (Javanmardi et al., 2005). Από την άλλη πλευρά, ο Mitsui (Ship building & Engineering Company Pilot Plant, Hiroshima, Japan), υποστηρίζει ότι αποδεδειγμένα οι υδρίτες μεθανίου οικονομικά είναι πιο κοστοβόροι στην αποθήκευση και την μεταφορά τους σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο της υγροποίησης (LNG) για το φυσικό αέριο (Eslamimanesh et al., 2012).

### 3.4 Τεχνικές εκμετάλλευσης του μεθανίου από τους υδρίτες.

Οι επιστήμονες εκφράζουν ορισμένες ανησυχίες σχετικά με την εκμετάλλευση των υδριτών μεθανίου και την χρήση τους, οι οποίες σχετίζονται με πρωτόκολλα ασφάλειας των γεωτρήσεων και πιθανές επιδράσεις στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή μιας και το μεθάνιο αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου και η απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων στην ατμόσφαιρα πιθανώς να επηρεάσει τον παγκόσμιο κύκλο των ανθράκων. Όπως έχει αναφερθεί οι τρόποι εξόρυξης των υδριτών επιτυγχάνονται είτε με διαδικασίες αποσυμπίεσης, είτε με θερμικές διαδικασίες, είτε εκχύσεις άλλων χημικών αναστολέων. Οι τρεις τρόποι σχετίζονται με τις θερμοδυναμικές συνθήκες της ζώνης ισορροπίας των υδριτών καθώς προκαλείται η διάλυσή του (Demirbas, 2010).

**Αποσυμπίεση:** Η πρώτη μέθοδος εκμετάλλευσης των υδριτών είναι η αποσυμπίεση, στην οποία η παραγωγή βασίζεται στην τεχνητή αποσυμπίεση των υδριτών με σκοπό την αποσύνθεσή τους. Η αποσυμπίεση λαμβάνει χώρο με άντληση, ειδικά του ελεύθερου αερίου σε BSR συνθήκες. Οι υδρίτες με την άντληση διαλύονται και πηγαίνουν σε χαμηλής πίεσης στρώματα αερίων. Ωστόσο, για τη διάλυση πρέπει να εξασφαλιστεί η ελάττωση της θερμοκρασίας. Ο στόχος είναι να χαμηλώσει η πίεση στην ελεύθερη ζώνη των αερίων ακαριαία κάτω από την ζώνη ισορροπίας των υδριτών, δημιουργώντας τους υδρίτες στη βάση της ισορροπίας για την διάλυσή τους και την κατακόρυφη κίνηση του ελεύθερου αερίου μέσα στο φρεάτιο. Η αποσυμπίεση αποτελεί

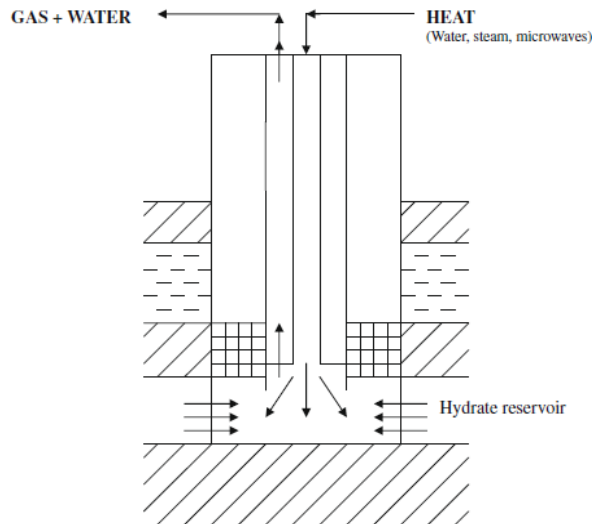
την πρώτη μέθοδο παραγωγής μεθανίου που δοκιμάστηκε έξω από συνθήκες εργαστηρίου. Πολλές φορές είναι ωφέλιμο να χρησιμοποιήσουμε παραπάνω από έναν τρόπο εξόρυξης. Σε όλες τις περιπτώσεις όμως, η αποσυμπίεση σχετίζεται με τα υγρά στους πόρους. Οι υδρίτες εκτίθενται σε ένα περιβάλλον χαμηλής πίεσης όπου γίνονται ασταθείς και αποσυντίθενται σε μεθάνιο και νερό. Η ενέργεια που απαιτείται για την διαδικασία αυτή, προέρχεται από το εσωτερικό της Γης. Στη συνέχεια το μεθάνιο που απελευθερώνεται μπορεί να ανακτηθεί με συμβατικές τεχνολογίες. Η μέθοδος της αποσυμπίεσης έτσι όπως έχει διαμορφωθεί περιλαμβάνει οριζόντια γεώτρηση στις υποκείμενες ζώνες με ελεύθερο αέριο. Καθώς το αέριο αποχωρεί, οι υπερκείμενοι υδρίτες αποσυμπιέζονται και αποσυντίθενται σε αέριο (Demirbas, 2010). Η συνεχιζόμενη άντληση των αερίων οδηγεί στην διατήρηση της πίεσης και αποσύνθεσης των υδριτών στην βάση. Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για αποθέματα τα οποία είναι απλωμένα σε εγκλεισμό κάτω από καλύμματα υδριτών (Max et al., 1999).



#### 57. Εξαγωγή αερίων με την μέθοδο της αποσυμπίεσης (Demirbas, 2010).

**Θερμική διέγερση:** Η δεύτερη μέθοδος είναι η θερμική διέγερση, κατά την οποία μια πηγή θερμότητας παρέχεται κατευθείαν στην δομή ή διοχετεύεται με ατμό ή ζεστό νερό ή με άλλο θερμό υγρό ή διοχετεύεται έμμεσα με ηλεκτρικά και υπερηχητικά μέσα, αποσκοπώντας στο να αυξήσει την θερμοκρασία και να επηρεάσει τη ζώνη ισορροπίας των υδριτών, με αποτέλεσμα την αποσύνθεση αυτών. Κατά τη διαδικασία αυτή, η θερμική ενέργεια απελευθερώνεται στο στρώμα των υδριτών μεθανίου ώστε να αποσυνθέσει το αέριο. Η μέθοδος έχει ευνοϊκή ενεργειακή ισορροπία καθώς η ενέργεια που απαιτείται για την αποσύνθεση είναι το 6% της ενέργειας που περιέχεται στο απελευθερωμένο αέριο. Σε γενικές γραμμές ο ατμός ή το ζεστό νερό, διοχετεύονται προς τα κάτω στην οπή εξόρυξης για να διαλύσουν τους υδρίτες και να απελευθερώσουν το μεθάνιο. Το μεθάνιο αντλείται προς την επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα μέσω μιας άλλης γεώτρησης. Η άμεση εξέταση της μεθόδου αυτής μπορεί να γίνει με δύο μοντέλα. Το πρώτο είναι ένα μετωπικό σκούπισμα παρόμοιο με τις πλημύρες ατμού οι οποίες χρησιμοποιούνται συστηματικά στην παραγωγή βαρέως πετρελαίου. Το δεύτερο μοντέλο είναι η διοχέτευση ζεστών υγρών μέσω ενός κατακόρυφου σωλήνα ανάμεσα σε ένα πηγάδι εισπίεσης και ένα πηγάδι παραγωγής. Ένα μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ένα σημαντικό ποσοστό την

εφαρμοσμένης ενέργειας χάνεται σε στρώματα τα οποία δεν περιέχουν υδρίτες μεθανίου. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι ότι ο ορίζοντας παραγωγής πρέπει να έχει καλό πορώδες, της τάξεως του 15% ή και περισσότερο, ώστε η διοχέτευση της θερμότητας να είναι αποτελεσματική. Αυτά τα μειονεκτήματα καθιστούν την μέθοδο της θερμικής διέγερσης αρκετά δαπανηρή (Demirbas, 2010).

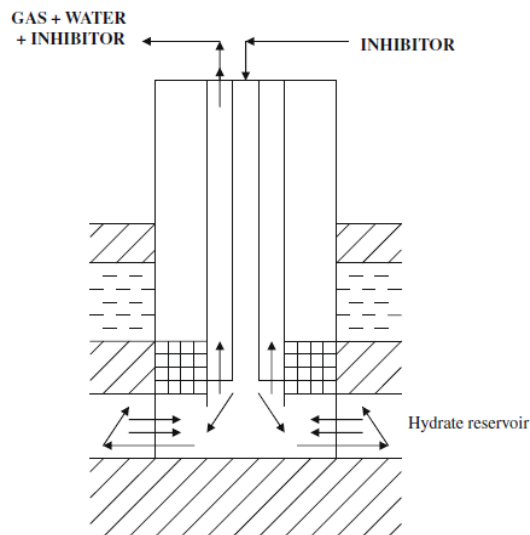


58. Παραγωγή μεθανίου με θερμική διέγερση (Demirbas, 2010).

**Διαδικασία χημικής αναστολής:** Η τρίτη μέθοδος είναι η χημική αναστολή με διοχέτευση χημικών. Η διαδικασία είναι παρόμοια με την προηγούμενη αλλά χρησιμοποιούνται χημικά μέσα τα οποία συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται για την καταστολή του σχηματισμού του πάγου. Η μέθοδος αυτή προσπαθεί να εκτοπίσει τις συνθήκες ισορροπίας των υδριτών πέρα από τη ζώνη ισορροπίας των θερμοδυναμικών συνθηκών μέσω εισπίεσης ρευστών χημικών καταστολέων απευθείας στους υδρίτες. Η μέθοδος της χημικής καταστολής είναι και αυτή ακριβή, λιγότερο όμως από αυτήν της θερμικής διέγερσης, καθώς το κόστος των χημικών είναι μεγάλο ενώ απαιτεί και αυτή μεγάλο πορώδες. Κατά τη διαδικασία, ένας χημικός αναστολέας όπως η μεθανόλη, διοχετεύεται στην ζώνη των υδριτών (Demirbas, 2010). Ο χημικός αναστολέας μετατοπίζει την ισορροπία της πίεσης και της θερμοκρασίας ώστε οι υδρίτες να μην είναι πια σταθεροί στις επί τόπου συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ενώ με την επαφή τους με τον αναστολέα αποσυντίθενται (Desa 2001). Μια μελέτη των Li et al. (2007), ερεύνησε την συμπεριφορά της παραγωγής μεθανίου από το πορώδες των ιζημάτων με την διοχέτευση διαλύματος αιθυλικής γλυκόλης, με διαφορετικές συγκεντρώσεις και διαφορετικούς ρυθμούς διοχέτευσης σε ένα μονοδιάστατο εξοπλιστικό πείραμα. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι η παραγωγή αερίου μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα στάδια, την αρχική διοχέτευση, την διάλυση με την αιθυλική γλυκόλη, την αποσύνθεση των υδριτών και την έξοδο του εναπομείναντος αερίου. Παρόλα αυτά, ο ρυθμός της παραγωγής του νερού παραμένει συνεχής κατά την διάρκεια όλης της διαδικασίας. Η απόδοση της παραγωγής επηρεάζεται τόσο από τη συγκέντρωση της αιθυλικής γλυκόλης, όσο και από το ρυθμό διοχέτευσης της και φτάνει τα μέγιστα της αποδοτικότητας όταν η συγκέντρωσή της φτάσει το 60 wt% (Li et al., 2007). Η



τεχνολογία με την διοχέτευση την αιθυλικής γλυκόλης αποτελεί μια φτηνή μέθοδο εξόρυξης, έχει ασφαλέστερα όρια συγκέντρωσης και είναι περιβαλλοντικά πιο φιλική σε σχέση με την μεθανόλη για την πρόληψη των θαλάσσιων αερίων των υδριτών. Η αιθυλική γλυκόλη έδειξε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την χρήση της μεθανόλης (MeOH), έτσι χωρίς την ύπαρξη εγκαταστάσεων ανάκτησης, απαιτούνται τεράστιες ποσότητες μεθανόλης ώστε να διοχετευτούν σε μεγάλο όγκο αερίου με αποτέλεσμα να αυξάνεται αξιοσημείωτα το λειτουργικό κόστος. Η τιμή της μονάδας της μεθανόλης και της αιθυλικής γλυκόλης ανέρχεται στα 0,84\$ και 4,75\$ ανά γαλόνι αντίστοιχα. Με την πρώτη ματιά μπορεί να διαφαίνεται ότι η χρήση της μεθανόλης ως κόστος είναι πιο προσιτή για την χρήση ως χημικός αναστολέας, όμως η ανάκτησή της και η ανακύκλωσή της, τα οποία προστίθενται στο λειτουργικό κόστος, ανεβάζουν την τιμή της σημαντικά. Επιπρόσθετα η χρήση και η αποθήκευση της μεθανόλης, καθώς αυτή είναι πολύ εύφλεκτη, εμφανίζει μεγαλύτερο ρίσκο και επικινδυνότητα σε σχέση με την αιθυλική γλυκόλη (Demirbas, 2010).



59. Παραγωγή αερίου με την μέθοδο διοχέτευσης χημικού αναστολέα (Demirbas, 2010).

### 3.5 Οικονομικοί και πολιτικοί παράγοντες.

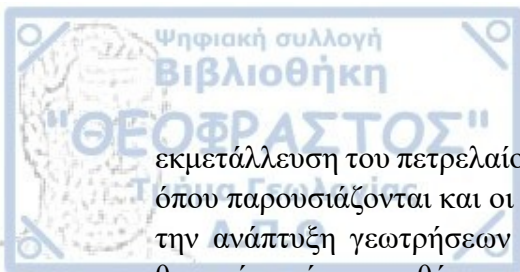
Η οικονομική παραγωγή και ζήτηση του φυσικού αερίου από αποθέματα θαλάσσιων υδριτών θα οδηγήσει σε θαλάσσια συστήματα γεωτρήσεων και μεθόδων. Η διαδικασία της παραγωγής φυσικού αερίου από το μεθάνιο πιθανώς να βοηθήσει οικονομικά και αναπτυξιακά τις περιοχές με χαμηλή σημερινή παραγωγή Φ. αερίου. Οι χαμηλοί ρυθμοί παραγωγής συνεπάγονται φθηνές μεθόδους γεώτρησης ώστε να διασφαλιστεί η οικονομική βιωσιμότητα. Η ανάκτηση του μεθανίου και η μεταφορά του με οικονομικά βιώσιμες πρακτικές, θέτει προκλήσεις στους επιστήμονες και στους μηχανικούς. Οι υδρίτες μεθανίου θα γίνουν οικονομικά εκμεταλλεύσιμοι μόνο όταν η τιμή του πετρελαίου και των συμβατικών αερίων θα αυξηθεί σημαντικά. Η διαφανόμενη αφθονία των συμβατικών κοιτασμάτων των υδρογονανθράκων και οι σχετικά χαμηλή τιμή τους, θέτει σε περιορισμό την έρευνα σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες των υδριτών. Η έρευνα και η αναπτυξιακή δραστηριότητα στον κλάδο θα πρέπει να είναι συνεχής. Η ανάκτηση των υδριτών θα γίνει πιθανώς με διαδικασίες αποσύνθεσής του, η οποίες θα απαιτήσουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Η προμήθεια και η

διαχείριση αυτής της ενέργειας και η διατήρησή μιας τεχνητής θερμοδυναμικής ισορροπίας η οποία επιτρέπει τον έλεγχο της αποσύνθεσης των υδριτών και την ασφαλή ανάκτηση του μεθανίου, θα αποτελέσει το κλειδί για την εμπορευματοποίησή τους. Βάσει των υπολογισμών η αποσυμπίεση φαίνεται να αποτελεί την πιο πολλά υποσχόμενη τεχνική για τους ταμειυτήρες τύπου 1. Ακόμα, η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται και ως η πλέον οικονομικά βιώσιμη τεχνική εκμετάλλευσης. Η μεθανόλη είναι περίπου τρεις φορές πιο οικονομική από τον αιθυλική γλυκόλη, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την απαιτούμενη ποσότητα μεθανόλης που απαιτείται στην βαλβίδα εισόδου του αερίου (Demirbas, 2010).

Τα περισσότερα αποθέματα υδριτών μεθανίου έχουν εντοπιστεί σε περιοχές απροσδόκητα, όταν οι επιστήμονες εξέτασαν εκ νέου τα υπάρχοντα σεισμικά δεδομένα. Η προσπάθεια αυτή για την εύρεση αποθεμάτων δεν απαιτεί αυξημένα έξοδα. Καθώς οι περιοχές όπου ανακαλύπτονται οι υδρίτες αυξάνονται, η γνώση για τις διαφαινόμενες δυνατότητες των ωκεάνιων υδριτών αυξάνονται επίσης, ενώ οι επιστήμονες σταδιακά αντιλαμβάνονται την πιθανότητα για την ύπαρξη μελλοντικών ενεργειακών αποθεμάτων. Η πρόκληση για την έρευνα και την εξόρυξη αλλά και την πιθανή επίδραση αυτής, στο παγκόσμιο κλίμα και γεωλογικό περιβάλλον γίνεται όλο και πιο ξεκάθαρη. Οι πολιτικοί, σταδιακά έχουν ξεκινήσει και αυτοί να καταλαβαίνουν τις μακροπρόθεσμες δυνατότητες των θαλάσσιων υδριτών μεθανίου. Φαίνεται ωστόσο ότι η περιπλοκότητα και οι προκλήσεις στην εκμετάλλευση και την παραγωγή των υδριτών μεθανίου σε εχθρικά και δύσβατα θαλάσσια περιβάλλοντα, αλλά και η απαραίτητη συμμετοχή διαφόρων τομέων της βιομηχανίας, έχει οδηγήσει σε μια οικονομική έλλειψη ενδιαφέροντος. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στην επικρατούσα άποψη, ότι η εκμετάλλευση των υδριτών θα μπορεί να είναι οικονομικά βιώσιμη μόνο όταν οι τιμές των συμβατικών υδρογονανθράκων και ορυκτών καυσίμων θα αυξηθούν σημαντικά (Demirbas, 2010).

Από τη άλλη, πολλά αποθέματα υδριτών βρίσκονται σε ηπειρωτικά περιθώρια, αρκετά κοντά στις κύριες αγορές και στις βιομηχανοποιημένες χώρες. Τα κράτη τα οποία έχουν δυνατή οικονομία ή βρίσκονται σε αξιοσημείωτους βιομηχανικούς ρυθμούς ανάπτυξης αλλά έχουν ελάχιστες ενεργειακές πηγές, θα μπορούσαν πιθανώς να γίνουν ενεργειακά ανεξάρτητες, κάτι το οποίο θα μπορούσε να έχει επίδραση στις διεθνείς σχέσεις, στην εξωτερική πολιτική και σε άλλες αλληλεξαρτώμενες μεταβλητές. Οι πιθανές επιπτώσεις θα μπορούσαν να επεκταθούν στο παγκόσμιο εμπόριο, στις τοπικές ισορροπίες ως προς τη δύναμη μεταξύ των επιμέρους χωρών και στο συνάλλαγμα των χωρών που εμπορεύονται ή εισάγουν το καύσιμο, όταν θα αρχίσει η εκμετάλλευση των υδριτών. Πρόσφατα, η σταδιακή συνειδητοποίηση της ύπαρξης όλων αυτών των παραγόντων έχει ξεκινήσει να πυροδοτεί το ενδιαφέρον ως προς τον τομέα των υδριτών από κάποιες χώρες. Αναμένεται ότι η προοπτική των ενεργειακής ανεξαρτησίας θα λειτουργήσει ως καταλύτης ώστε κάποια κράτη σταδιακά να επενδύσουν στους υδρίτες μεθανίου, ειδικά όταν η τεχνολογία και οι επιστήμονες θα παρέχουν αξιόπιστες, ασφαλείς και οικονομικά βιώσιμες τεχνικές για την έρευνα και εκμετάλλευση των αποθεμάτων (Demirbas, 2010).

Η έλλειψη τεχνολογιών εκμετάλλευσης αποτέλεσε μεγάλη τροχοπέδη για την εκμετάλλευση των υδριτών. Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια έχουμε γίνει μάρτυρες μιας δραματικής βελτίωσης και ανάπτυξης των γεωτρητικών τεχνολογιών για την



εκμετάλλευση του πετρελαίου και του φυσικού αερίου σε βαθιά θαλάσσια κοιτάσματα, όπου παρουσιάζονται και οι συγκεντρώσεις των υδριτών. Επιπρόσθετα, το κόστος για την ανάπτυξη γεωτρήσεων σε βαθιά νερά έχει μειωθεί σημαντικά. Όλοι αυτοί οι θετικοί παράγοντες, θέτουν ευνοϊκά θεμέλια για την έρευνα και την εκμετάλλευση των υδριτών μεθανίου. Πολλές από τις μηχανολογικές τεχνικές που απαιτούνται για την εκμετάλλευση αυτών των κοιτασμάτων, μπορούν να υιοθετηθούν από ήδη υπάρχουσα τεχνολογία που χρησιμοποιείται στην εκμετάλλευση βαθιών κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου (Demirbas, 2010).

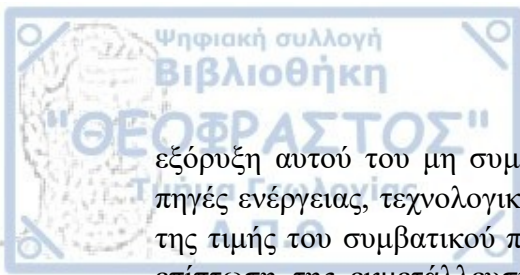
### Συμπεράσματα:

Οι υδρίτες μεθανίου υπολογίζεται ότι υπάρχουν σε πολύ μεγάλες ποσότητες στον φλοιό της Γης, σε όλα τα μήκη και πλάτη. Εντοπίζονται σε συσσωρευτικά πρίσματα, σε ηφαιστεια λάσπης ή δομές διαπυρισμού στα θαλάσσια περιβάλλοντα και στα πέριμαφροστ στα Αρκτικά καλύμματα. Τα ηφαιστεια λάσπης εντοπίζονται σε αφθονία στα συσσωρευτικά τόξα και σε περιβάλλοντα καταβύθισης. Η τεκτονική δραστηριότητα αποτελεί ακόμα έναν παράγοντα για την δημιουργία και την ενεργοποίηση των ηφαιστειών. Τα ρευστά τα οποία προμηθεύουν τα ηφαιστεια λάσπης, προέρχονται από πλήθος πηγών, όπως από το μετεωρικό νερό, το νερό των πόρων και των θερμών πηγών, από ρευστά με ορυκτά και τέλος από αέρια της ζώνης ισορροπίας των υδριτών. Οι υδρίτες προέρχονται από τα ανώτερα στρώματα του μανδύα. Ανάμεσα στις πιο γνωστές και καλά μελετημένες περιοχές ηφαιστειών λάσπης, οι οποίες αποτελούν σταθμό αναφοράς και σύγκρισης, είναι τα ηφαιστεια λάσπης στα νησιά Μπαρμπάντος, στη Μαύρη Θάλασσα και τα ηφαιστεια λάσπης στην Ανατολική Μεσόγειο, τα οποία έχουν τραβήξει το βλέμμα των ερευνητών.

Στο χώρο της Ανατολικής Μεσογείου έχουν γίνει τις τελευταίες δεκαετίες εκτενείς έρευνες με συγχρηματοδότηση της Ε.Ε. Τέτοιες έρευνες έγιναν το 2003 και 2004 στο σύμπλεγμα ηφαιστειών λάσπης Αναζίμανδρος, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με εκτενή πολυδεσμική βαθυμετρία, αναλυτική οπισθοσκέδαση και εκτεταμένη δειγματοληψία πυρήνων ιζημάτων κατά μήκος όλης της περιοχής. Η ανάλυση του θαλάσσιου πυθμένα αποκάλυψε πλήθος δομών νέων ηφαιστειών λάσπης, όπως αυτό της Θεσσαλονίκης και Αθήνας, τα οποία προστέθηκαν στα είδη γνωστά από παλαιότερες έρευνες, δηλαδή τα ηφαιστεια Άμστερνταμ, Κούλα και Καζάν. Ο μεγάλος αριθμός των πυρήνων ιζημάτων που συλλέχτηκε, βοήθησε τους μελετητές να προσδιορίσουν την έκταση της ενεργούς δραστηριότητας και τη συγκέντρωση των υδριτών μεθανίου στο σύμπλεγμα αυτό. Μια χαρακτηριστική περιοχή στα νότια του συμπλέγματος υποδηλώνει παρουσία των υδριτών, οι οποίοι προήλθαν πιθανώς όχι μόνο από τα βαθύτερα στρώματα της κεντρικής περιοχής του συμπλέγματος, αλλά και από τις νότιες πλαγιές του ηφαιστείου Άμστερνταμ. Βάσει της δειγματοληψίας φαίνεται ότι οι υδρίτες εντοπίζονται κατά κύριο λόγο στα κεντρικά και βορειοανατολικά του ηφαιστείου λάσπης Άμστερνταμ. Υδρίτες συλλέχτηκαν και από τα ηφαιστεια Καζάν και Θεσσαλονίκη, ενώ στα ηφαιστεια Κούλα και Αθήνα αυτοί αποσυντέθηκαν κατά την δειγματοληψία. Η παρουσία του μεθανίου στους πυρήνες από το ηφαιστειο λάσπης Θεσσαλονίκη δείχνει μια πρόσφατη δραστηριότητα. Βάσει της δειγματοληψίας και της οπισθοσκέδασης, η έκταση του συμπλέγματος Αναζίμανδρος με περιεκτικότητα σε υδρίτες μεθανίου υπολογίζονται 46 Km<sup>2</sup>. Ο συνολικός όγκος του μεθανίου στα ανώτερα στρώματα του συμπλέγματος Αναζίμανδρος εκτιμάται ότι στο ηφαιστειο Άμστερνταμ είναι 0,064 Km<sup>2</sup> και 2,56-6,40 Km<sup>2</sup> στο ευρύτερο σύμπλεγμα της περιοχής.

Σε ολόκληρο τον πλανήτη εκτιμάται ότι υπάρχει στο σύνολο 20,500 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου που προέρχεται από υδρίτες μεθανίου. Τα αποθέματα της ενέργειας αυτής είναι καλά διανεμημένα στην Γη σε αντίθεση με άλλα ορυκτά καύσιμα, τα οποία εμφανίζονται πιο συγκεντρωμένα. Οι υδρίτες μεθανίου θεωρούνται ως το καύσιμο του μέλλοντος, ενώ η έρευνα και εκμετάλλευσή τους αναμένεται να αρχίσει τις επόμενες δεκαετίες. Θεωρείται ότι εναρκτήριοι παράγοντας για την

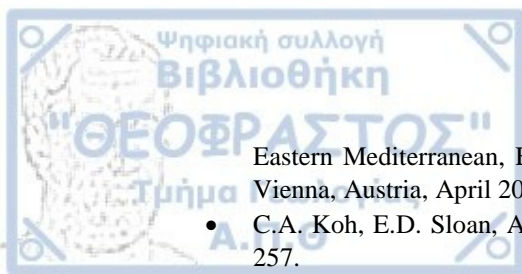




εξόρυξη αυτού του μη συμβατικού καυσίμου, θα είναι η ανάγκη για εναλλακτικές πηγές ενέργειας, τεχνολογικές καινοτομίες στον τομέα των εξορύξεων και η αύξηση της τιμής του συμβατικού πετρελαίου. Τέλος είναι απαραίτητο να συνυπολογιστεί η επίπτωση της εκμετάλλευσης των υδριτών μεθανίου στην ατμόσφαιρα, καθώς το μεθάνιο είναι αέριο του θερμοκηπίου, αλλά και ο ρόλος που έχουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

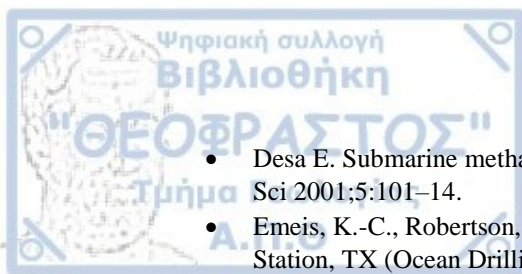


- A. Demirbas, Methane hydrates as potential energy resource: Part 2 – Methane production processes from gas hydrates, *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 1562–1571.
- A. Demirbas, Methane hydrates as potential energy resource: Part 1 – Importance, resource and recovery facilities, *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 1547–1561
- A. J. Kopf, Significance Of Mud Volcanism, *Geophys.*, 40(2), 1005, doi:10.1029/2000RG000093, 2002.
- A. V. Milkov, “Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates,” *Marine Geology*, vol.167, no. 1-2, pp. 29–42, 2000.
- Alastair H.F. Robertson and Achim Kopf, Tectonic setting and processes of mud volcanism on the mediterranean ridge accretionary complex: evidence from LEG 160, 1998, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 160*.
- Alexandri S., 2007. Classification and interpretation of seabed geology from analysis of sonar data. Unpublished PhD thesis, University of Birmingham, UK, 500 p.
- Ali Eslamimanesh, Amir H. Mohammadi, Dominique Richon, Paramespri Naidoo, Deresh Ramjugernath, Application of gas hydrate formation in separation processes: A review of experimental studies, *J. Chem. Thermodynamics* 46 (2012) 62–71
- Allen, H. T., Report of an expedition to the Copper, Tanana and Koyukuk Rivers, in the Territory of Alaska, 1885, U.S. 49th Congr., 2nd sess., 1886–1887, Exec. Doc. 125, 172 pp., U.S. Gov. Print. Off., Washington, D. C., 1887.
- Aloisi GI, Bouloubassi I, Heijs K, Pancost RD, Sinninghe Damste JS, Gottschal JC (2002) Methane-consuming microorganisms and the formation of carbonate crusts at seeps. *Earth and Plan. Sc. Let.* 203:195–203
- Aloisi, G., C. Pierre, J.-M. Rouchy, J.-P. Foucher, J. M. Woodside, and the Medinaut Scientific Party, Methane-related authigenic carbonates of eastern Mediterranean Sea mud volcanoes and their possible relation to gas-hydrate destabilization, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 184, 321–338, 2000a.
- Aloisi, G., et al., Linking Mediterranean brine pools and mudvolcanism, *Eos Trans. AGU*, 81(51), 625–632, 2000b.
- Aloisi, G.I., Bouloubassi, I., Heijs, K., Pancost, R.D., Sinninghe Damste, J.S., Gottschal, J. C., 2002. Methane-consuming microorganisms and the formation of carbonate crusts at seeps. *Earth and Planetary Science Letters* 203, 195–203.
- Ayhan Demirbas, *Methane Gas Hydrate*, Springer London 2010
- Barsoum, K., Della Martera, M., & Menardi Noguera, A. (2000). Gas chimneys in the Nile delta slope and gas fields occurrence. EAGE Conference on Geology and Petroleum Geology, St Julians, Malta.
- Berndt, C., Buřnz, S., Clayton, T., Mienert, J., Saunders, M., 2004. Seismic character of bottom simulating reflectors: examples from the mid-Norwegian margin. *Marine and Petroleum Geology* 21, 723–733.
- Brown, K. M., C. Goldfinger, G. Bohrmann, M. Torres, M. Tryon, C. Jung, E. Suess, H. Sahling, and A. Trehu, Geological and hydrogeologic interrelationships around seep and gas vent regions on Hydrate Ridge: Seabed observations, *Eos Trans. AGU*, 80(46), Fall Meet. Suppl., F510, 1999.
- C. Perissoratis, Chr. Ioakim, S. Alexandri, J. Woodside, P. Nomikou, A. D’ahlmann, D. Casas, K. Heeschen, H. Amman, G. Rousakis, and V. Lykousis, Thessaloniki Mud Volcano, the Shallowest Gas Hydrate-Bearing Mud Volcano in the Anaximander Mountains, Eastern Mediterranean, Volume 2011, Article ID 247983, 11 pages, *Journal of Geological Research*.
- C. Perissoratis, Chr. Ioakim, V. Lykousis et al., “Characteristics of the Thessaloniki Mud Volcano, a recently discovered gas hydrate bearing area in the Anaximander Mountains,” in



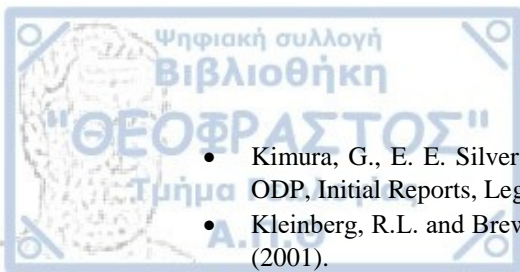
Eastern Mediterranean, EGU General Assembly, vol. 8 of Geophysical Research Abstracts, Vienna, Austria, April 2006, 03874, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-03874.

- C.A. Koh, E.D. Sloan, A.K. Sum, D.T. Wu, *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2 (2011) 237–257.
- Camerlenghi, A., Cita, M.B., Della Vedova, B., Fusi, N., Mirabile, L., and Pellis, G., 1995. Geophysical evidence of mud diapirism on the Mediterranean Ridge accretionary complex. *Mar. Geophys. Res.*, 17:115-141.
- Chapellaz J, Blunier T, Raynaud D, Barnola JM, Schwander J, Stauffer B. Synchronous changes in atmospheric CH<sub>4</sub> and Greenland climate between 40 and 8 kyr ago. *Nature* 1993;366:443-5.
- Charlou, J.L., Donval, J.P., Zitter, T., Roy, N., Jean-Baptiste, P., Foucher, J.P., Woodside, J., MEDINAUT Scientific Party, 2003. Evidence of methane venting and geochemistry of brines on mud volcanoes of the eastern Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research Part I Oceanographic Research Papers* 50, 941–958.
- Chr. Ioakim, St. Tsaila-Monopolis, C. Perissoratis, and V. Lykousis, “The examination of the gas hydrates hosting environment at the Anaximander Mud Volcanoes, Eastern Mediterranean: stratigraphy and Sedimentary successions at the mud beacia clasts,” in *CIESM Workshop Monograph*, vol.29, pp. 87–96, Bologna, Italy, 2005.
- Cita M.B., Delange G.J., & Olausson E. (1991). Anoxic basins and sapropel deposition in the Eastern Mediterranean-past and present-Introduction, *Marine Geology*, 100, 1-4.
- Cita, M.B., Camerlenghi, A., Erba, E., McCoy, F.W., Castradori, D., Cazzani, A., Guasti, G., Giambastiani, M., Lucchi, R., Nolli, V., Pezzi, G., Redaelli, M., Rizzi, E., Torricelli, S., and Violanti, D., 1989. Discovery of mud diapirism in the Mediterranean Ridge: a preliminary report. *Boll.Soc. Geol. Ital.*, 108:537-543.
- Cita, M.B., Erba, E., Lucchi, R., Pott, M., van der Meer, R., and Nieto, L., 1996. Stratigraphy and sedimentation in the Mediterranean Ridge diapiric belt. *Mar. Geol.*, 132:131-150.
- Cita, M.B., Ryan, W.B.F., and Paggi, L., 1981. Prometheus mud-breccia: an example of shale diapirism in the Western Mediterranean Ridge. *Ann.Geol. Pays Hellen.*, 30:543-570.
- Cita, M.B., Ryan, W.B.F., Paggi, L., 1981. Prometheus mud breccia: an example of shale diapirism in the western Mediterranean ridge. *Annal Ge' ologie des Pays Helle' niques* 3, 543–570
- Clennell, M. B., *The me'langes of Sabah, Malaysia*, Ph.D thesis, 483 pp., Univ. of London, London, UK, 1992
- Coleman, D. F., & Ballard, R. D. (2001). A highly concentrated region of cold hydrocarbon seeps in the southeastern Mediterranean sea. *Geo-Marine Letters*, 21, 162–167.
- Cooper, C., *Mud volcanoes of Azerbaijan visualized using 3D seismic depth cubes: The importance of overpressured fluid and gas instead of non-existent diapirs*, paper presented at Conference on Subsurface Sediment Mobilization, Eur. Assoc. of Geosci. and Eng., Gent, Belgium, 2001.
- D. A. Vamvakaris, C. B. Papazachos, Ch. A. Papaioannou, E. M. Scordilis, and G. F. Karakaisis, A detailed seismic zonation model for shallow earthquakes in the broader Aegean area, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 55–84, 2016
- Da'hlmann, A., ANAXIMANDER Team, 2005. Gas hydrates in the Eastern Mediterranean: occurrence and biogeochemical environment compiled from detailed sampling of the Anaximander Mountains. *Geophysical Research Abstracts* 7,05176.
- Dadey, K.A. and A. Klays. – 1992. Physical properties of volcanoclastic sediments in the Izu-Bonin area. In: B. Taylor, K.Fujioka, et al. (eds.), *Proc. ODP, Sci. Res.*, 126, pp. 543-550 College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- DAVID CASAS, GEMMA ERCILLA, VASILIS LYKOUSIS, CHRYSANTHI IOAKIM and CONSTANTINE PERISSORATIS, Physical properties and their relationship to sedimentary processes and texture in sediments from mud volcanoes in the Anaximander Mountains (Eastern Mediterranean), *SCI. MAR.*, 70(4), December 2006, 643-659. ISSN: 0214-8358.
- De Lange, G., and H.-J. Brumsack, Pore water indications for the occurrence of gas hydrates in eastern Mediterranean mud dome structures, in *Proceedings ODP, Scientific Results, Leg 160*, pp. 569–574, Ocean Drill. Program, College Station, Tex., 1998.

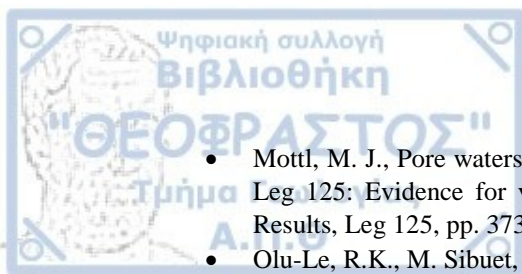


- Desa E. Submarine methane hydrates potential fuel resource of the 21<sup>st</sup> century. Proc AP Akad Sci 2001;5:101–14.
- Emeis, K.-C., Robertson, A.H.F., Richter, C., et al., 1996. Proc. ODP, Init.Repts., 160: College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Everett, D.H., The thermodynamics of frost damage to porous solids, Trans. Faraday Soc., 57, 1541-1551, 1961
- Fusi, N., and Kenyon, N., 1996. Distribution of mud diapirism and other geological structures from long-range sidescan sonar (GLORIA) data, in the Eastern Mediterranean Sea. Mar. Geol., 132:21-38.
- G.D. Ginsburg, V.A. Soloviev, Methane migration within the submarine gas-hydrate stability zone under deep-water conditions, Marine Geology 137(1997) 49-57.
- Galeos, A., 1986. Geological Map “Castellorizo Sheet”, Scale 1/50.000. IGME.
- Gardner, J. M., Mud volcanos on the Moroccan Continental Margin, Eos Trans. AGU, 80(46), Fall Meet. Suppl., F483,1999.
- Grantz, A., D. E. White, H. C. Whitehead, and A. R. Tagg, Saline springs, Copper River lowland, Alaska, AAPG Bull.,46, 1990–2002, 1962.
- Graue, K. (2000). Mud volcanoes in deepwater Nigeria. Marine and Petroleum Geology, 17, 959–974.
- Grauls D. Gas hydrates: importance and applications in petroleum exploration. Mar Petr Geol 2001;18:519–23.
- Gupta AK. Marine gas hydrates: their economic and environmental importance. Current Sci 2004;86:1198–9.
- Gutnic, M., Monod, O., Poisson, A., Dumont, J.-F., 1979. Ge' ologie des Taurides occidentales(Turquie). Me'moires de la Socie' te' Ge' ologique de France LVIII (137),112. Paris.
- H. Amann, J. Baraza, C. Marx et al., “HYACE, an Autoclave coring equipment for systematic offshore sampling, measurement and ground truthing,” in Eurocean, pp. 670–673, 2000.
- H. Bolli and J. Saunders, “Oligocene to Holocene low latitude planctonic foraminifera,” in Planctonic Stratigraphy, H. Bolli, J. Saunders, and G. Perch-Nielsen, Eds., pp. 155–263, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1985.
- Hamilton, E.L. – 1970. Sound velocity and related properties of marine sediments. J. Geophys. Res., 75: 4423-4446.
- Hedberg, H., Relation of methane generation to undercompacted shales, shale diapirs and mud volcanoes, AAPG Bull., 58, 661–673, 1974.
- Hieke, W., Cita, M.B., Mirabile, G.L., Negri, A., and Werner, F., 1996a. The summit area (Antaeus/Pan di Zuccherò) of the Mediterranean Ridge: a mud diapir field? Mar. Geol., 132:113-129.
- Hovland, M., & Judd, A. G. (1988). Seabed pockmarks and seepages: Impact on geology, biology and the marine environment. London:Graham and Trotman, 293 p.
- Humphrey, W. E., Sedimentary volcanism in eastern Mexico and northern Colombia, Geol. Soc. Am. Bull., 74, 125–128,1963.
- J. Javanmardi, Kh. Nasrifar, S.H. Najibi, M. Moshfeghian, Appl. Therm. Eng. 25(2005) 1708–1723.
- J.S. Booth, M.M. Rowe, K.M. Fischer, US Geological Survey, Open-File Report 1,1996, pp. 96–272.
- Johnson, G.R. and G.R. Olhoeft. – 1984. Density of rocks and minerals. In: R.S. Carmichael (ed.), CRC Handbook of Physical Properties of Rocks (Vol. 3): Boca Raton, FL (CRC Press, Ins.),1-38.
- K. A. Kvenvolden, “Gas hydrates-geological perspective and global change,” Reviews of Geophysics, vol. 31, no. 2, pp. 173–187, 1993.
- K. Heeschen, A. Dahlmann, H.-J. Hohnberg et al., “Pressurized near-surface sediment cores of Anaximander mud volcanoes,” in Eastern Mediterranean, EGU General Assembly, vol. 8 of Geophysical Research Abstracts, Vienna, Austria, April 2006, 07005. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-07005.



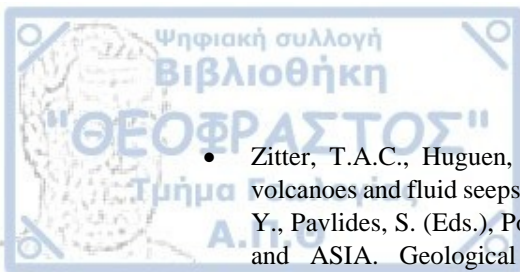


- Kimura, G., E. E. Silver, P. Blum, and Shipboard Scientific Party, Leg 170, in Proceedings ODP, Initial Reports, Leg 170, 458 pp., Ocean Drill. Program, College Station, Tex., 1997.
- Kleinberg, R.L. and Brewer, P., "Probing Gas Hydrate Deposits," American Scientist, 89, 244 (2001).
- Kopf, A. (2002). Significance of mud volcanism. Reviews of Geophysics, 40(2), 1–52.
- Kopf, A., A. H. F. Robertson, M. B. Clennell, and R. Flecker, Mechanism of mud extrusion on the Mediterranean Ridge, Geo Mar. Lett., 18, 97–114, 1998.
- Kopf, A., D. Klaeschen, and J. Mascle, Extreme efficiency of mud volcanism in dewatering accretionary prisms, Earth Planet. Sci. Lett., 189, 295–313, 2001.
- Kvenvolden A. Gas hydrates as a potential energy resource – a review of their methane content. In: Howell DG, editor. The future of energy gases – US geological survey professional paper 1570. Washington: United States Government Printing Office; 1993. p. 555–61.
- Kvenvolden, K.A., Ginsburg, G.D. and Soloviev, V.A., 1993. Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates. GeoMar. Lett., 13: 32–40
- Li G, Li X-S, Tang L-G, Zhang Y. Experimental investigation of production behavior of methane hydrate under ethylene glycol injection in unconsolidated sediment. Energy Fuels 2007;21:3388–93.
- Lies Loncke, Jean Mascle, Fanil Scientific Parties, Mud volcanoes, gas chimneys, pockmarks and mounds in the Nile deep-sea fan (Eastern Mediterranean): geophysical evidences, Marine and Petroleum Geology, 2003.
- Limonov, A.F., Woodside, J.M., and Ivanov, M.K. (Eds.), 1994. Mud Volcanism in the Mediterranean and Black Seas and Shallow Structure of the Eratosthenes Seamount. Initial Results of the Geological and Geophysical Investigations during the Third "Training-through-Research" Cruise of the R/V Gelendzhik (June-July 1993). UNESCO Rep. Mar. Sci., 64.
- Limonov, A.F., Woodside, J.M., Cita, M.B., and Ivanov, M.K., 1996. The Mediterranean Ridge and related mud diapirism: a background. Mar.Geol., 132:7-19.
- Loncke, L., 2002. Le delta profond du Nil: Structure et évolution depuis le Messinien. Thèse de doctorat de l'Université P. et M. Curie (Paris 6), Géosciences Azur, 181 pp.
- Lykousis, V., et al., Mud volcanoes and gas hydrates in the Anaximander mountains (Eastern Mediterranean Sea), Marine and Petroleum Geology (2008).
- Lykousis, V., Woodside, J., de Lange, G., Alexandri, S., Sakellariou, D., Nomikou, P., Ioakim, C., Dahlmann, A., Casas, D., Rousakis, G., Ballas, D., Kormas, K., Kioroglou, S., Perissoratis C., 2003. Mud Volcanoes and Related Gas Hydrates in Anaximander Mountains (Eastern Mediterranean). New Discoveries From the 1st of May 2003 Cruise of R/V AEGAEON (ANAXIMANDER PROJECT). OMARC Conference, Paris 15–17/09, 2003.
- M. Ben Clennell, Martin Hovland, James S. Booth, Pierre Henry, and William J. Winters, Formation of natural gas hydrates in marine sediments 1. Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 104, NO. B10, PAGES 22,985-23,003, OCT 10, 1999
- MacDonald, G. J., "The Many Origins of Natural Gas," J. Petroleum Geology, 5(4), 341 (1983).
- MacKay, M. E., G. F. Moore, G. R. Cochrane, J. C. Moore, and L. D. Kulm, Landward vergence and oblique structural trends in the Oregon margin accretionary prism: Implications and effect on fluid flow, Earth Planet. Sci. Lett., 109, 477–491, 1992.
- Magalhaes VH, Bobos J, Gaspar L, Pinheiro LM, Monteiro JH, Ivanov MK (2002) Mineralogy and geochemistry of carbonate chimneys from the Gulf of Cadiz: Preliminary results. IOC Workshop Report no 183, pp18
- Martin, B.M., Kastner, M., Henry, P., Le Pichon, X., and Lallement, S., 1996. Chemical and isotopic evidence for sources of fluids in a mud volcano field seaward of the Barbados accretionary wedge. J. Geophys. Res., 101:20325-20345.
- Matsumoto R. Causes of the δ13C anomalies of carbonates and a new paradigm 'gas hydrate hypothesis'. J Geol Soc Jpn 1995;101:902–24.
- Max MD, Cruickshank MJ. Extraction of methane from oceanic hydrate system deposits. In: Proceedings offshore technology conference. Houston (Texas), 3–6 May 1999.
- Milkov, A. V. (2000). Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. Marine Geology, 167, 29–42.



- Mottl, M. J., Pore waters from serpentinite seamounts in the Mariana and Izu-Bonin forearcs, Leg 125: Evidence for volatiles from the subducting slab, in Proceedings ODP, Scientific Results, Leg 125, pp. 373–386, Ocean Drill. Program, College Station, Tex., 1992.
- Olu-Le, R.K., M. Sibuet, A. Fiala-Medioni, S. Gofas, C. Salas, J.P Foucher and J. Woodside. – 2004. Cold seep communities in the deep eastern Mediterranean Sea: composition and spatial distribution on mud volcanoes Deep-Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Papers, 51: 1915-1936.
- P. Englezos, Ind. Eng. Chem. Res. 32 (1993) 1251–1274.
- Paull CK, Ussler III W, Dillon WP. Is the extent of glaciation limited by marine gas hydrates? Geophys Res Lett 1991;18:432–4.
- Perissoratis, C., Amann, H., Meyn, V., De Lange, G., Kalogerakis, N., Lykoussis, V., Wooside, J., Ercilla, G., 2003. Exploring the extreme environment of the gas hydrates and the associated biosphere in the Eastern Mediterranean: the ANAXIMANDER Project. OMARC Conference, Paris, September 15–17, 2003, Conference Abstracts, 89 pp.
- Perissoratis, C., Papadopoulos, G., Zimaniths, E., 1998. Occurrence of mud diapirism in the marine sector between Kos and Kalymnos islands, SE Aegean Sea: preliminary results. Bulletin Geological Society of Greece V.XXXII (2), 217–222
- Peter Englezos, and Ju Dong Lee, Gas Hydrates: A Cleaner Source of Energy and Opportunity for Innovative Technologies, Korean J. Chem. Eng., 22(5), 671-681 (2005).
- Poisson, A., 1977. Recherches géologiques dans les Taurides occidentales (Turquie). Thèse, Université Paris 11, Paris.
- Reilinger, R., McClusky, S., Paradissis, D., Ergintav, S., and Vernant, P.: Geodetic constraints on the tectonic evolution of the Aegean region and strain accumulation along the Hellenic subduction zone, Tectonophysics, 488, 22–30, 2010.
- Robertson, A.H.F., 1998. Tectonic significance of the Eratosthenes Seamount: a continental fragment in the process of collision with subduction zone in the eastern Mediterranean (Ocean Drilling Program Leg 160), Tectonophysics, 298, 63–82.
- Robertson, A.H.F., Dixon, J.E., 1984. Introduction: aspects of the geological evolution of the Eastern Mediterranean. In: Dixon, J.E., Robertson, A.H.F. (Eds.), The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean. Special Publication-Geological Society of London, vol. 17, pp. 1–74.
- Ryan, W.B.F., Kastens, K.A., and Cita, M.B., 1982. Geological evidence concerning compressional tectonics in the Eastern Mediterranean. Tectonophysics, 86:213-242
- Salas C, Woodside JM (2002) *Lucinoma kazani* n. sp. (Mollusca: Bivalvia): evidence of a living benthic community associated with a cold seep in Eastern Mediterranean Sea. Deep-Sea Res I 49:991–1005.
- Salas, C., Woodside, J.M., 2002. *Lucinoma kazani* n. sp. (Mollusca: Bivalvia): evidence of a living benthic community associated with a cold seep in Eastern Mediterranean Sea. Marine Geology 49, 991–1005.
- Sreaton, E.J., Carson, B., and Lennon, G.P., 1995. In situ permeability tests at Site 892: characteristics of a hydrogeologically active fault zone on the Oregon accretionary prism. In Carson, B., Westbrook, G.K., Musgrave, R.J., and Suess, E. (Eds.), Proc. ODP, Sci. Results, 146 (Pt 1): College Station, TX (Ocean Drilling Program), 291-297.
- Seely, D. R., The significance of landward vergence and oblique structural trends on trench inner slopes, in Island Arcs, Deep Sea Trenches, and Back-Arc Basins, Maurice Ewing Ser., vol. 1, edited by M. Talwani and W. D. Pitman III, pp. 187–198, AGU, Washington, D. C., 1977.
- Shimon Wdowinski, Zvi Ben-Avraham, Ronald Arvidsson and Goran Ekstrom, Seismotectonics of the Cyprian Arc, Geophys. J. Int. (2006) 164, 176–181.
- Shipley, T.H., Ogawa, Y., Blum, P., et al., 1995. Proc. ODP, Init. Repts., 156: College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Slack, J. F., R. J. W. Turner, and P. L. G. Ware, Boron-rich mud volcanoes of the Black Sea region: Modern analogues to ancient sea-floor tourmalinites associated with Sullivant type Pb-Zn deposits?, Geology, 26, 439–442, 1998.

- T. Feseker, A. D'ahlmann, J. P. Foucher, and F. Harmegnies, "In-situ sediment temperature measurements and geochemical porewater data suggest highly dynamic fluid flow at Isis mud volcano, eastern Mediterranean Sea," *Marine Geology*, vol. 261, no. 1–4, pp. 128–137, 2009.
- Ten Veen, J., Woodside, J., Zitter, T., Dumon, T.J., Mascle, J., Volkonskaia, A., 2004. Neotectonic evolution of the Anaximander Mountains at the junction of the Hellenic and Cyprus arcs. *Tectonophysics* 391, 35–65.
- Toto, E. A., and J. N. Kellogg, Structure of the Sinu-San Jacinto fold belt — An active accretionary prism in northern Colombia, *J. S. Am. Earth Sci.*, 5, 221–222, 1992.
- Trehu, A. M., M. E. Torres, G. F. Moore, E. Suess, and G. Bohrmann, Temporal and spatial evolution of a gas hydrate accretionary ridge on the Oregon continental margin, *Geology*, 27, 939–942, 1999.
- V. Lykousis, S. Alexandri, J. Woodside et al., "Mud volcanoes and gas hydrates in the Anaximander mountains (Eastern Mediterranean Sea)," *Marine and Petroleum Geology*, vol. 26, no. 6, pp. 854–872, 2009.
- V. Lykousis, S. Alexandri, J. Woodside, P. Nomikou, C. Perissoratis, D. Sakellariou G. de Lange, A. Dahlmann, D. Casas, G. Rousakis, D. Ballas, Chr. Ioakim, New evidence of extensive active mud volcanism in the Anaximander mountains (Eastern Mediterranean): The "ATHINA" mud volcano, *Environmental Geology* (2004) 46:1030–1037.
- Vernet, G., A. Mauffret, C. Bobier, L. Briceno, and J. Gayet, Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin, *Tectonophysics*, 202, 335–349, 1992.
- von Huene, R., D. Klaeschen, M. A. Gutscher, and J. Fruehn, Mass and fluid flux during accretion at the Alaskan margin, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 110, 468–482, 1998.
- Vougioukalakis G. E. et al, (2004). A distal deep sea ash layer (Y2) from the Cape Riva eruption (Santorini volcanic field) at the East Mediterranean submarine Anaximander Mountains, 5<sup>th</sup> International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Thessaloniki April 2004
- W. Friederich, A. Brüstle, L. Küperkoch, T. Meier, S. Lamara, and Egelados Working Group, Focal mechanisms in the southern Aegean from temporary seismic networks – implications for the regional stress field and ongoing deformation processes, *Solid Earth*, 5, 275–297, 2014
- Wallmann, K., P. Linke, E. Suess, G. Bohrmann, H. Sahling, M. Schlüter, A. Dahlmann, S. Lammers, J. Greinert, and N. von Mirbach, Quantifying fluid flow, solute mixing, and biogeochemical turnover at cold vents of the eastern Aleutian subduction zone, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 5209–5219, 1997. Waples, D. W., Time and
- Woodside J., 1996. Neotectonic Deformation of the Anaximander Mountains Observed from EM12D Multibeam Data. In: *Sedimentary Basins of the Mediterranean and Black Seas*, TTR, Fourth Post-cruise Meeting, UNESCO Report, pp.11–12.
- Woodside, J., Mascle, J., Huguen, C., Volkonskaia, A., 2000. The Rhodes Basin, a post Miocene tectonic trough. *Marine Geology* 165 (1–4), 177–194.
- Woodside, J.M., Ivanov, M.K., Limonov, A.F., 1997. Neotectonics and fluid flow through the seafloor sediments in the Eastern Mediterranean and Black Seas. Part I: eastern Mediterranean Sea. In: *IOC Technical Series*, vol. 48, pp. 1–128.
- Woodside, J.M., Ivanov, M.K., Limonov, A.F., 1998. Shipboard Scientists of the Anaxiprobe Expeditions. Shallow gas and gas hydrates in the Anaximander Mountains region Eastern Mediterranean Sea. In: *Henriet, J.P., Mienert, J. (Eds.), Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change*. Geological Society of London, Special Publication, vol. 137, pp. 177–193.
- Woodside, J.M., Volgin, A.V., 1996. Echo-free patches obtained on MAK-1M deep-towed sidescan sonar and their interpretation (Mediterranean Ridge). *Marine Geology* 132 (1/4), 55–61.
- Yassir, N.A., and Bell, J.S., 1994. Relationships between pore pressures, stresses and present-day geodynamics in the Scotian Shelf, Offshore Eastern Canada. *AAPG Bull.*, 78:1863–1880.
- Z. Garfunkel, 2004, Origin of the Eastern Mediterranean basin: a reevaluation, Institute of Earth Sciences, Hebrew University of Jerusalem, Givat Ram, Jerusalem 91904, Israel
- Zitter, T., Woodside, J., Mascle, J., 2003. The Anaximander Mountains: a clue to the tectonics of Southwest Anatolia. *Geological Journal* 38, 357–394.



- Zitter, T.A.C., Huguen, C., ten Veen, J., Woodside, J.M., 2006. Tectonic control on mud volcanoes and fluid seeps in the Anaximander Mountains, eastern Mediterranean Sea. In: Dilek, Y., Pavlides, S. (Eds.), Postcollisional Tectonics and Magmatism in the Mediterranean Region and ASIA. Geological Society of America Special Paper, vol. 409, pp. 615–631, doi:10.1130/2006.2409(28).
- Zitter, T.A.C., Huguen, C., Woodside, J.M., 2005. Geology of mud volcanoes in the Eastern Mediterranean from combined sidescan and submersible surveys. Deep-Sea Research Part I Oceanographic Research Papers 52 (3), 457–475.

#### Sites:

- [https://web.archive.org/web/20051119034605/http://aapg.confex.com/aapg/sl2003/techprogram/paper\\_77807.htm](https://web.archive.org/web/20051119034605/http://aapg.confex.com/aapg/sl2003/techprogram/paper_77807.htm)
- <https://worldoceanreview.com/en/wor-1/energy/methane-hydrates/>
- <https://www.district-energy.gr/energy/energy-sources/fossil-fuels/methane-hydrates/methane-hydrates/>
- <https://www.nrdc.org/stories/permafrost-everything-you-need-know#sec-what-is>