ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΦΥΣΙΚΗΣ ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΑΣ

**ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ, ΙΖΗΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ – ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΚΗ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΡΑΤΗΡΩΝ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΕ
ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΕΝΕΡΓΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ
ΓΕΩΛΟΓΟΣ – ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΟΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΠΑΤΡΑ 2010

Στους γονείς μου
Παναγιώτη και Χρύσα

**ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ, ΙΖΗΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ – ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΚΗ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΡΑΤΗΡΩΝ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΕ
ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΕΝΕΡΓΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συμβουλευτική Επιτροπή:

Αναπληρωτής Καθηγητής Γ. Παπαθεοδώρου (Επιβλέπων), Τμήμα Γεωλογίας,
Πανεπιστήμιο Πατρών

Καθηγητής Γ.Φερεντίνος, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

Καθηγητής Ν. Κοντόπουλος, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

Μέλη της εξεταστικής επιτροπής:

Καθηγητής Α. Ζελιλίδης, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

Διευθυντής Ερευνών Δρ. Β. Λυκούσης, Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών

Διευθυντής Ερευνών Δρ. Δ. Σακελλαρίου, Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών

Λέκτορας Μ. Γεραγά, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

Η έγκριση της παρούσας διατριβής από την εξεταστική επιτροπή και το τμήμα δεν προϋποθέτει και την αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.

(Νόμος 5343/1932, άρθρο 202)

Πρόλογος

Η εκπόνηση της παρούσας διατριβής, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Θαλάσσιας Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Πανεπιστημίου Πατρών, υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή, κ. Γιώργου Παπαθεοδώρου.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί ένα μέρος του ταξιδιού που ξεκίνησε πριν από 12 χρόνια στο Ιόνιο Πέλαγος, ως δευτεροετής φοιτητής τότε, όταν για πρώτη φορά βρέθηκα σε μία ωκεανογραφική αποστολή εκπληρώνοντας ένα παιδικό μου όνειρο. Η ολοκλήρωση της, μετά από μία διαδρομή που διήρκεσε οχτώ χρόνια είναι η ολοκλήρωση αυτού του ταξιδιού και ελπίζω να αποτελέσει την αφετηρία για μελλοντικά ταξίδια.

Θα ήθελα να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στον άνθρωπο που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με τη θαλάσσια γεωλογική έρευνα και μου εμφύσησε την αγάπη προς την έρευνα, αναπληρωτή καθηγητή Γιώργο Παπαθεοδώρου. Η συμβολή του στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής, ήταν πολύτιμη τόσο σε επιστημονικό επίπεδο αλλά και σε ανθρώπινο με την υπομονή, που επέδειξε καθ'όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας, την εποικοδομητική κριτική, τις πολύτιμες συμβουλές του, την αμέριστη ηθική συμπαράστασή που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια και τις ατελείωτες ώρες που διέθεσε για το παρών ερευνητικό έργο. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Γιώργο Φερεντίνου πρώτα από όλα για την πολύ εποικοδομητική συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια αλλά επίσης δεν μπορώ να λησμονήσω ότι η παρούσα διατριβή ξεκίνησε υπό τις οδηγίες του ως επιβλέπων καθηγητή.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Νικόλαο Κοντόπουλο, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής καθώς και τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής κ.κ. καθηγητή Αβραάμ Ζελιλήδη, Βασίλειο Λυκούση Διευθυντή ερευνών, Δημήτρη Σακελλαρίου Διευθυντή Ερευνών και την Λέκτορα Μαρία Γεραγά για την τιμή που μου έκαναν, για το χρόνο που μου διέθεσαν, καθώς και για τις ιδιαίτερες χρήσιμες παρατηρήσεις τους. Την Λέκτορα Μαρία Γεραγά θα ήθελα να την ευχαριστήσω ιδιαίτερος για την συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια τόσο στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αλλά και σε άλλες ερευνητικές εργασίες.

Ευχαριστίες εκφράζονται επίσης προς το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών για την οικονομική στήριξη μέσω υποτροφίας. Επίσης απαραίτητη υπήρξε η συνεισφορά της Ευρωπαϊκής Ένωσης (πρόγραμμα ASSEM - Contract EVK3-CT2001-00051) και του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου (ΕΚΤ), Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευση και Αρχική Επαγγελματική Κατάρτιση (ΕΠΕΑΕΚ II), και ειδικότερα το Πρόγραμμα ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II του Υπουργείου Παιδείας για τη χρηματοδότηση μέρους των ερευνητικών εργασιών της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες στον Dr Giuseppe Etiofe για την πολύ σημαντική συνεισφορά του στη συλλογή και επεξεργασία μέρους των γεωχημικών δεδομένων της παρούσας διατριβής αλλά και την επικοδομητική συνεργασία που είχαμε σε θέματα διαφυγών αερίων, καθώς επίσης και στην Giinditta Marinaro για την πολύτιμη συνεργασία στη συλλογή των δεδομένων του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους που υπήρξαν ή είναι μέλη του Εργαστηρίου Θαλάσσιας Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας για την γόνιμη και ευχάριστη συνεργασία που είχαμε και τους ισχυρούς φιλικούς δεσμούς που αναπτύχθηκαν μεταξύ μας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μαργαρίτα Ιατρού και τον Ηλία Φακίρη για την πολύτιμη βοήθειά τους στη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, την Δρ Αθηνά Χάλαρη, τον Δρ Αριστοφάνη Στεφάτο και τους Παναγιώτη Τσαπραλή, Χριστίνα Ταβλά και Μιχάλη Πρεβενιό για τη βοήθεια τους στη συλλογή μέρους των δεδομένων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Γιάννη Ραβασόπουλο για τη βοήθεια του στη συλλογή μέρους των δεδομένων αλλά κυρίως για την φιλία του και την ηθική υποστήριξη που απλόχερα μου έδωσε όλα αυτά τα χρόνια.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τη σύντροφο μου Όλγα η οποία με ανέχτηκε και με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου Παναγιώτη και Χρύσα για την ηθική και οικονομική τους στήριξη αλλά και για τη συμπαράσταση τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 1 -
2 ΔΙΑΦΥΓΕΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΥΘΜΕΝΑ	- 11 -
2.1 ΦΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ	- 11 -
2.1.1 <i>Αέριοι Υδρογονάνθρακες</i>	- 12 -
2.1.1.1 Βιογενείς υδρογονάνθρακες	- 12 -
2.1.1.2 Αβιογενείς υδρογονάνθρακες	- 19 -
2.1.1.3 Διαχωρισμός Προέλευσης Αέριων Υδρογονανθράκων	- 19 -
2.1.2 <i>Διαφυγές Νερού</i>	- 21 -
2.1.2.1 Εκφόρτιση υπόγειου νερού	- 22 -
2.1.2.2 Διαφυγή νερού των πόρων	- 22 -
2.2 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ	- 23 -
2.2.1 <i>Άμεσες μέθοδοι εντοπισμού</i>	- 23 -
2.2.1.1 Τηλεπισκοπικές μέθοδοι	- 23 -
2.2.1.2 Γεωχημική Διασκόπηση	- 27 -
2.2.2 <i>Έμμεσες μέθοδοι εντοπισμού</i>	- 28 -
2.2.2.1 Μορφολογικά χαρακτηριστικά στην επιφάνεια του πυθμένα που σχετίζονται με διαφυγές ρευστών. -	28 -
2.2.2.2 Άλλες έμμεσες ενδείξεις	- 34 -
2.2.2.3 Διαφυγές ρευστών στην υδάτινη στήλη (fluid seepage)	- 34 -
2.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ	- 38 -
2.3.1 <i>Σεισμική δραστηριότητα</i>	- 38 -
2.3.2 <i>Κύματα και Παλίρροιες</i>	- 39 -
2.3.3 <i>Μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης</i>	- 40 -
2.3.4 <i>Φόρτιση και αποφόρτιση ιζημάτων</i>	- 40 -
2.3.5 <i>Ανθρωπογενείς επιδράσεις</i>	- 41 -
2.4 Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ. -	42
2.4.1 <i>Μεθάνιο προς την ατμόσφαιρα</i>	- 42 -
2.4.2 <i>Παγκόσμια κλιματική αλλαγή</i>	- 43 -
2.4.3 <i>Διαφυγές μεθανίου και κύκλος του άνθρακα</i>	- 44 -
2.5 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ	- 45 -
3 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	- 47 -
3.1 ΠΑΤΡΑΙΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ	- 48 -
3.1.1 <i>Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά</i>	- 48 -
3.1.2 <i>Ωκεανογραφικά χαρακτηριστικά</i>	- 48 -
3.1.3 <i>Γεωλογία</i>	- 49 -
3.1.3.1 Τεκτονικά και ιζηματολογικά χαρακτηριστικά	- 49 -
3.1.3.2 Πλειο – Πλειστοκαινική και Ολοκαινική εξέλιξη	- 52 -
3.2 ΔΥΤΙΚΟΣ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ – ΟΡΜΟΣ ΕΛΑΙΩΝΑ	- 52 -
3.2.1 <i>Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά</i>	- 52 -
3.2.2 <i>Γεωλογικά χαρακτηριστικά Δυτικού Κορινθιακού κόλπου</i>	- 53 -
3.2.2.1 Νότιο Περιθώριο Δυτικού Κορινθιακού κόλπου	- 55 -
3.2.3 <i>Υδρογεωλογικό καθεστώς της παράκτιας ζώνης του Όρμου του Ελαιώνα</i>	- 57 -
3.3 ΚΟΛΠΟΣ ΚΑΤΑΚΟΛΟΥ	- 60 -
3.3.1 <i>Γεωλογικά χαρακτηριστικά</i>	- 60 -
3.3.2 <i>Διαφυγές ρευστών στο θαλάσσιο και στο χερσαίο περιβάλλον του Κατακόλου</i>	- 62 -
4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	- 65 -

4.1 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ	- 66 -
4.1.1 Γεωφυσική Διασκόπηση.....	- 66 -
4.1.1.1 Τομογράφοι υποδομής πυθμένα	- 66 -
4.1.1.2 Ηχοβολιστής Πλευρικής Σάρωσης	- 71 -
4.1.1.3 Βυθόμετρο	- 75 -
4.1.2 Γεωχημική Διασκόπηση.....	- 75 -
4.1.2.1 Επί τόπου μετρήσεις αερίων	- 77 -
4.1.3 Οπτική παρακολούθηση.....	- 82 -
4.2 ΥΠΟΒΡΥΧΙΟ ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΡΙΟ ΜΑΚΡΑΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ GMM	- 82 -
4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	- 84 -
4.3.1 Δεδομένα γεωφυσικής διασκόπησης.....	- 84 -
4.3.1.1 Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα	- 84 -
4.3.1.2 Ηχοβολιστής Πλευρικής Σάρωσης	- 85 -
4.3.2 Βάση Δεδομένων	- 86 -
4.4 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	- 86 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι. ΧΡΟΝΙΚΟ ΤΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ.....	- 89 -
5 ΠΑΤΡΑΪΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ.....	- 109 -
5.1 ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΚΡΑΤΗΡΩΝ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΟΥ ΠΑΤΡΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ	- 109 -
5.1.1 Μορφολογικά χαρακτηριστικά	- 113 -
5.1.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά.....	- 120 -
5.1.2.1 Σεισμοστρωματογραφία	- 120 -
5.1.2.2 Ενδείξεις παρουσίας αερίων στις σεισμικές τομογραφίες	- 121 -
5.1.2.3 Κρατήρες διαφυγής ρευστών στις σεισμικές τομογραφίες	- 123 -
5.1.2.4 Ρήγματα	- 127 -
5.2 Η ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	- 132 -
5.2.1 Ερευνητική περίοδος 1993: ενεργοποίηση λόγω του σεισμού 5.4R της 14/7/1993	- 132 -
5.2.2 Ερευνητική περίοδος 2002-2003: Επιτόπιες μετρήσεις διαλυμένου CH ₄	- 135 -
5.2.3 Ερευνητική περίοδος 2004: Υποθαλάσσιο Παρατηρητήριο μακράς διάρκειας	- 141 -
5.2.3.1 Φυσικές παράμετροι	- 143 -
5.2.3.2 Διαλυμένο μεθάνιο και υδρόθειο	- 149 -
5.2.3.3 Συσχέτιση με σεισμολογικά δεδομένα.....	- 157 -
5.2.4 Ερευνητική περίοδος 2008-2009: Ηχοβολιστική παρακολούθηση λόγω της ενεργοποίησης από το σεισμό 6.4R της 8ης/6/2008.....	- 158 -
5.3 ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	- 166 -
5.4 ΙΖΗΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	- 167 -
5.5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΡΑΤΗΡΩΝ	- 170 -
5.5.1 Προέλευση των ρευστών	- 170 -
5.5.2 Ροή μεθανίου στην παράκτια ζώνη.....	- 172 -
5.5.3 Εκτίμηση συνολικής ποσότητας διαφεύγοντος μεθανίου προς την ατμόσφαιρα.....	- 176 -
5.5.3.1 Εκτίμηση ποσότητας εκλυόμενου μεθανίου από την παράκτια ζώνη της Πάτρας.....	- 176 -
5.5.3.2 Εκτίμηση ποσότητας εκλυόμενου μεθανίου από το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	- 178 -
5.6 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 184 -
6 ΔΥΤΙΚΟΣ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ – ΟΡΜΟΣ ΕΛΑΙΩΝΑ.....	- 191 -
6.1 ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΚΡΑΤΗΡΩΝ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΟΥ ΟΡΜΟΥ ΤΟΥ ΕΛΑΙΩΝΑ	- 191 -
6.1.1 Μορφολογικά χαρακτηριστικά	- 193 -
6.1.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά.....	- 198 -
6.1.2.1 Στρωματογραφία	- 198 -
6.1.2.2 Ενδείξεις παρουσίας αερίων στις σεισμικές τομογραφίες	- 199 -
6.1.2.3 Κρατήρες διαφυγής ρευστών στις σεισμικές τομογραφίες	- 200 -
6.1.3 Επιτόπιες μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων – Προέλευση ρευστών	- 201 -

6.1.4 Οπτική παρατήρηση.....	- 206 -
6.1.4.1 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP1.....	- 206 -
6.1.4.2 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP2.....	- 208 -
6.1.4.3 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP3.....	- 210 -
6.1.4.4 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP4.....	- 212 -
6.1.4.5 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP5.....	- 214 -
6.1.4.6 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP6.....	- 216 -
6.2 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 218 -
7 ΚΟΛΠΟΣ ΚΑΤΑΚΟΛΟΥ	- 223 -
7.1 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	- 223 -
7.1.1 Σεισμοστροματογραφία.....	- 224 -
7.1.2 Ενδείξεις παρουσίας αερίων στις σεισμικές τομογραφίες.....	- 225 -
7.1.3 Ρήγματα.....	- 227 -
7.1.4 Ηχοβολιστικός εντοπισμός και αποτύπωση των διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα.....	- 228 -
7.2 ΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ.....	- 234 -
7.3 ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ.....	- 237 -
7.4 ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΔΙΑΦΥΓΩΝ.....	- 239 -
7.5 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ	- 241 -
7.5.1 Μεθάνιο.....	- 243 -
7.5.2 Υδροθείο.....	- 243 -
7.6 ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΥΧΟΣ ΔΙΑΠΥΡΙΣΜΟΣ	- 244 -
7.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ ΠΟΥ ΔΙΑΦΕΥΓΕΙ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	- 245 -
7.8 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ	- 249 -
7.9 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 251 -
8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 257 -
9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	- 265 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ	283

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Τα κυριότερα μεθανογενή <i>archaea</i> και η μορφή τους.....	14 -
Πίνακας 5.1. Τα κύρια μορφομετρικά χαρακτηριστικά των κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου.	114 -
Πίνακας 5.2. Μετρήσεις Μεθανίου, Θερμοκρασίας και Αλατότητας στον Πατραϊκό κόλπο.	135 -
Πίνακας 5.3. Λόγοι συγκεντρώσεων διαλυμένου μεθανίου μεταξύ μέτρησης και μέσης τιμής κάθε περιόδου μετρήσεων.	137 -
Πίνακας 5.4. Λόγοι συγκεντρώσεων διαλυμένου μεθανίου στο πυθμαίο προς το επιφανειακό στρώμα στη θέση PM4.....	140 -
Πίνακας 5.5. Στατιστικά στοιχεία για τις περιόδους λειτουργίας του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου	142 -
Πίνακας 5.6. Ομαδοποίηση των γεγονότων διαφυγών σε σχέση με τις φυσικές ιδιότητες της υδάτινης στήλης.	152 -
Πίνακας 5.7. Συγκεντρώσεις και μέσες συγκεντρώσεις ($\mu\text{mol/l}$) διαλυμένου μεθανίου, και θερμοκρασία νερού στην περιοχή του πεδίου κρατήρων.	165 -
Πίνακας 5.8. Χημική ανάλυση αερίων στα δείγματα της παράκτιας ζώνης της Πάτρας και (*)αναγωγή των τιμών σε ελεύθερη ατμοσφαιρικού αέρα βάση.	170 -
Πίνακας 5.9. Ισοτοπική ανάλυση των δειγμάτων της παράκτιας ζώνης της Πάτρας.	171 -
Πίνακας 5.10. Μετρήσεις ροής μεθανίου στην παράκτια ζώνη πλησίον του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών τον Ιούλιο 2004.	173 -
Πίνακας 5.11. Μετρήσεις ροής μεθανίου στην παράκτια ζώνη πλησίον του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών τον Ιούλιο 2006.....	173 -
Πίνακας 5.12. Εκτίμηση της προσφοράς μεθανίου στην ατμόσφαιρα από την παράκτια ζώνη της Πάτρας.....	177 -
Πίνακας 5.13. Εκτίμηση συνολικής ποσότητας εκλυόμενου μεθανίου μετά από το σεισμό της 8 ^{ης} Ιουνίου 2008 από το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών.	179 -
Πίνακας 5.14. Υπολογισμός ροής μεθανίου από την επιφάνεια της θάλασσας προς την ατμόσφαιρα στην περιοχή του πεδίου των κρατήρων.	181 -
Πίνακας 5.15. Προσφορά μεθανίου στην ατμόσφαιρα από περιοχές διαφυγών.	190 -
Πίνακας 6.1. Τα κύρια μορφομετρικά χαρακτηριστικά των κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα (*εκτίμηση σχετικού βάθους, **βάθος ευρύτερης περιοχής).	194 -
Πίνακας 6.2. Μετρήσεις Μεθανίου, Θερμοκρασίας και Αλατότητας στο επιφανειακό και στο πυθμαίο στρώμα.....	202 -
Πίνακας 6.3. Τα κυριότερα μορφολογικά, ιζηματολογικά και βιολογικά χαρακτηριστικά και η παρουσία διαφυγών ρευστών των 'κύριων' κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα.....	218 -
Πίνακας 7.1. Χημική ανάλυση του δείγματος από τη θέση K1 (συγκέντρωση %).	239 -
Πίνακας 7.2. Μετρήσεις ροής αερίων στον λιμένα και στο «Φάρο» Κατακόλου.	240 -
Πίνακας 7.3. Χημικές αναλύσεις των δειγμάτων αερίων που συλλέχτηκαν στον λιμένα και στο «Φάρο» Κατακόλου (συγκέντρωση %).....	241 -
Πίνακας 7.4. Ισοτοπική ανάλυση των δειγμάτων.....	241 -
Πίνακας 7.5. Εκτίμηση της ποσότητας μεθανίου που διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα από την υποθαλάσσια περιοχή του λιμένα Κατακόλου	248 -
Πίνακας 7.6. Εκτιμήσεις διαφυγής μεθανίου από περιοχές ψυχρών διαφυγών αέριων υδρογονανθράκων.	249 -
Πίνακας 8.1. Ποσότητες μεθανίου που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα από διάφορες περιοχές του πλανήτη και από τις υπό μελέτη περιοχές	262 -

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1.1. Χάρτης της Ελλάδας όπου φαίνονται οι περιοχές που έχει αναφερθεί η παρουσία κρατήρων διαφυγής ρευστών, διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα και αέριοι υδρογονάνθρακες στα επιφανειακά ιζήματα. Επίσης σημειώνονται (κόκκινα βέλη) οι περιοχές μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής. - 7 -
- Εικόνα 1.2. Χάρτης σεισμικών επικέντρων στον Πατράϊκό και Δυτικό Κορινθιακό κόλπο από το 1900 έως σήμερα (M = τοπικό μέγεθος, πηγή Γεωδυναμικό Ινστιτούτο) (ευγενική προσφορά του Επίκουρου Καθηγητή Ε. Σώκου)..... - 8 -
- Εικόνα 1.3. Χάρτης σεισμικών επικέντρων στην ευρύτερη περιοχή του Κατακόλου από το 1900 έως σήμερα (M = τοπικό μέγεθος, πηγή Γεωδυναμικό Ινστιτούτο) (ευγενική προσφορά του Επίκουρου Καθηγητή Ε. Σώκου)..... - 8 -
- Εικόνα 2.1. Κύκλος της τροφικής αλυσίδας στο θαλάσσιο περιβάλλον (τροποποίηση από Judd and Hovland, 2007)..... - 13 -
- Εικόνα 2.2. Κατακόρυφες κατανομές συγκεντρώσεων μεθανίου και θεικών στο ιζημα και περιοχές σχηματισμού ψαλιδίων μεθανίου, SMTZ ζώνη μετάβασης μεθανίου – θεικών, (1)CH₄ –(2)CH₄ υψηλή και μικρή παραγωγικότητα μεθανίου αντίστοιχα (τροποποίηση από Whiticar, 2002)..... - 14 -
- Εικόνα 2.3. Φωτογραφίες μεθανογενών *archaea* στο μικροσκόπιο..... - 15 -
- Εικόνα 2.4. Τα βάθη σχηματισμού υδρογονανθράκων (τροποποίηση από Judd and Hovland, 2007).... - 18 -
- Εικόνα 2.5. Η χρήση των ισοτόπων του άνθρακα για τη διάκριση του μεθανίου διαφορετικής προελεύσεως (τροποποίηση από Judd and Hovland, 2007)..... - 20 -
- Εικόνα 2.6. Η χρήση των ισοτόπων άνθρακα και υδρογόνου για τη διάκριση της προέλευσης του μεθανίου (τροποποίηση από Whiticar, 1999). - 21 -
- Εικόνα 2.7. Σχηματικό διάγραμμα των διαφυγών γλυκού νερού από τον πυθμένα (τροποποίηση από Burnett et al., 2003) - 21 -
- Εικόνα 2.8. Η επίδραση της παρουσίας αερίων στα ιζήματα στην ταχύτητα των ακουστικών κυμάτων (τροποποίηση από Wilkens and Richardson, 1998)..... - 24 -
- Εικόνα 2.9. Η συχνότητα συντονισμού των ψαλιδίων σύμφωνα με τη διάμετρο τους. Οι σκιασμένες περιοχές δείχνουν τις συχνότητες λειτουργίας των τομογράφων υποδομής πυθμένα boomer και pinger (περιλαμβάνει τον τύπο 3.5kHz) και του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης (τροποποίηση από Wilkens and Richardson, 1998)..... - 25 -
- Εικόνα 2.10. Ακουστικές ανωμαλίες που δηλώνουν την παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα ιζήματα (ATZ-Σεισμολογισμένη καταγραφή, D-Αναβολώσεις του πυθμένα, ER-Έντονες σεισμικές ανακλάσεις, CD-Στηλοειδής διατάραξη, GP-Θύλακες αερίων, GP-Πλούμες αερίων, (από Papatheodorou et al., 1993), *brightspot-Λαμπερές κηλίδες* (από Judd and Hovland, 2007))..... - 27 -
- Εικόνα 2.11. Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα του σχηματισμού κρατήρων διαφυγής ρευστών (από Judd and Hovland, 2007). - 30 -
- Εικόνα 2.12. Αναθόλωση πυθμένα (D) στη βόρεια θάλασσα (Τομογραφία από Hovland and Judd, 1988). - 33 -
- Εικόνα 2.13. Λασπούχα ηφαίστεια από τη Μαύρη Θάλασσα σε σεισμική τομογραφία και σε ηχογραφία (Krastel et al., 2003)..... - 33 -
- Εικόνα 2.14. Ηχογραφία στην οποία φαίνεται κηλίδα υψηλής ανακλαστικότητας στο Rockall Trough, Ηνωμένο Βασίλειο (ηχογραφία από Masson et al., 2003)..... - 34 -
- Εικόνα 2.15. Διαφυγές ρευστών στην υδάτινη στήλη σε βυθόμετρο και σε τομογραφία από την Βόρεια ακτή της Αυστραλίας (εικόνες από Rollet and Logan, 2005)..... - 35 -
- Εικόνα 2.16. Φωτογραφίες στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο όπου φαίνονται ανθρακικά ορυκτά προερχόμενα από την αναερόβια οξείδωση του μεθανίου (Φωτογραφίες από Judd et al., 2007).- 35 -
- Εικόνα 2.17. Αναερόβια οξείδωση μεθανίου και τα προϊόντα της (τροποποίηση από Judd and Hovland, 2007)..... - 36 -
- Εικόνα 2.18. Υποβρύχιες φωτογραφίες όπου φαίνονται βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα σε χονδρόκοκκο και σε λεπτόκοκκο πυθμένα..... - 37 -
- Εικόνα 2.19. Το μεθάνιο που διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα σε Tg/year και το ποσοστό της κάθε πηγής επί του συνόλου σύμφωνα με την IPCC (Ehhalt et al., 2001)..... - 43 -

Εικόνα 2.20. Το μεθάνιο που διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα σε Tg/year και το ποσοστό της κάθε πηγής επί του συνόλου σύμφωνα με τον Etiope, 2004.....	43 -
Εικόνα 2.21. Διαγράμματα των παγκόσμιων μεταβολών της στάθμης της θάλασσας, της θερμοκρασίας και του μεθανίου στην ατμόσφαιρα τα τελευταία 160.000 χρόνια (τροποποίηση από Judd et al., 2002).....	44 -
Εικόνα 2.22. Ο κύκλος του άνθρακα στο θαλάσσιο περιβάλλον (τροποποίηση από Judd and Hovland, 2007).....	45 -
Εικόνα 2.23. Παγκόσμιος χάρτης στον οποίο έχουν τοποθετηθεί θαλάσσιες περιοχές με παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα επιφανειακά ιζήματα και συνοδές γεωμορφές.....	46 -
Εικόνα 3.1. Βυθομετρικός χάρτης του Πατραϊκού κόλπου.....	48 -
Εικόνα 3.2. Τεκτονικός χάρτης του Πατραϊκού κόλπου όπου σημειώνεται η θέση του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών (Κ.Δ.Ρ.). (Τροποποίηση από Ferentinos et al., 1985; Flotte et al., 2005).....	50 -
Εικόνα 3.3. Τομογραφία 3.5kHz κάθετα στη κεντρική τάφρο του Πατραϊκού κόλπου όπου φαίνεται η βασική ασυμφωνία και οι τρεις υποενότητες της ανώτερης ενότητας ιζημάτων (από Chronis et al., 1991).....	51 -
Εικόνα 3.4. Βυθομετρικός και τεκτονικός χάρτης του Κορινθιακού κόλπου (από Στεφάτος, 2005)-	53 -
Εικόνα 3.5. Τεκτονικός χάρτης του δυτικού Κορινθιακού κόλπου (από Στεφάτος, 2005). AIG: ρ. Αίγιο, AKR: ρ. Ακράτα, AWC: αξονικό ρήγμα δυτικού Κορινθιακού, DLA: ρ. Διακοφτό, DUN: ρ. Ντόντος, ELL: ρ. Ελίκη, N-ERA: ρ. Βόρειο Ερατεινής, S-ERA: ρ. Νότιο Ερατεινής, TRI: ρ. Τριζόνα, VAL: ρ. Βαλμύτικα.....	54 -
Εικόνα 3.6. Η περιοχή μελέτης στο νότιο περιθώριο του Δυτικού Κορινθιακού κόλπου, στον Όρμο του Ελαιώνα Η θέση του ρήγματος Κερυνίτη από Pacchiani and Lyon-Caen, 2010.....	56 -
Εικόνα 3.7. Υδρολιθολογικός χάρτης του βορείου περιθωρίου του δυτικού Κορινθιακού κόλπου (από Νίκας, 2004).....	59 -
Εικόνα 3.8. Ερμηνευτική τομή από σεισμική τομογραφία στην οποία φαίνεται η γεωλογική δομή στην περιοχή του Κατακόλου. Στον ένθετο χάρτη δίνεται η θέση της τομής (από Kamberis et al., 2000b).....	61 -
Εικόνα 3.9. Τεκτονικός χάρτης του Κατακόλου (τροποποίηση από Kamberis et al., 2000a; 2000b).-	62 -
Εικόνα 3.10. Φωτογραφία από τη θέση «Φάρος» στην οποία διακρίνεται η χερσαία διαφυγή από την απουσία φυτοκάλυψης και την ιλύδη σύσταση του εδάφους.....	63 -
Εικόνα 3.11. Φωτογραφία από το λιμένα Κατακόλου στην οποία διακρίνεται η άνοδος φυσαλίδων στην επιφάνεια της θάλασσας.....	63 -
Εικόνα 4.1. Διάγραμμα ροής στο οποίο παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας διατριβής.....	66 -
Εικόνα 4.2. Το σύστημα τομογράφου υποδομής, πυθμένα 3.5kHz με αναλογική καταγραφή που χρησιμοποιήθηκε στις έρευνες.....	68 -
Εικόνα 4.3. Ο ημιπλωτός πομποδέκτης O.R.E. model 132B.....	68 -
Εικόνα 4.4. Το σύστημα καταγραφής ψηφιακών δεδομένων τομογράφου υποδομής, πυθμένα TRITON Elics που χρησιμοποιήθηκε στις έρευνες.....	69 -
Εικόνα 4.5. Ο συρόμενος πομποδέκτης O.R.E.....	69 -
Εικόνα 4.6 α) Οι μονάδες παραγωγής ενέργειας SIG 2000A και 2000B, β) το ενεργειακό καλώδιο και η διάταξη ηλεκτροδίων, γ) το καλώδιο με τη συστοιχία υδροφώνων.....	70 -
Εικόνα 4.7. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με τομογράφο υποδομής πυθμένα στον Πατραϊκό κόλπο.....	70 -
Εικόνα 4.8. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με τομογράφο υποδομής πυθμένα στον όρμο του Ελαιώνα.....	71 -
Εικόνα 4.9. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με τομογράφο υποδομής πυθμένα στον κόλπο του Κατακόλου.....	71 -
Εικόνα 4.10. Η ηχοβολιστική τορπίλη EG&G 272TD και καλώδιο έλξης 250m.....	72 -
Εικόνα 4.11. Αναλογικό σύστημα καταγραφής EG&G260.....	73 -
Εικόνα 4.12. Ψηφιακό σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας σήματος Edgetech 4100 P.....	73 -
Εικόνα 4.13. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στον Πατραϊκό κόλπο.....	73 -
Εικόνα 4.14. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στον όρμο του Ελαιώνα.....	74 -

Εικόνα 4.15. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στον κόλπο του Κατακόλου.....	- 74 -
Εικόνα 4.16. Το μονοδεσμικό βυθόμετρο που χρησιμοποιήθηκε.....	- 75 -
Εικόνα 4.17. Χάρτης όπου φαίνεται η περιοχή που αποτυπώθηκε με βυθόμετρο.....	- 75 -
Εικόνα 4.18. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι θέσεις γεωχημικής διασκόπησης στον Πατραϊκό κόλπο - 76 -	- 76 -
Εικόνα 4.19. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι θέσεις γεωχημικής διασκόπησης στον Όρμο του Ελαιώνα.....	- 76 -
Εικόνα 4.20. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι θέσεις γεωχημικής διασκόπησης στον κόλπο του Κατακόλου.....	- 77 -
Εικόνα 4.21. Ο αισθητήρας μεθανίου METS και σχεδιάγραμμα με τις διαστάσεις του.....	- 78 -
Εικόνα 4.22. Μέρη του αισθητήρα μεθανίου METS.....	- 79 -
Εικόνα 4.23. Ο πολυπαραμετρικός ρεματογράφος Aanderaa RCM9-MKII.....	- 80 -
Εικόνα 4.24. Το πολυπαραμετρικό σύστημα μετρήσεων ποιότητας θαλασσινού νερού YSI XL600.- 80 -	- 80 -
Εικόνα 4.25. Ο φορητός αέριος χρωματογράφος με FID <i>Autofim II, Telega</i>	- 81 -
Εικόνα 4.26. Το σύστημα χρωματομετρικών σωλήνων μέτρησης αερίων.....	- 81 -
Εικόνα 4.27. Το σύστημα κλειστού θαλάμου που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ροής μεθανίου... - 81 -	- 81 -
Εικόνα 4.28. Το κατευθυνόμενο υποβρύχιο όχημα (R.O.V.) Benthos MKII.....	- 82 -
Εικόνα 4.29. Σχέδια του υποβρυχίου παρατηρητηρίου μακράς διάρκειας (GMM) σε όψη και σε κάτοψη.....	- 82 -
Εικόνα 4.30. Σχέδιο του υποβρυχίου παρατηρητηρίου μακράς διάρκειας (GMM) μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων.....	- 83 -
Εικόνα 4.31. Το υποβρύχιο παρατηρητήριο παρακολούθησης μακράς διάρκειας (1:METs, 2:H ₂ S, 3:CTD, 4: Battery, 5: DACS).....	- 84 -
Εικόνα ΠΙ.1. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz και Η.Π.Σ. στον Πατραϊκό κόλπο τον Ιούλιο – Αύγουστο 1993.....	- 89 -
Εικόνα ΠΙ.2. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. Sparker στον Πατραϊκό κόλπο τον Ιούλιο 1993.....	- 90 -
Εικόνα ΠΙ.3. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz και Η.Π.Σ. στον Πατραϊκό κόλπο τον Αύγουστο 1993.....	- 91 -
Εικόνα ΠΙ.4. Χάρτης όπου φαίνονται τα βυθομετρικά σημεία από τα ψηφιακά δεδομένα του βυθόμετρου στον Πατραϊκό κόλπο για τις περιόδους 1997 και 1999.....	- 91 -
Εικόνα ΠΙ.5. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz στον Πατραϊκό κόλπο τον Αύγουστο 2002.....	- 92 -
Εικόνα ΠΙ.6. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz στον Πατραϊκό κόλπο τον Ιούλιο 2007.....	- 93 -
Εικόνα ΠΙ.7. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Η.Π.Σ. στον Πατραϊκό κόλπο τον Ιούνιο 2008, Μάιο και Αύγουστο 2009.....	- 94 -
Εικόνα ΠΙ.8. Οι θέσεις μετρήσεων γεωχημικών παραμέτρων στον Πατραϊκό κόλπο.....	- 95 -
Εικόνα ΠΙ.9. Οι θέσεις μετρήσεων ροής μεθανίου και δειγματοληψίας στην παράκτια ζώνη του πεδίου..... - 96 -	- 96 -
Εικόνα ΠΙ.10. Χάρτης όπου φαίνονται οι θέσεις πόντισης του υποβρυχίου παρατηρητηρίου και η θέση προσγειώσεως του καλωδίου σύνδεσης.....	- 100 -
Εικόνα ΠΙ.11. Σειρά σχεδιαγραμμάτων που αναπαριστούν την μέθοδο πόντιση του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου και του καλωδίου σύνδεσης του με το σταθμό ακτής.....	- 101 -
Εικόνα ΠΙ.12. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz και Η.Π.Σ. στον Όρμο του Ελαιώνα τον Αύγουστο 2001.....	- 103 -
Εικόνα ΠΙ.13. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Η.Π.Σ. στον Όρμο του Ελαιώνα τον Ιούνιο 2006.....	- 103 -
Εικόνα ΠΙ.14. Χάρτης όπου φαίνονται οι θέσεις μετρήσεων γεωχημικών και φυσικών παραμέτρων στον Όρμο του Ελαιώνα.....	- 104 -
Εικόνα ΠΙ.15. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz και οι θέσεις μετρήσεων METS στον κόλπο του Κατακόλου.....	- 105 -

Εικόνα ΠΙ.16. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στον κόλπο του Κατακόλου.....	- 106 -
Εικόνα ΠΙ.17. Χάρτης όπου φαίνονται οι θέσεις δειγματοληψίας και φωτογράφισης στον κόλπο του Κατακόλου.....	- 107 -
Εικόνα ΠΙ.18. Χάρτης όπου φαίνονται οι θέσεις μετρήσεων ροής μεθανίου και δειγματοληψίας στη χερσόνησο του Κατάκολου.....	- 108 -
Εικόνα 5.1. Βυθομετρικός χάρτης της παράκτιας ζώνης της Πάτρας όπου φαίνεται το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου. Στον ένθετο χάρτη του Πατραϊκού κόλπου φαίνεται η θέση του πεδίου κρατήρων.....	- 110 -
Εικόνα 5.2. Μωσαϊκό ηχογραφιών όπου αποτυπώνεται το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου.....	- 111 -
Εικόνα 5.3. Βυθομετρικός χάρτης της περιοχής όπου φαίνεται η θέση των κρατήρων διαφυγής ρευστών και ηχογραφίες στις οποίες αποτυπώνονται κοινοί (β), αρχικοί (γ) και σύνθετοι (δ) κρατήρες, (ε) ιστόγραμμα συμμετοχής μορφολογικών κλάσεων στο σύνολο των κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	- 112 -
Εικόνα 5.4. Χάρτης όπου φαίνεται ο μορφολογικός διαχωρισμός των κρατήρων διαφυγής ρευστών και το σχετικό τους βάθος.....	- 116 -
Εικόνα 5.5. Ιστόγραμμα συχνότητας βάθους κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	- 117 -
Εικόνα 5.6. Ιστόγραμμα συχνότητας σχετικού βάθους κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	- 117 -
Εικόνα 5.7. Ιστόγραμμα συχνότητας μεγέθους επιφάνειας (εμβαδόν) κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	- 117 -
Εικόνα 5.8. Ιστόγραμμα συχνότητας περιμέτρου κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	- 117 -
Εικόνα 5.9. Ροδόγραμμα διευθύνσεων μέγιστων αξόνων κοινών κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	- 118 -
Εικόνα 5.10. Ροδόγραμμα διευθύνσεων μέγιστων αξόνων σύνθετων κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	- 118 -
Εικόνα 5.11. Ροδόγραμμα διευθύνσεων μέγιστων αξόνων κρατήρων διαφυγής ρευστών και η σχέση τους με τη διάμετρο του άξονα.....	- 118 -
Εικόνα 5.12. Μωσαϊκό ηχογραφιών μετά (2008) και πριν (1993) την κάλυψη μέρους του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών για την κατασκευή του νέου λιμένα Πατρών.....	- 119 -
Εικόνα 5.13. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η κάλυψη ενός κρατήρα διαφυγής ρευστών (ΘΚΔΡ) για την κατασκευή του κυματοθραύστη του νέου λιμένα Πατρών.....	- 120 -
Εικόνα 5.14. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η επιφανειακή ακουστικά διάφανη ακολουθία και η επιφάνεια έντονης ανακλαστικότητας.....	- 121 -
Εικόνα 5.15. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται σεισμοκονιασμένη καταγραφή (ΑΤΖ) και έντονες ανακλάσεις (ΕΡ).....	- 121 -
Εικόνα 5.16. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται αναθόλωση πυθμένα (D) και θύλακας αερίου (GP) κάτω από την αναθόλωση.....	- 122 -
Εικόνα 5.17. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η παρουσία έντονων ανακλάσεων (ΕΡ) στην ανώτερη επιφανειακή ενότητα (ΑΕ) και σεισμοκονιασμένη καταγραφή (ΑΤΖ) που ξεινιάει από την επιφάνεια Ολοκαίνου/Πλειστοκαίνου και καταλήγει στην έντονη ανάκλαση εντός της επιφανειακής ενότητας.....	- 122 -
Εικόνα 5.18. Τρισδιάστητη αποικόνιση σεισμικών τομογραφιών στην οποία φαίνεται τμήμα του πεδίου κρατήρων.....	- 123 -
Εικόνα 5.19. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών.....	- 124 -
Εικόνα 5.20. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών με επίπεδο πυθμένα.....	- 124 -
Εικόνα 5.21. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών με τοιχώματα μεγάλης κλίσης.....	- 124 -
Εικόνα 5.22. Χάρτης ισοκλίσεων στην περιοχή του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	- 125 -
Εικόνα 5.23. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών με τα πρανάς του να έχει καταρρεύσει (ΒΜ: Βαρυτική Μετακίνηση).....	- 126 -
Εικόνα 5.24. Ηχογραφίες που συλλέχθηκαν με διαφορά ενός έτους με ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά συλλογής (πορεία σκάφους, ταχύτητα, ύψος πτήσης, ενίσχυση σήματος), στην οποία φαίνεται η μεταβολή της ανακλαστικότητας του πυθμένα του σύνθετου κρατήρα PP4.....	- 127 -

Εικόνα 5.25. Μωσαϊκό ηχογραφιών στο οποίο έχουν τοποθετηθεί οι ρηξιγενείς δομές που εντοπιστήκαν στην περιοχή του πεδίου (P. ΑΤ: ρήγμα Αγίας Τριάδας).....	128 -
Εικόνα 5.26. Σεισμικές τομογραφίες 3.5kHz στις οποίες φαίνεται το ρήγμα της Αγ. Τριάδας και ο σχηματισμός κρατήρων διαφυγής ρευστών στην οροφή του ρήγματος (P.ΑΤ.: ρήγμα Αγ, Τριάδας).	129 -
Εικόνα 5.27. Τεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του πεδίου κρατήρων (P.ΑΤ.: ρήγμα Αγ. Τριάδας, RPTF: ρήγμα μετασχηματισμού Ρίο-Πάτρα).....	129 -
Εικόνα 5.28. Σεισμικές τομογραφίες 3.5kHz στις οποίες φαίνεται το αντιθετικό ρήγμα και ο σχηματισμός κρατήρων διαφυγής ρευστών (P: ρήγμα).....	130 -
Εικόνα 5.29. Σεισμική τομο-γραφία 3.5kHz κάθετη στην ακτή, στην οποία φαίνεται κανονικό ρήγμα και ο σχηματισμός κρατήρων διαφυγής ρευστών στο ίχνος του ρήγματος (P: ρήγμα).	130 -
Εικόνα 5.30. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz κάθετη στην ακτή, στην οποία φαίνεται κανονικό ρήγμα και ο σχηματισμός κρατήρων διαφυγής ρευστών στο ίχνος του ρήγματος (P: ρήγμα).	131 -
Εικόνα 5.31. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνονται τα περιστραμμένα τεμάχια (P: ρήγμα).....	131 -
Εικόνα 5.32. α) Η θέση του σταθμού μετρήσεων και β) χρονοσειρά της θερμοκρασίας για το διάστημα 13 – 17 Ιουλίου 1993, στο οποίο σημειώνεται η χρονική στιγμή του σεισμού.	133 -
Εικόνα 5.33. Μωσαϊκά ηχογραφιών με δεδομένα που συλλέχθηκαν (α) λίγες ημέρες μετά από το σεισμό 5.4R της 14 ^{ης} Ιουλίου 1993 και (β) ένα μήνα αργότερα. Με λευκά βέλη σημειώνονται οι θέσεις διαφυγών που εντοπίστηκαν κατά την πρώτη έρευνα. Στις ίδιες θέσεις δεν φαίνονται διαφυγές κατά τη δεύτερη έρευνα.	134 -
Εικόνα 5.34. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται διαφυγή ρευστού πάνω από ένα κρατήρα που βρίσκεται στην επιφανειακή έκφραση του ρήγματος της Αγίας Τριάδας.	135 -
Εικόνα 5.35. Τρισδιάστατο διάγραμμα όπου έχουν τοποθετηθεί οι λόγοι συγκέντρωσης διαλυμένου μεθανίου για κάθε θέση μετρήσεων προς τη μέση συγκέντρωση (CH_4/MCH_4) κατά την περίοδο δειγματοληψίας για το επιφανειακό στρώμα νερού (άξονας Z), ανά θέση δειγματοληψίας (άξονας X) και ανά περίοδο δειγματοληψίας (άξονας Y). Η γαλάζια γραμμοσκιασμένη επιφάνεια δηλώνει λόγο CH_4/MCH_4 ίσο με τη μονάδα.	138 -
Εικόνα 5.36. Τρισδιάστατο διάγραμμα όπου έχουν τοποθετηθεί οι λόγοι συγκέντρωσης διαλυμένου μεθανίου για κάθε θέση μετρήσεων προς τη μέση συγκέντρωση (CH_4/MCH_4) κατά την περίοδο δειγματοληψίας για το πυθμαίο στρώμα νερού (άξονας Z), ανά θέση δειγματοληψίας (άξονας X) και ανά περίοδο δειγματοληψίας (άξονας Y). Η γαλάζια γραμμοσκιασμένη επιφάνεια δηλώνει λόγο CH_4/MCH_4 ίσο με τη μονάδα.	139 -
Εικόνα 5.37. Τρισδιάστατο διάγραμμα όπου φαίνεται η σχέση των λόγων συγκέντρωσης διαλυμένου μεθανίου στο πυθμαίο προς το επιφανειακό στρώμα στη θέση PM4 με το χρόνο.	140 -
Εικόνα 5.38. (α) Βυθομετρικός χάρτης όπου φαίνεται η θέση πόντισης του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου, (β) μωσαϊκό ηχογραφιών στο οποίο αποτυπώνεται ο κρατήρας PP4 και (γ) σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία απεικονίζεται ο κρατήρας.	141 -
Εικόνα 5.39. Διάγραμμα τάσεως εξόδου για δύο αισθητήρες που λειτούργησαν ταυτόχρονα.	143 -
Εικόνα 5.40. Διάγραμμα θερμοκρασίας με το χρόνο για την πρώτη φάση λειτουργίας του σταθμού.....	144 -
Εικόνα 5.41. Διάγραμμα θερμοκρασίας με το χρόνο στις 18 Μαΐου 2004 όπου φαίνεται μεγάλη και απότομη πτώση της θερμοκρασίας.....	144 -
Εικόνα 5.42. Διάγραμμα θερμοκρασίας με το χρόνο για τη δεύτερη φάση λειτουργίας του σταθμού....	145 -
Εικόνα 5.43. Διάγραμμα πίεσης με το χρόνο για την πρώτη φάση λειτουργίας του σταθμού.	146 -
Εικόνα 5.44. Διάγραμμα πίεσης με το χρόνο για τη δεύτερη φάση λειτουργίας του σταθμού.	146 -
Εικόνα 5.45. Φάσματα Fourier για την πίεση για την πρώτη (α) και τη δεύτερη (β) περίοδο. Σημειώνονται οι συχνότητες που συμπίπτουν με τις κύριες συνιστώσες της παλίρροιας, K ₁ : σεληνιακή ημερήσια, O ₁ : κύρια σεληνιακή ημερήσια, M ₂ : κύρια σεληνιακή ημί-ημερήσια και S ₂ : κύρια ηλιακή ημί-ημερήσια.....	147 -
Εικόνα 5.46. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης με το χρόνο ($\Delta T/\Delta t > 0.01^\circ C/10 \text{ min}$) όπου φαίνεται η σύνδεση μεταξύ απότομων πτώσεων της θερμοκρασίας και της πίεσης.....	147 -
Εικόνα 5.47. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης, αλατότητας και πίεσης με το χρόνο για την πρώτη φάση μετρήσεων.....	148 -

Εικόνα 5.48. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης, αλατότητας και πίεσης με το χρόνο για την δεύτερη φάση μετρήσεων.	- 149 -
Εικόνα 5.49. Διάγραμμα συγκεντρώσεως διαλυμένου μεθανίου με το χρόνο για την πρώτη φάση μετρήσεων.	- 150 -
Εικόνα 5.50. Διάγραμμα τάσεως εξόδου (1/V) του αισθητήρα μεθανίου με το χρόνο για τη δεύτερη φάση μετρήσεων.	- 150 -
Εικόνα 5.51. Διάγραμμα διαλυμένου μεθανίου και θερμοκρασίας με το χρόνο όπου σημειώνονται με διαφορετικό χρώμα οι 11 ακολουθίες γεγονότων και τα 6 ανεξάρτητα γεγονότα που διακρίθηκαν....	- 152 -
Εικόνα 5.52. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης και διαλυμένου μεθανίου στο οποίο φαίνεται γεγονός διαφυγής Τύπου 1.	- 153 -
Εικόνα 5.53. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης και διαλυμένου μεθανίου στο οποίο φαίνεται γεγονός διαφυγής Τύπου 2.	- 153 -
Εικόνα 5.54. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης και διαλυμένου μεθανίου στο οποίο φαίνεται γεγονός διαφυγής Τύπου 3.	- 154 -
Εικόνα 5.55. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης και διαλυμένου μεθανίου στο οποίο φαίνεται γεγονός διαφυγής Τύπου 4.	- 154 -
Εικόνα 5.56. Διάγραμμα τάσης εξόδου του αισθητήρα μεθανίου (1/V) και θερμοκρασίας με το χρόνο από 29/9 έως 19/10/2004, όπου σημειώνονται 4 ακολουθίες γεγονότων και 6 ανεξάρτητα γεγονότα μεταβολής τάσεως.....	- 155 -
Εικόνα 5.57. Διάγραμμα τάσης εξόδου του αισθητήρα μεθανίου (1/V) και θερμοκρασίας με το χρόνο από 29/9 έως 19/10/2004, όπου σημειώνονται 2 ακολουθίες γεγονότων και 4 ανεξάρτητα γεγονότα μεταβολής τάσεως.....	- 155 -
Εικόνα 5.58. Διάγραμμα συγκεντρώσεως διαλυμένου υδρόθειου με το χρόνο για την πρώτη περίοδο μετρήσεων.	- 156 -
Εικόνα 5.59. Διαγράμματα συγκεντρώσεως διαλυμένου μεθανίου, υδρόθειου, θερμοκρασίας και πίεσης με το χρόνο στα οποία φαίνονται πως οι απότομες πτώσεις θερμοκρασίας και πίεσης συνοδεύονται από αυξήσεις στη συγκέντρωση μεθανίου και υδρόθειου.....	- 156 -
Εικόνα 5.60. Σεισμικά επίκεντρα των σεισμών που συνέβησαν (α) κατά την πρώτη και (β) κατά τη δεύτερη περίοδο λειτουργίας.	- 157 -
Εικόνα 5.61. Συσχέτιση μεταβολής διαλυμένου μεθανίου μετά από τα σεισμικά γεγονότα στις (α) 01/06/2004 και (β) 03/06/2004.....	- 158 -
Εικόνα 5.62. Συσχέτιση μεταβολής διαλυμένου μεθανίου μετά από τις ακολουθίες σεισμικών γεγονότων στις (α) 21/06/2004 και (β) 06/06/2004.	- 158 -
Εικόνα 5.63. Χάρτης της Βορειο-ανατολικής Πελοποννήσου όπου σημειώνονται τα επίκεντρα του κυρίως σεισμού και των μετασεισμών.....	- 159 -
Εικόνα 5.64. Διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα όπως φαίνονται σε αδιόρθωτες καταγραφές του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στις 11 Ιουνίου 2008.	- 160 -
Εικόνα 5.65. Μωσαϊκό ηχογραφιών από το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών στο οποίο έχουν τοποθετηθεί οι θέσεις διαφυγών που εντοπίστηκαν μετά από τους τρεις ωκεανογρα-φικούς πλόες.-	- 162 -
Εικόνα 5.66. Αδιόρθωτη καταγραφή ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης («ηχογραφική τομή») με μεγάλη ενίσχυση σήματος όπου φαίνονται οι δύο τύποι ανακλάσεων στην υδάτινη στήλη.	- 162 -
Εικόνα 5.67. (α) Αδιόρθωτες καταγραφές ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης («ηχογραφικές τομές») κατά μήκος μίας πορείας σε διαφορετικές χρονικές περιόδους όπου σημειώνονται οι διαφυγές ρευστών και (β) σεισμική τομογραφία 3.5kHz κατά μήκος τμήματος της ίδιας πορείας η οποία καταγράφηκε ένα έτος πριν την εκδήλωση του σεισμού και στην οποία δεν υπάρχουν ενδείξεις διαφυγών ρευστών στην υδάτινη στήλη.	- 163 -
Εικόνα 5.68. (α) Αδιόρθωτες καταγραφές ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης («ηχογραφικές τομές») κατά μήκος μίας πορείας σε διαφορετικές χρονικές περιόδους όπου σημειώνονται οι διαφυγές ρευστών και (β) σεισμική τομογραφία 3.5kHz κατά μήκος τμήματος της ίδιας πορείας η οποία καταγράφηκε ένα έτος πριν την εκδήλωση του σεισμού και στην οποία δεν υπάρχουν ενδείξεις διαφυγών ρευστών στην υδάτινη στήλη.	- 163 -
Εικόνα 5.69. Αδιόρθωτες καταγραφές ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης τρεις ημέρες (α,γ) και ένα χρόνο (β,δ) μετά από τον κύριο σεισμό. Οι διαφυγές ρευστών που εντοπίζονται στις πρώτες (α, γ) δεν φαίνεται να υπάρχουν στις δεύτερες (β, δ).	- 164 -

Εικόνα 5.70. Χάρτης του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου όπου σημειώνονται οι θέσεις μετρήσεων με αισθητήρα μεθανίου METS την 12η/6/2008.	165 -
Εικόνα 5.71. Κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας στην ευρύτερη περιοχή του πεδίου κρατήρων στις 11/6/2003 (Φερεντίνος κ.α., 2005) και οι μετρήσεις θερμοκρασίας από τον αισθητήρα διαλυμένου μεθανίου στις 12/06/2008 στη θέση PM4.	166 -
Εικόνα 5.72. Φωτογραφίες από τον κρατήρα διαφυγής ρευστών PP4, στις οποίες φαίνεται (α) ομογενής πυθμένας με ιλύ, (β) μικρές λοφώδεις εξάρσεις με οπές στον πυθμένα και (γ) ο αισθητήρας μεθανίου κοντά στον πυθμένα του κρατήρα (σημ. η ημερομηνία στις φωτογραφίες δεν είναι πραγματική λόγω προβλήματος του ROV).....	167 -
Εικόνα 5.73. Βυθομετρικός χάρτης του βόρειου τομέα του πεδίου στον οποίο σημειώνονται οι θέσεις και η κοκκομετρική κατάταξη των δειγμάτων των πυρήνων ιζήματος.	167 -
Εικόνα 5.74. Κατανομή των κοκκομετρικών κλάσεων των επιφανειακών δειγμάτων των πυρήνων ιζήματος από το βόρειο τομέα του πεδίου κρατήρων.....	168 -
Εικόνα 5.75. Κατανομή των κοκκομετρικών κλάσεων του συνόλου των δειγμάτων των πυρήνων ιζήματος από το βόρειο τομέα του πεδίου κρατήρων.....	169 -
Εικόνα 5.76. Κατάταξη των δειγμάτων της παράκτιας ζώνης της Πάτρας σύμφωνα με τα ισότοπα άνθρακα και υδρογόνου.	171 -
Εικόνα 5.77. Διάγραμμα Bernard (τροποποίηση από Whitticar, 1999) στο οποίο τοποθετήθηκαν τα αποτελέσματα χημικών και ισοτοπικών αναλύσεων των δειγμάτων της παράκτιας ζώνης της Πάτρας.	171 -
Εικόνα 5.78. Χάρτης της παράκτιας ζώνης της Πάτρας όπου σημειώνονται οι θέσεις μετρήσεων ροής μεθανίου.....	172 -
Εικόνα 5.79. Κατανομή της ροής μεθανίου σε mg/m ² .d στην παράκτια ζώνη της Πάτρας σύμφωνα με τις μετρήσεις του 2004. (στον ένθετο χάρτη παρουσιάζονται οι τιμές ροής στην περιοχή της γεώτρησης P9).	175 -
Εικόνα 5.80. Κατανομή της ροής μεθανίου σε mg/m ² .d στην παράκτια ζώνη της Πάτρας σύμφωνα με τις μετρήσεις του 2004. Το όριο ανιχνευσιμότητας είναι 100 mg/m ² .d) (στον ένθετο χάρτη παρουσιάζονται οι τιμές ροής στην περιοχή της γεώτρησης P9-s3).....	175 -
Εικόνα 5.81. Χάρτης της παράκτιας ζώνης της Πάτρας όπου παρουσιάζονται οι τρεις περιοχές μικροδιαφυγών στις οποίες εκτιμήθηκε η συνολική προσφορά μεθανίου προς την ατμόσφαιρα.-	177 -
Εικόνα 5.82. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών όπου έχουν τοποθετηθεί οι διαφυγές ρευστών μετά από το σεισμό της 14ης Ιουλίου 1993 (μπλε γραμμές) και μετά το σεισμό της 8ης Ιουνίου 2008 (κόκκινες γραμμές) καθώς και η θέση των ρηγμάτων Ρ.ΑΤ: ρήγμα Αγίας Τριάδος).	185 -
Εικόνα 6.1. Τοπογραφικός χάρτης ευρύτερης περιοχής του Όρμου του Ελαιώνα στον οποίο σημειώνεται η θέση του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών και η θέση του ρήματος Κερυνίτη και βυθομετρικός χάρτης της περιοχής του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών.	192 -
Εικόνα 6.2. Μωσαϊκό ηχογραφιών στο οποίο αποτυπώνεται το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών- 194 -	194 -
Εικόνα 6.3. Βυθομετρικός χάρτης στον οποίο έχει τοποθετηθεί η θέση και ο κωδικός των κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα.	195 -
Εικόνα 6.4. Η μορφολογική διάκριση των κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα.-	196 -
Εικόνα 6.5. Ιστόγραμμα συχνότητας βάθους κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	197 -
Εικόνα 6.6. Ιστόγραμμα συχνότητας σχετικού βάθους κρατήρων διαφυγής ρευστών.	197 -
Εικόνα 6.7. Ιστόγραμμα συχνότητας μεγέθους επιφάνειας (εμβαδόν) κρατήρων διαφυγής ρευστών.....	197 -
Εικόνα 6.8. Ιστόγραμμα συχνότητας περιμέτρου κρατήρων διαφυγής ρευστών.	197 -
Εικόνα 6.9. Ροδόγραμμα διευθύνσεων μέγιστων αξόνων κρατήρων διαφυγής ρευστών και η σχέση τους με τη διάμετρο του άξονα.....	198 -
Εικόνα 6.10. Σεισμική τομογραφία 3.5 kHz κάθετα στην ακτή στην οποία φαίνεται η επιφάνεια διάβρωσης που διαχωρίζει τα Ολοκαινικά από τα Πλειστοκαινικά ιζήματα. Πλησίον της ακτής διακρίνεται έντονη ανάκλαση (ER).....	199 -
Εικόνα 6.11. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η επιφάνεια διάβρωσης που διαχωρίζει τα Ολοκαινικά από τα Πλειστοκαινικά ιζήματα.....	199 -

Εικόνα 6.12. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται σεισμοκονιασμένη καταγραφή (ΑΤΖ) και έντονες ανακλάσεις (ΕΡ).	- 200 -
Εικόνα 6.13. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται σεισμοκονιασμένη καταγραφή (ΑΤΖ) και θύλακας ρευστών (GP).	- 200 -
Εικόνα 6.14. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών με επίπεδο πυθμένα (μορφή ευρέως U).....	- 201 -
Εικόνα 6.15. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών με τοιχώματα μεγάλης κλίσης (δεξιά) (μορφή V) και τα όρια ενός άλλου (αριστερά).	- 201 -
Εικόνα 6.16. Μωσαικό ηχογραφιών στο πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα στο οποίο σημειώνονται οι θέσεις που πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων.....	- 202 -
Εικόνα 6.17. Κατακόρυφη κατανομή διαλυμένου μεθανίου (α), θερμοκρασίας (β) και αλατότητας (γ) με το βάθος στον κρατήρα διαφυγής ρευστών ΕΡ4.	- 204 -
Εικόνα 6.18. Διάγραμμα θερμοκρασίας αλατότητας και διαλυμένου μεθανίου κατά μήκος της τομής στον κρατήρα διαφυγής ρευστών ΕΡ4.	- 205 -
Εικόνα 6.19. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα διαφυγής ρευστών ΕΡ4 στην οποία φαίνεται διαφυγή ρευστού.	- 205 -
Εικόνα 6.20. Διάγραμμα θερμοκρασίας, pH και διαλυμένου οξυγόνου κατά μήκος της τομής στον πυθμένα του κρατήρα διαφυγής ρευστών ΕΡ4.....	- 206 -
Εικόνα 6.21. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών ΕΡ1	- 207 -
Εικόνα 6.22. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται έντονες διαφυγές ρευστών. ...	- 207 -
Εικόνα 6.23. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται διαφυγή ρευστών	- 207 -
Εικόνα 6.24. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται συστάδα διθύρων πάνω σε ιλυώδη πυθμένα.....	- 207 -
Εικόνα 6.25. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται αποικία εξακοροβάλλιου <i>cladocora caespitosa</i>	- 207 -
Εικόνα 6.26. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται κοραλλιογενής σχηματισμός. ...	- 208 -
Εικόνα 6.27. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών ΕΡ2	- 208 -
Εικόνα 6.28. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται έντονη διαφυγή ρευστών από μικρό κρατήρα.....	- 209 -
Εικόνα 6.29. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται διαφυγές ρευστών από μικρές οπές.....	- 209 -
Εικόνα 6.30. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται μικροί κρατήρες και οπές. ...	- 209 -
Εικόνα 6.31. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται η επαναιώρηση του ιζήματος μετά από μία έντονη διαφυγή ρευστών.....	- 209 -
Εικόνα 6.32. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται κροκάλες	- 209 -
Εικόνα 6.33. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα στην οποία φαίνονται πλήθος από σωλήνες πολύχαιτων (<i>polichaeta sabella</i>).	- 210 -
Εικόνα 6.34. Φωτογραφία του είδους <i>polichaeta sabella</i> , το οποίο αφθονεί στους κρατήρες διαφυγής ρευστών.....	- 210 -
Εικόνα 6.35. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται κοραλλιογενής σχηματισμός...-	- 210 -
Εικόνα 6.36. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται γυμνοβράγχιο να κινείται σε αδρόκοκκο πυθμένα.....	- 210 -
Εικόνα 6.37. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών ΕΡ3	- 211 -
Εικόνα 6.38. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται η παρουσία κροκάλων και συσσωματωμάτων ψηφίδων.....	- 211 -
Εικόνα 6.39. Φωτογραφία όπου φαίνονται ψηφίδες από τον πυθμένα του κρατήρα.....	- 211 -
Εικόνα 6.40. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων	- 211 -
Εικόνα 6.41. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων.	- 212 -
Εικόνα 6.42. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων και ένα πολύχαιτο.	- 212 -
Εικόνα 6.43. Φωτογραφία στην οποία φαίνεται κοράλλι από τον πυθμένα.....	- 212 -

Εικόνα 6.44. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται δίθυρο πάνω σε αδρόκοκκο πυθμένα.....	212 -
Εικόνα 6.45. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών EP4.....	213 -
Εικόνα 6.46. Φωτογραφία από τα όρια του κρατήρα στην οποία φαίνονται τα απότομα πρανή του κρατήρα.....	213 -
Εικόνα 6.47. Φωτογραφία από τα όρια του κρατήρα στην οποία φαίνονται τα απότομα πρανή του κρατήρα.....	213 -
Εικόνα 6.48. Φωτογραφία από τα όρια του κρατήρα στην οποία φαίνονται τα απότομα πρανή του κρατήρα.....	213 -
Εικόνα 6.49. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται διαφυγή ρευστών και πυκνή φυτοκάλυψη περιφερειακά της διαφυγής.....	213 -
Εικόνα 6.50. Φωτογραφία όπου φαίνεται το αδρομερές υλικό και τα θραύσματα οργανισμών που βρίσκονται στον πυθμένα.....	214 -
Εικόνα 6.51. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται πολύχαιτοι.....	214 -
Εικόνα 6.52. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται πολύχαιτοι σε ένα αδρόκοκκο πυθμένα.....	214 -
Εικόνα 6.53. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται το είδος <i>polichaeta sabella</i> σε πλήρη ανάπτυξη.....	214 -
Εικόνα 6.54. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται γυμνοβράγχιο να κινείται σε φυτά.....	214 -
Εικόνα 6.55. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών EP5.....	215 -
Εικόνα 6.56. Φωτογραφία από τα πρανή του κρατήρα.....	215 -
Εικόνα 6.57. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται μικρές οπές.....	215 -
Εικόνα 6.58. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες κοραλλιών.....	216 -
Εικόνα 6.59. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες κοραλλιών.....	216 -
Εικόνα 6.60. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών EP6.....	216 -
Εικόνα 6.61. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται έντονες διαφυγές ρευστών.....	217 -
Εικόνα 6.62. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται κροκάλες. Ένα δίθυρο αναπτύσσεται πάνω τους.....	217 -
Εικόνα 6.63. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων (πιθανώς του γένους <i>Leucosolenia</i>) και το κρινοειδές εχινόδερμο <i>Antedon sp.</i> (οικ. Antedonidae).....	217 -
Εικόνα 6.64. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων.....	217 -
Εικόνα 6.65. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων.....	217 -
Εικόνα 6.66. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται το είδος <i>polichaeta sabella</i> σε πλήρη ανάπτυξη.....	217 -
Εικόνα 7.1. Βυθομετρικός χάρτης του κόλπου του Κατακόλου, ο οποίος κατασκευάστηκε με σύνθεση βυθομετρικών δεδομένων και δεδομένων τομογράφου υποδομής του πυθμένα που συλλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.....	224 -
Εικόνα 7.2. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται μία τυπική σεισμοστρωματογραφική διάθρωση των επιφανειακών ιζημάτων στην περιοχή του κόλπου του Κατακόλου.....	225 -
Εικόνα 7.3. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η σεισμοστρωματογραφική διάθρωση στα βάθη νερού <20m στον κόλπο του Κατακόλου.....	225 -
Εικόνα 7.4. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η πιθανή επιφανειακή εμφάνιση των Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων.....	225 -
Εικόνα 7.5. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η παρουσία σεισμοκονιασμένης καταγραφής (ATZ) στα επιφανειακά ιζήματα.....	226 -
Εικόνα 7.6. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η παρουσία η παρουσία σεισμοκονιασμένης καταγραφής (ATZ) και έντονων ανακλάσεων (ER) στα επιφανειακά ιζήματα.....	226 -
Εικόνα 7.7. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η παρουσία έντονων ανακλάσεων (ER) και θυλάκων αερίων (GP) στην επιφανειακή ακολουθία και πλούμων αερίων (GPI) στην υδάτινη στήλη.....	226 -
Εικόνα 7.8. Χάρτης της περιοχής έρευνας στον οποίο έχει αποτυπωθεί ένα κανονικό ρήγμα διεύθυνσης BBA-NNΔ έως B-N και τυπικές σεισμικές τομές 3.5kHz στις οποίες φαίνεται το ρήγμα (P) και η άνοδος των ρευστών κατά μήκος του ρήγματος (βλπ. κείμενο για λεπτομέρειες).....	228 -

Εικόνα 7.9. (α) Μωσαϊκό ηχογραφιών στο λιμένα Κατακόλου όπου σημειώνονται οι περιοχές όπου εντοπίστηκαν διαφυγές ρευστών μετά από ανάλυση των ηχογραφιών, (β) μωσαϊκό ηχογραφιών τμήματος του λιμένα στο οποίο εμφανίζεται πυθμένας με χαμηλή ανακλαστικότητα και ομαλό ανάγλυφο και (γ) μωσαϊκό ηχογραφιών τμήματος του λιμένα στο οποίο εμφανίζεται πυθμένας με χαμηλή ανακλαστικότητα και ανώμαλο ανάγλυφο.....	- 230 -
Εικόνα 7.10. Μωσαϊκό ηχογραφιών νότια του λιμένα Κατακόλου κατά μήκος του ρήγματος διεύθυνσης BBA-NNΔ έως B-N, όπου σημειώνονται οι περιοχές όπου εντοπίστηκαν διαφυγές ρευστών μετά από την ανάλυση των ηχογραφιών.	- 231 -
Εικόνα 7.11. Ηχογραφία ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης (α) αδιόρθωτη με τυπική ενίσχυση σήματος και (β) με μεγάλη ενίσχυση σήματος.....	- 232 -
Εικόνα 7.12. Ηχογραφίες με έντονη ενίσχυση του σήματος στις οποίες φαίνονται πλήθος διαφυγών ρευστών περιφερειακά του κεντρικού μώλου του λιμένα (με γαλάζιο χρώμα απεικονίζεται η υδάτινη στήλη και καφέ χρώμα ο πυθμένας).	- 233 -
Εικόνα 7.13. Ηχογραφίες με έντονη ενίσχυση του σήματος στις οποίες φαίνονται διαφυγές ρευστών πλησίον της επιφανειακής έκφρασης του ρήγματος, σε θέσεις όπου είχαν καταγραφεί πλούσιες αερίων (GPI) στις σεισμικές τομές που συλλέχθηκαν ένα χρόνο πριν (με γαλάζιο χρώμα απεικονίζεται η υδάτινη στήλη και καφέ χρώμα ο πυθμένας).....	- 234 -
Εικόνα 7.14. Χάρτης του Λιμένα στον οποίο σημειώνονται οι θέσεις κατάδυσης και φωτογράφισης των διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα.....	- 235 -
Εικόνα 7.15. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K1 όπου φαίνονται φυσαλίδες αερίων να διαφεύγουν από τον πυθμένα και βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα να έχουν αναπτυχθεί περιφερειακά του σημείου διαφυγής.....	- 235 -
Εικόνα 7.16. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K2, η πρώτη σε στιγμή ηρεμίας, ηρεμίας πριν το σχηματισμό φυσαλίδας και η δεύτερη περίπου 10 δευτερόλεπτα αργότερα όταν μία μεγάλη φυσαλίδα αερίων έχει σχηματιστεί και κινείται ανοδικά. Στη θέση της διαφυγής έχει σχηματιστεί μικρού μεγέθους βακτηριδιακό ινώδες συσσωμάτωμα.....	- 236 -
Εικόνα 7.17. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K3 όπου φαίνονται φυσαλίδες αερίων να διαφεύγουν διαμέσου κενού που έχουν αφήσει ογκόλιθοι. Περιφερειακά του σημείου διαφυγής έχουν σχηματιστεί βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα.....	- 236 -
Εικόνα 7.18. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K4 όπου φαίνονται μικρές φυσαλίδες αερίων να διαφεύγουν από τον πυθμένα.....	- 236 -
Εικόνα 7.19. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K5 όπου φαίνονται μικρές φυσαλίδες αερίων να διαφεύγουν από ένα μικρό κρατήρα στον αμμόδη πυθμένα.....	- 237 -
Εικόνα 7.20. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K6 όπου φαίνονται μικρές φυσαλίδες αερίων να διαφεύγουν από ιλώδη πυθμένα με παρουσία φυτοκάλυψης (<i>P. oceanica</i>).....	- 237 -
Εικόνα 7.21. Χάρτης του κόλπου του Κατακόλου στον οποίο σημειώνονται οι θέσεις μετρήσεων με αισθητήρα μεθανίου και η πορεία του σκάφους που ακολουθήθηκε.....	- 238 -
Εικόνα 7.22. Διάγραμμα διαλυμένου μεθανίου με το χρόνο κατά μήκος της τραβέρσας που παρουσιάζεται στον χάρτη της εικόνας 7.23. Η χρονική περίοδος των μετρήσεων σε κάθε σταθμό σημειώνεται με διαφορετικό χρώμα.....	- 238 -
Εικόνα 7.23. Μέτρηση ροής αερίων με τη μέθοδο του κλειστού θαλάμου στην περιοχή του φάρου.....	- 239 -
Εικόνα 7.24. Διαβρώσεις και βλάβες (α) στο ασφάλτινο κάλυμμα στον προβλήτα του λιμένα και (β) στο κτήριο του τελωνείου, αποτέλεσμα της διαφυγής των αερίων.....	- 240 -
Εικόνα 7.25. Η περιοχή διαφυγών αερίων στην περιοχή του «Φάρου» Κατακόλου.....	- 241 -
Εικόνα 7.26. Διάγραμμα ισοτόπων άνθρακα-υδρογόνου, όπου έχουν τοποθετηθεί τα αποτελέσματα των ισοτοπικών αναλύσεων από την περιοχή του Κατακόλου.....	- 242 -
Εικόνα 7.27. Διάγραμμα 'Bernard' όπου έχουν τοποθετηθεί τα αποτελέσματα των ισοτοπικών αναλύσεων από την περιοχή του Κατακόλου.....	- 242 -
Εικόνα 7.28. Χάρτης του Κατακόλου στον οποίο έχουν αποτυπωθεί οι θαλάσσιες και χερσαίες περιοχές διαφυγών ρευστών σε σχέση με τα κύρια ρήγματα της ευρύτερης περιοχής. (τα ρήγματα στη χέρσο προέρχονται από τους Kamberis et al., 2000a).....	- 245 -
Εικόνα 7.29. Χάρτης του λιμένα Κατακόλου, στον οποίο παρουσιάζεται ο διαχωρισμός της περιοχής σε κελιά διαστάσεων 20x20m και ο αριθμός των διαφυγών κατά μήκος της πορείας του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης σε κάθε κελί.....	- 246 -

- Εικόνα 7.30. Χάρτης του λιμένα Κατακόλου, στον οποίο παρουσιάζεται ο διαχωρισμός της περιοχής σε κελιά διαστάσεων 20x20m και το συνολικό μήκος των πορειών του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης ανά κελί..... - 246 -
- Εικόνα 7.31. Χάρτης του λιμένα Κατακόλου, στον οποίο παρουσιάζεται ο διαχωρισμός της περιοχής σε κελιά διαστάσεων 20x20m και ο αριθμός των διαφυγών σε κάθε κελί. - 247 -

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

1 Εισαγωγή

Από την ανακάλυψη των κρατήρων διαφυγής ρευστών (rockmarks) από την ακτή της Νέας Σκοτίας (King & MacLean 1970) και την τεκμηρίωση των διαφυγών φυσικού αερίου στη Βόρεια Θάλασσα το 1983 (Hovland & Judd, 1988), έχει γίνει όλο και περισσότερο σαφές ότι η μετανάστευση ‘γεωρευστών’ (geofluids) (με κυρίαρχο το μεθάνιο) είναι μια σημαντική γεωλογική διεργασία. Στις τελευταίες τρεις δεκαετίες, ένας πλούτος στοιχείων έχει δείξει ότι τα διάφορα χαρακτηριστικά γνωρίσματα καταδεικνύουν τη μετανάστευση ρευστών στα ηπειρωτικά περιθώρια. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως οι συσσωρεύσεις αερίου στα επιφανειακά ιζήματα, οι κρατήρες διαφυγής ρευστών, οι διαφυγές ρευστών από τον θαλάσσιο πυθμένα, τα λασπούχα ηφαίστεια και οι υδρίτες (gas hydrates), που συνδέονται συχνά με μεθανοτροφικές βιοκοινότητες και μεθανογενή – αυθιγενή ασβεστιτικά ορυκτά (authigenic methane-derived carbonates), είναι παρόντα σε μια ευρεία ποικιλία γεωγραφικών, ωκεανογραφικών και γεωλογικών περιβαλλόντων: στο παράκτιο περιβάλλον, στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα και στις ωκεάνιες λεκάνες.

Η μελέτη των διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα είναι σημαντική καθώς αποτελεί μία γεωλογική διεργασία, η οποία απαντάται σχεδόν σε όλα τα γεωλογικά περιβάλλοντα και συνδέεται (Judd and Hovland, 2007):

- με ορυκτές πρώτες ύλες: Οι διαφυγές ρευστών βρίσκονται συχνά σε πετρελαϊκά πεδία και αποτελούν μία ένδειξη παρουσίας πετρελαίου και φυσικού αερίου (Link, 1952). Επίσης συνδέονται με τους υδρίτες, οι οποίοι είναι συσσωρεύσεις φυσικού αερίου στα ιζήματα με τη μορφή κρυσταλλών πάγου. Οι κρυσταλλοί αποτελούνται από νερό και αέριο, όπου τα μόρια των αερίων έχουν παγιδευτεί στο πλέγμα των μορίων υδρογόνου του νερού. Οι κρυσταλλοί (υδρίτες) είναι σταθεροί σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης σε περιβάλλοντα με επαρκείς ποσότητες νερού και αερίου. Οι συνθήκες αυτές εντοπίζονται στο θαλάσσιο περιβάλλον σε βάθη μεγαλύτερα από 300-500m. Ο υπολογισμός των παγκόσμιων αποθεμάτων υδριτών έχει δείξει ότι μπορεί να περιέχουν διπλάσια αποθέματα ορυκτών πρώτων υλών από αυτά που αρχικώς είχαν εκτιμηθεί (Kvenvolden, 2000; Milkov and Sassen, 2003).
- με τοπικές μεταβολές στη θαλάσσια οικολογία: οι διαφυγές ρευστών φαίνεται να σχηματίζουν ένα ιδιαίτερο οικολογικό περιβάλλον τόσο σε ρηχά περιβάλλοντα όπου παρατηρείται αυξημένη βιολογική δραστηριότητα (Hovland and Thomsen, 1989; Hovland and Judd, 1988) όσο και σε βαθειά περιβάλλοντα όπου έχουν εντοπιστεί μεγάλες βιοκοινωνίες σε βάθη νερού όταν σε περιοχές που δεν υπάρχουν διαφυγές ρευστών η βιολογική δραστηριότητα είναι ελάχιστη (Sibuet and Olu, 1998).
- με καταστροφικά φαινόμενα: η παρουσία αέριας φάσης στα ρευστά των πόρων των ιζημάτων μπορεί να προκαλέσει κατολισθήσεις οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν κατασκευές όπως λιμενικές εγκαταστάσεις, υποθαλάσσια καλώδια και αγωγούς, πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου, - *διαφυγές ρευστών έχουν καταστρέψει πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου* - (Bryant and Roemer, 1983), ενώ μπορούν να προκαλέσουν ναυάγια όπως στο τρίγωνο των Βερμούδων (McIver, 1982) και στην περιοχή Witch's Hole στη βόρεια θάλασσα όπου ναυάγια έχουν αποδοθεί σε μεγάλες διαφυγές ρευστών (αέριων υδρογονανθράκων) (Judd, 1990; Judd and Hovland, 2007).
- με τη σεισμικότητα: αυξημένες διαφυγές ρευστών έχουν καταγραφεί μετά από μεγάλους σεισμούς ως επακόλουθο των σεισμών αλλά και πριν από μεγάλους σεισμούς που μπορεί να καταδεικνύουν το φαινόμενο ως πρόδρομο των σεισμών (Field and Jennings, 1987; Soter, 1999; Hasiotis et al., 1996) .
- με το φαινόμενο του θερμοκηπίου: το κυρίαρχο ρευστό που διαφεύγει από τον πυθμένα είναι το μεθάνιο, το οποίο είναι από τα σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου (Ehhalt et al., 2001; Houghton, 2005).

Με τον όρο *διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα (seabed fluid flow)* περιγράφονται διαφυγές αερίων και υγρών από τον πυθμένα και την υποδομή του προς την υδάτινη στήλη και στην περίπτωση των αερίων ακόμη και προς την ατμόσφαιρα (Judd and Hovland, 2007).

Με τον όρο *κρατήρες διαφυγής ρευστών (rockmarks)* περιγράφονται τοπογραφικά βυθίσματα στον πυθμένα της θάλασσας, συνήθως κυκλικού ή ελλειπτικού σχήματος, τα οποία σχηματίστηκαν από την συνεχή ή διακοπτόμενη διαφυγή ρευστών από τα ιζήματα προς την υδάτινη στήλη, τα οποία κατά τη διαδρομή τους έχουν συμπαρασύρει τα ιζήματα δημιουργώντας δομές διάβρωσης. Ο όρος κρατήρες είναι γνωστός από την ηφαιστειολογία περιγράφοντας αρνητικές τοπογραφικές δομές στα ηφαίστεια, αλλά επιπλέον περιγράφει γεωμορφές που σχηματίστηκαν από την πτώση μετεωριτών στην επιφάνεια της γης και άλλων πλανητών. Παρόλο που ο όρος κρατήρες διαφυγής ρευστών μπορεί να μην περιγράφει ακριβώς τον όρο rockmarks (σημάδια ευλογιάς – «βλογιοκομμένος» πυθμένας) θεωρήθηκε ως ο πιο κατάλληλος όρος απόδοσης στην ελληνική γλώσσα. Επίσης κρίθηκε σκόπιμο η αλλαγή του πρώιμου όρου *κρατήρες διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων* (Παπαθεοδώρου κα, 1995) καθώς σύμφωνα με τις νέες αντιλήψεις οι κρατήρες διαφυγής στον πυθμένα της θάλασσας σχηματίζονται από διάφορα γεω-ρευστά (geofluids) και όχι μόνο από αέριους υδρογονάνθρακες.

Διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα της θάλασσας ήταν γνωστές και αναφέρονται σε αρχαία κείμενα όπως:

- Ο Έλληνας γεωγράφος Στράβων στα Γεωγραφικά αναφέρει μία υποθαλάσσια πηγή, 4 χιλιόμετρα ανοιχτά της Λαοδίκειας (σημερινή Λατίκεια στη Συρία), κοντά στο νησί Άραδος. Νερό από αυτή την πηγή συλλέγονταν από βάρκες, χρησιμοποιώντας μολυβδόχα χωνιά και δερμάτινους ασκούς, και μεταφέρονταν στην πόλη ως πηγή φρέσκου γλυκού νερού.

16.2.13

Prokeitai d' h(āradōj rāxiwōuj tinoj kaiia) i-
neū parā iaj metacūtou-te ēpineigu aūthj- nāl'ista
kaiithj- Marađou, diekousa thj- ghj- stadiguj eiāiosin
eāti de'pēra perigl'ustoj oāon epta'tōh kucl on sta-
digun, pl h'rhj katoikiāj: tosau'v d' euandriē kexrhtai
nētri kaiinua wōte pol uorōuj oikousi ta) oikiāj.
eātisan d' aūthh fugadej, wōfasin ek Sidwōj: thh
d' uōreign thh mek ek twōtoh briğun kaiil akkaign uōa/
twn eāousi thh d' ek thj- peraigj: ēh de'toij pol eōiuj
ek tou-pōrou mikroh prōthj- pō'ewj uōreuōntai ph-

ghh eāontoj a'jōrou uōatoj, eij hā perikatastre-
tai kl i'ganōj kaqeqej ajpōtou-uōreuonērou skafōuj,
nol i'bouj, eujuōtonoj, eij puqnera sunhgnēoj ste-
nōh eāonta trhea nētrion, t%de'puqneri perie/
sfigktai swl hō sku'zinoj, eiāe aākwna deil' egein, o/
dexōnēoj to'ajnaql ibōtenon ek thj- phghj- dia'tou-kl i-
ba'rou uōur. to'nēh ouā prwōtan a'jaql ibek to'th-
qal a'zhj ēstiz perimeigantej de'thō tou-kaqarou-kaii
potigrou uōatoj rōsin, upōl ambarōusin eij a'jgeiā
pareskeuasnera oāon a'ā de'w, kaiipōqneuōusin eij
thh pō'lin

- Ο Πλίνιος ο Πρεσβύτερος αναφέρει την ύπαρξη υποθαλάσσιων πηγών που αναβλύζουν γλυκό νερό σαν να προέρχεται από αγωγούς κατά μήκος των ακτών του Εύξεινου Πόντου

Οι διαφυγές πετρελαιοειδών χρησιμοποιούνταν από τον άνθρωπο πολύ πριν την εξόρυξη του πετρελαίου. Οι ιθαγενείς της Αμερικής στην Καλιφόρνια χρησιμοποιούσαν 'άσφαλτο' για

τη στεγανοποίηση των βαρκών τους, για τη συγκόλληση των όπλων, για το βάψιμο του προσώπου τους. Οι 'αθάνατες φλόγες' των φυσικών διαφυγών από λασπούχα ηφαίστεια στο Αζερμπαϊτζάν αποτελούν το κέντρο της ζωοαστρικής θρησκείας. Επίσης οι διαφυγές ρευστών αποτελούν την πρώτη ένδειξη παρουσίας πετρελαίου, σύμφωνα με τον Link (1952) τουλάχιστον τα μισά αποθέματα που ήταν γνωστά εκείνη την εποχή προέρχονταν από γεωτρήσεις σε περιοχές με διαφυγές ρευστών ή κοντά σε αυτές. Οι διαφυγές πετρελαιοειδών δεν περιορίζονται μόνοι στη ξηρά. Οι Ρωμαίοι εντοπίζοντας κομμάτια πίσσας στην Νεκρά θάλασσα την ονόμασαν *Mare Asphalticum*, οι πρώτοι θαλασσοπόροι στον κόλπο του Σουέζ, στον κόλπο του Μεξικό, στις ακτές της Καλιφόρνια ανακάλυψαν κηλίδες πετρελαίου και ακτές μολυσμένες με πίσσα πολύ πριν την ίδρυση της βιομηχανίας πετρελαιοειδών και την κίνηση των πλοίων με πετρέλαιο (MacDonald, 1998).

Στον ελληνικό χώρο η πρώτη σύγχρονη αναφορά για διαφυγές ρευστών προέρχεται από τον Γάλλο γεωγράφο Pouqueville (1826) ο οποίος αναφέρει ότι κατά τη διάρκεια ενός σεισμού στην περιοχή του Αιγίου στις 23 Αυγούστου 1817, το ακρωτήριο Αλυκή καλύφθηκε από νερό μετά από ένα τσουνάμι που ακολούθησε το σεισμό, και το νερό ξαφνικά έγινε πολύ ζεστό. Ο Mallet (1854) συμπληρώνει πως στην περιοχή Βοστίτσα το θαλασσινό νερό έγινε τόσο θερμό ώστε να καίει τα χέρια των ψαράδων και φουσαλίδες μαζί με καπνό βγήκαν στην επιφάνεια της θάλασσας. Ο Γερμανός γεωλόγος von Rath (1882) κατέγραψε ένα πολύ ενδιαφέρον φαινόμενο σε επίσκεψή του στο Αιτωλικό τον 19^ο αιώνα. Ο von Rath περιγράφει «.....Κατά τη διάρκεια μιας νυχτερινής καταιγίδας την 15^η προς 16^η Δεκεμβρίου 1881, οι κάτοικοι του Αιτωλικού αισθάνθηκαν σεισμικές δονήσεις ενώ κάποιοι άλλοι ξύπνησαν πανικόβλητοι εξαιτίας ενός πνιγηρού αερίου το οποίο θα τους προκαλούσε ασφυξία αν δεν φυσούσε δυνατός άνεμος. Την επόμενη το πρωί, τα ψάρια του Αιτωλικού κολυμπούσαν προς τα ρηχά ενώ για μέρες μετά, οι κάτοικοι μπορούσαν εύκολα να τα συλλάβουν με γυμνά χέρια. Η έκλυση του αερίου μαύρισε όλα τα ασημένια σκεύη στο Αιτωλικό, κατέστρεψε τα λουλούδια στους κήπους ενώ το νερό της λιμνοθάλασσας παρέμεινε γαλακτώδες για αρκετό διάστημα». Ο ίδιος παρατηρητής σημειώνει ότι έκλυση αερίου επανεμφανίστηκε την 13^η Ιανουαρίου 1882 συνοδευόμενη από σεισμική δραστηριότητα και ασυνήθιστες κινήσεις των ψαριών.

Τα τελευταία τριάντα χρόνια πλήθος ερευνών έχουν καταγράψει φαινόμενα που σχετίζονται με διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα της θάλασσας. Κρατήρες διαφυγής ρευστών έχουν καταγραφεί στον Πατραϊκό κόλπο, στην παράκτια ζώνη της Πάτρας όπου και εντοπίζεται ένα πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών, το οποίο φαίνεται να ενεργοποιήθηκε μετά από ένα ισχυρό σεισμό (Hasiotis et al., 1996). Στον Δυτικό κορινθιακό κόλπο, 2km βόρεια από τα Βαλιμίτικα Αιγίου εντοπίστηκε μία αλυσίδα μικρών κρατήρων διαφυγής ρευστών, που

σχετίζεται με την υποθαλάσσια έκφραση του ρήγματος του Αιγίου (Soter, 1999). Επίσης δυτικότερα, στον Όρμο του Ελαιώνα, καταγράφηκαν μεγάλοι κρατήρες και διαφυγές ρευστών στην υδάτινη στήλη που αποδόθηκαν από τον Soter (1999) σε διαφυγές αερίων. Στη λιμνοθάλασσα του Αιτωλικού καταγράφηκαν πολλοί μικροί κρατήρες διαφυγής ρευστών οι οποίοι είτε είναι κυκλικοί είτε σχηματίζουν αλυσίδες, ενώ καταγράφηκαν και έντονες ανακλάσεις στην υδάτινη στήλη που αποδόθηκαν σε διαφυγές αερίων (Παπαθεοδώρου κ.α., 2001), που πιθανώς να σχετίζονται με καταστροφικά γεγονότα που περιγράφηκαν από τον von Rath (1882). Στον κόλπο του Πρίνου, βόρεια της Θάσου καταγράφηκαν μικροί κρατήρες διαφυγής ρευστών, σε τέσσερις εκ των οποίων η οπτική παρατήρηση έδειξε την απουσία φυτοκάλυψης εντός των κρατήρων σε μία περιοχή γεμάτη από λιβάδια ποσειδώνιας. Σύμφωνα με τον Newton (1980) οι κρατήρες του κόλπου του Πρίνου σχηματίστηκαν από διαφυγές γλυκού νερού, αλλά η παρουσία θερμογενών αερίων που βρέθηκαν σε γεωτρήσεις στην περιοχή δεν μπορεί να αποκλείσει τη συμβολή των αερίων στο σχηματισμό των κρατήρων. Διαφυγές αερίων από τον πυθμένα της θάλασσας στην περιοχή του Κατακόλου έχουν αναφερθεί από τους Kamberis et al., (2000a) χωρίς όμως η περιοχή να έχει ερευνηθεί λεπτομερώς.

Η παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα ιζήματα έχει αναφερθεί στην υφαλοκρηπίδα των Σποράδων όπου αέρια βρέθηκαν στα πρώτα 70 - 80 m των ιζημάτων. Σηλοειδείς διαταράξεις δείχνουν μία κάθετη μετανάστευση των αερίων από βαθύτερα στρώματα, ενώ καταγραφές ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης από τη βόρεια πλευρά της λειάνης των Σποράδων δείχνουν ενεργά ρήγματα που συνδέονται με διαφυγές αερίων (Papatheodorou et al., 1993). Στη δυτική Ελλάδα, διαφυγές ρευστών εντοπίστηκαν στη θαλάσσια περιοχή μεταξύ Κέρκυρας-Ηγουμενίτσας. Τα αέρια πιθανώς θερμογενούς προέλευσης διαφεύγουν περιφερειακά ενός αλατούχου δόμου ο οποίος έχει αναδυθεί μέχρι την επιφάνεια του πυθμένα (Papatheodorou et al., 1993). Στον Αμβρακικό κόλπο το όριο Πλειστόκαινου / Ολόκαινου φαίνεται να είναι ένας ορίζοντας που συγκεντρώνει αέρια, όπως δείχνει η ισχυρή ανακλαστικότητα του, αν και δεν μπορεί να συγκρατεί πάντα τις κάθετες μεταναστεύσεις των αερίων. Έτσι, στις σεισμικές καταγραφές παρατηρούνται συγκεντρώσεις αερίων στα Ολοκαινικά ιζήματα και διαφυγές αερίων στην υδάτινη στήλη που μεταναστεύουν κυρίως κατά μήκος των επιπέδων των ρηγμάτων. Επιπλέον σε αυτόν τον κόλπο εντοπίστηκαν οι μοναδικοί «θαμμένοι» κρατήρες που έχουν καταγραφεί μέχρι σήμερα στο θαλάσσιο περιβάλλον της Ελλάδος (Papatheodorou et al., 1993). Στον Πατραϊκό κόλπο το όριο Ολοκαινού/Πλειστοκαινού φαίνεται να είναι ένας ορίζοντας συγκέντρωσης αερίων υδρογονανθράκων (Chronis et al., 1991; Papatheodorou et al., 1993), καθώς επίσης και

ιζήματα με παρουσία αερίων καταγράφηκαν στα δέλτα των ποταμών Μόρνου, Εύηνου και Πείρρου που εκβάλλουν στον κόλπο (Λυκούσης, 1989). Η παρουσία αερίων υδρογονανθράκων σε σύγχρονα δελταϊκά ριπίδια έχει επίσης καταγραφεί στα δέλτα των ποταμών Αλιάκμονα, Αζιού και Πηνειού στο Θερμαϊκό κόλπο, στα δέλτα του Λούρου και του Άραχθου στον Αμβρακικό κόλπο και στο δέλτα του Αωού στον Ιόνιο πέλαγος (Paratheodorou et al., 1993; Lykousis et al., 2009). Επίσης μία αλυσίδα βυθισμάτων έχει σχηματιστεί στην κατωφέρεια της Κυλλήνης στη Δυτική Ελλάδα, που έχουν αποδοθεί σε κρατήρες διαφυγής ρευστών (Hasiotis et al., 2002; 2005). Οι κρατήρες αυτοί πιθανόν να έχουν σχηματιστεί από διαφυγές θερμογενών αερίων, που έχουν εντοπιστεί και στην παράκτια περιοχή (Etiope et al., 2006).

Διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα της θάλασσας που σχετίζονται με σεισμική δραστηριότητα στον ελληνικό χώρο έχουν αναφερθεί από τους: (i) Rouquerville (1826) και Mallet (1854) στον σεισμό του Αιγίου το 1817, (ii) τον Ναύαρχο Α. Μιαούλη στους σεισμούς του Αμβρακικού κόλπου το 1847 και 1865, (iii) τους Hasiotis et al., (1996) στον σεισμό της Πάτρας το 1993 και (v) τον Soter (1999) στο σεισμό του Αιγίου το 1995.

Από τις περιοχές όπου έχουν αναφερθεί διαφυγές ρευστών στον ελληνικό χώρο επιλέχθηκαν τρεις περιοχές όπου μελετήθηκαν τα ρευστά που διαφεύγουν και η σχέση τους με τις γεωμορφές που σχηματίζουν (εικόνα 1.1). Συγκεκριμένα μελετήθηκε η φύση και ο χημισμός των ρευστών που διαφεύγουν, ο ρυθμός διαφυγής ρευστών προς την υδάτινη στήλη, οι μηχανισμοί πυροδότησης των διαφυγών και οι γεωμορφές που σχηματίζουν, η επίδραση τους στις τοπικές θαλάσσιες βιοκοινωνίες και στην ατμόσφαιρα. Οι περιοχές είναι:

- το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών στο ΝΑ τμήμα του Πατραϊκού κόλπου στην παράκτια ζώνη της Πάτρας,
- το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών στον Όρμο του Ελαιώνα στο νότιο περιθώριο του Δυτικού Κορινθιακού κόλπου και
- η περιοχή του Κατακόλου.

Η ιστορική και η σύγχρονη, ενόργανα καταγεγραμμένη, σεισμικότητα επιβεβαιώνουν ότι οι περιοχές του Πατραϊκού και του Δυτικού Κορινθιακού κόλπου αποτελούν μια από τις περισσότερες ενεργές περιοχές στο κόσμο (Papazachos & Papazachou 1989) (εικόνα 1.2). Η περιοχή του Κατακόλου βρίσκεται μεταξύ δύο περιοχών με έντονη σεισμικότητα, την περιοχή καταβύθισης της Αιγιακής μικροπλάκας δυτικά και την λεκάνη του Πύργου βορειοανατολικά (εικόνα 1.3).

Εικόνα 1.1. Χάρτης της Ελλάδας όπου φαίνονται οι περιοχές που έχει αναφερθεί η παρουσία κρατήρων διαφυγής ρευστών, διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα και αέριοι υδρογονάνθρακες στα επιφανειακά ιζήματα. Επίσης σημειώνονται (κόκκινα βέλη) οι περιοχές μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Εικόνα 1.2. Χάρτης σεισμικών επικέντρων στον Πατραϊκό και Δυτικό Κορινθιακό κόλπο από το 1900 έως σήμερα (M = τοπικό μέγεθος, πηγή Γεωδυναμικό Ινστιτούτο) (ευγενική προσφορά του Επίκουρου Καθηγητή Ε. Σώκου).

Εικόνα 1.3. Χάρτης σεισμικών επικέντρων στην ευρύτερη περιοχή του Κατακόλου από το 1900 έως σήμερα (M = τοπικό μέγεθος, πηγή Γεωδυναμικό Ινστιτούτο) (ευγενική προσφορά του Επίκουρου Καθηγητή Ε. Σώκου).

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από οχτώ κεφάλαια. Πέραν του εισαγωγικού κεφαλαίου, στο κεφάλαιο 2 ‘*Διαφυγές ρευστών από το θαλάσσιο πυθμένα*’ δίνεται αρχικά μία συνοπτική περιγραφή των ρευστών που διαφεύγουν από τον πυθμένα της θάλασσας και η προέλευση τους, στη συνέχεια περιγράφονται οι μέθοδοι ανίχνευσης, άμεσες και έμμεσες, ακολουθούν οι παράγοντες που μπορεί να πυροδοτήσουν διαφυγές. Αναλύεται η σχέση των διαφυγών ρευστών με το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τέλος γίνεται μία περιγραφή της παγκόσμιας εξάπλωσης των διαφυγών. Επίσης στο Παράρτημα II γίνεται μία περιγραφή των

περιβαλλόντων όπου εντοπίζονται διαφυγές και δίνονται οι περιοχές σε παγκόσμιο κλίμακα όπου έχουν αναφερθεί διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα της θάλασσας και συνοδές γεωμορφές. Στο κεφάλαιο 3 *‘Περιοχές Μελέτης – Γεωλογική Επισκόπηση’* παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια φυσιογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά των τριών περιοχών μελέτης, του Πατραϊκού κόλπου, του Δυτικού Κορινθιακού κόλπου και του κόλπου του Κατακόλου. Στο κεφάλαιο 4 *‘Μεθοδολογία’* περιγράφονται οι μέθοδοι έρευνας και ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορική διατριβής και στο Παράρτημα Ι δίνεται ένα χρονικό των ερευνών που πραγματοποιήθηκαν. Στο κεφάλαιο 5 *‘Πατραϊκός κόλπος’* περιγράφεται αρχικά το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών και παρουσιάζονται οι ενδείξεις που συνηγορούν στην ενεργότητα του, τόσο μετά από δύο μεγάλα σεισμικά γεγονότα με γεωφυσική διασκόπηση, όσο και με επί τόπου μετρήσεις διαφυγών ρευστών σε δύο στάδια: το πρώτο μικρής διάρκειας μετρήσεις και το δεύτερο με την πρώτη σε παγκόσμιο επίπεδο παρακολούθηση της ενεργότητας ενός κρατήρα διαφυγής ρευστών, που διήρκησε περισσότερο από 6 μήνες. Τέλος δίνονται τα αποτελέσματα των ερευνών για διαφυγές ρευστών στην παράκτια ζώνη της Πάτρας, και γίνεται μία εκτίμηση της ποσότητας μεθανίου που εκλύεται από την παράκτια ζώνη της Πάτρας. Στο κεφάλαιο 6 *‘Δυτικός Κορινθιακός Κόλπος – Όρμος του Ελαιώνα’* περιγράφεται το πεδίο διαφυγής ρευστών στον Όρμο του Ελαιώνα. Παρουσιάζονται επί τόπου μετρήσεις διαφυγών, οι οποίες ανέδειξαν ένα διαφορετικό καθεστώς, καθώς οι κρατήρες διαφυγής ρευστών φαίνεται να σχηματίζονται από την εκφόρτιση του υδροφόρου ορίζοντα. Τέλος δίνεται ένα πλούσιο φωτογραφικό υλικό που παρουσιάζει την ιδιαίτερη οικολογία των κρατήρων. Στο κεφάλαιο 7 *‘Κόλπος του Κατακόλου’* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο της υποθαλάσσιας όσο και της χερσαίας έρευνας που καταδεικνύουν ίσως ότι στην περιοχή συμβαίνουν οι πιο ισχυρές διαφυγές ρευστών στο ελληνικό χώρο. Στο κεφάλαιο 8 *‘Συμπεράσματα’* δίνεται η σύνθεση των αποτελεσμάτων της παρούσας διδακτορικής διατριβής ενώ επισημαίνονται και οι μελλοντικές έρευνες που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν στις παρούσες περιοχές. Τέλος στο ένατο κεφάλαιο γίνεται παράθεση της χρησιμοποιούμενης βιβλιογραφίας.

Κεφάλαιο 2^ο

Διαφυγές ρευστών από το θαλάσσιο πυθμένα

2 Διαφυγές ρευστών από το θαλάσσιο πυθμένα

2.1 Φύση και προέλευση των ρευστών

Το μεθάνιο είναι το πιο σημαντικό αέριο (ρευστό) που διαφεύγει από τον πυθμένα των θαλασσών, αλλά δεν είναι το μοναδικό. Τα ρευστά που διαφεύγουν από τον πυθμένα σύμφωνα με γεωλογικά κριτήρια είναι:

- τα θερμά ρευστά που περιλαμβάνουν τα μαγματικά και ηφαιστειακά ρευστά και τα γεωθερμικά ρευστά, τα οποία σχετίζονται με μαγματική και ηφαιστειακή δραστηριότητα (θερμές διαφυγές)
- οι αέριοι υδρογονάνθρακες μικροβιακής και θερμογενούς προέλευσης που σχετίζονται με τα θαλάσσια/λιμναία ιζήματα (ψυχρές διαφυγές)
- το γλυκό νερό (υποθαλάσσιες εκφορτίσεις-αναβλύσεις)

Η παρούσα διατριβή περιορίζεται στις ψυχρές διαφυγές (cold seeps) που περιλαμβάνουν τους αέριους υδρογονάνθρακες και το γλυκό νερό τα οποία είναι πιθανόν να διαφεύγουν ταυτόχρονα από τις ίδιες θέσεις και τα οποία αναλύονται παρακάτω.

2.1.1 Αέριοι Υδρογονάνθρακες

2.1.1.1 Βιογενείς υδρογονάνθρακες

Οι ζώντες οργανισμοί έχουν πού μεγάλη συνεισφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον και πως αυτό λειτουργεί, τόσο πάνω όσο και κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, κατά τη διάρκεια της ζωής τους και μετά το θάνατό τους. Στις διαφυγές ρευστών, τα μικρόβια είναι αυτά που παίζουν σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό αέριων υδρογονανθράκων. Η πρώτη διεργασία είναι η φωτοσύνθεση, μέσω της οποίας υπάρχει η θαλάσσια βιόσφαιρα, η οποία με τη σειρά της τροφοδοτεί τον πυθμένα με οργανικό υλικό που αποικοδομείται, αρχικά μέσω των μικροβίων και στη συνέχεια μέσω της θερμικής αποικοδόμησης δημιουργώντας μεθάνιο και άλλους αέριους υδρογονάνθρακες που επιστρέφουν στον πυθμένα (διαφυγές ρευστών) (Judd and Hovland, 2007, Floodgate and Judd, 1992, Whiticar et al., 1986).

Αρχικά στην ευφωτική ζώνη λαμβάνει χώρα η διεργασία της φωτοσύνθεσης, όπου κυρίως το φυτοπλαγκτόν και στα ρηχά τα θαλάσσια φυτά απορροφούν την ηλιακή ενέργεια δημιουργώντας γλυκόζη από το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα του νερού των θαλασσών:

Στη συνέχεια η γλυκόζη πολυμερίζεται από τους οργανισμούς δημιουργώντας οργανικές αλυσίδες που καλούνται βιο-πολυμερή.

Το φυτοπλαγκτόν αποτελεί την αρχή της τροφικής αλυσίδας στο θαλάσσιο περιβάλλον (εικόνα 2.1). Το μεγαλύτερο μέρος οργανικού υλικού που προέρχεται από το θάνατο των οργανισμών οξειδώνεται μέσα στην υδάτινη στήλη. Ένα μέρος όμως βυθίζεται στον πυθμένα. Ένα μέρος αυτού του οργανικού υλικού προσλαμβάνεται από βενθικούς οργανισμούς (όπως οι νηματοείδες) και το εναπομένον οργανικό υλικό εισέρχεται μέσα στα ιζήματα, όπου ξεκινάει η αποικοδόμηση του. Κατά τη διάρκεια της αποικοδόμησης τα πολύπλοκα βιο-πολυμερή που δημιουργήθηκαν στην τροφική αλυσίδα αποσυναρμολογούνται με τη δράση μικροβίων, δημιουργώντας μικρότερες αλυσίδες. Έτσι οι πολυσακχαρίτες μετατρέπονται σε μονοσακχαρίτες, οι πρωτεΐνες σε αμινοξέα, τα λιπίδια σε λιπιδικά οξέα, και αυτά με τη σειρά τους σε πιο απλές μορφές αλκοολών και οξέων (Floodgate and Judd, 1992).

Στα επιφανειακά ιζήματα κοντά στον πυθμένα η μικροβιακή αποικοδόμηση του οργανικού υλικού γίνεται με την παρουσία του οξυγόνου. Το οξυγόνο προέρχεται από την κυκλοφορία του νερού μέσα στα ιζήματα που υποβοηθάται από τη βιο-αναμόχλευση. Όταν η ποσότητα του οργανικού υλικού είναι μεγάλη, απαιτείται πολύ οξυγόνο για την αποικοδόμηση, ενώ όταν το οξυγόνο εξαντληθεί χρησιμοποιούνται άλλοι οξειδωτικοί παράγοντες για να ενεργοποιήσουν το μικροβιακό μεταβολισμό και την διάσπαση των ανθρακικών ενώσεων, οι οποίοι (είναι) σε

σειρά σπουδαιότητας είναι: το SO_4^{2-} , το NO_3^- , το NO_2^- , τα οξείδια του σιδήρου και του μαγγανίου. Όσο κατεβαίνουμε μέσα στο ίζημα, οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν προοδευτικά τον οξειδωτικό παράγοντα που χρειάζονται. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία οριζόντων, ο κάθε ένας χαρακτηρίζεται από διαφορετικό οξειδωτικό παράγοντα. Έτσι οι αερόβιοι οργανισμοί δίνουν τη θέση τους στα θειικά βακτήρια (sulfate-reducing bacteria – BRS). Η δραστηριότητάς τους δίνεται στην παρακάτω σχέση (Curtis, 1983):

Εικόνα 2.1. Κύκλος της τροφικής αλυσίδας στο θαλάσσιο περιβάλλον (τροποποίηση από Judd and Hovland, 2007).

Όταν με τη σειρά του η προσφορά θεικών αλάτων εξαντληθεί, ξεκινάει η δράση των μεθανογενών (μικροοργανισμοί παραγωγής μεθανίου). Στην εικόνα 2.2 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες κατανομές των συγκεντρώσεων των θεικών και του μεθανίου που αντιστοιχούν στις περιοχές δράσης των θεικών και των μεθανογενών μικροοργανισμών καθώς και οι περιοχές σχηματισμού και συγκέντρωσης φυσαλίδων μεθανίου στο ίζημα.

Εικόνα 2.2. Κατακόρυφες κατανομές συγκεντρώσεων μεθανίου και θειικών στο ιζήμα και περιοχές σχηματισμού φυσαλίδων μεθανίου, SMTZ ζώνη μετάβασης μεθανίου – θειικών, (1)CH₄ –(2)CH₄ υψηλή και μικρή παραγωγικότητα μεθανίου αντίστοιχα (τροποποίηση από Whiticar, 2002).

2.1.1.1.1 Μικροβιακό μεθάνιο

Η μεθανογένεση πραγματοποιείται από τα μεθανογενή μικρόβια 'archaea' (εικόνα 2.3), τα οποία ζουν σε αναερόβιες συνθήκες. Ζουν σε μεγάλο εύρο θερμοκρασιών, κυρίως από 4-55°C αλλά υπάρχουν και είδη που επιβιώνουν σε θερμοκρασία έως 97 °C (Wiese and Knevel, 1993). Εκτός από τα θαλάσσια ιζήματα μεθανογενή *archaea* βρίσκονται σε έλη, σε λιμναία ιζήματα, στα εδάφη, σε βιολογικές λάσπες. Στον πίνακα δίνονται τα κυριότερα αναγνωρισμένα *archaea*.

Πίνακας 2.1. Τα κυριότερα μεθανογενή *archaea* και η μορφή τους.

Μεθανογενή Archaea	Είδη	Μορφή	Μεθανογενή Archaea	Είδη	Μορφή
<i>Methanobacterium</i>	19	Μακριές ράβδοι	<i>Methanocorpusculum</i>	5	Ανώμαλοι κόκκοι
<i>Methanobrevibacter</i>	7	Κοντές ράβδοι	<i>Methanoculleus</i>	6	Ανώμαλοι κόκκοι
<i>Methanosphaera</i>	2	Κοκκώδης	<i>Methanosarcina</i>	8	Ανώμαλοι κόκκοι σε ομάδες
<i>Methanothermus</i>	2	Ράβδοι	<i>Methanobolus</i>	8	Ανώμαλοι κόκκοι σε ομάδες
<i>Methanococcus</i>	11	Ανώμαλοι κόκκοι	<i>Methanohalobium</i>	1	Ανώμαλοι κόκκοι
<i>Methanomicrobium</i>	2	Κοντές ράβδοι	<i>Methanococoides</i>	2	Ανώμαλοι κόκκοι
<i>Methanogenium</i>	11	Ανώμαλοι κόκκοι	<i>Methanobrix</i>	4	Ραβδοειδής
<i>Methanospirillum</i>	1	Σπειροειδής	<i>Methanopyrus</i>	1	Ραβδοειδής σε αλυσίδες
<i>Methanoplanus</i>	3	Πλακοειδής

Εικόνα 2.3. Φωτογραφίες μεθανογενών *archaea* στο μικροσκόπιο.

Για το σχηματισμό υδρογονάνθρακων τα *archaea* χρησιμοποιούν έναν περιορισμένο αριθμό οργανικών ενώσεων. Οι πιο σημαντικές από αυτές τις ενώσεις είναι: το διοξείδιο του άνθρακα, το οξικό οξύ, το μυρμηγκικό οξύ, η μεθανόλη και οι μεθυλαμίνες, που έχουν προέλθει από προηγούμενα σταδία αποικοδόμησης και ζύμωσης των οργανικών αλυσίδων.

Η κυριότερη διεργασία είναι αυτή της αναγωγής του διοξειδίου του άνθρακα όπως περιγράφεται από την αντίδραση:

Το μυρμηγκικό οξύ μεταβολίζεται από τα περισσότερα μεθανογενή *archaea*. Πρώτα οξειδώνεται σε CO_2 και H_2 με τη βοήθεια του ενζύμου formate dehydrogenase:

και στη συνέχεια το CO_2 (2.4) ανάγεται σε μεθάνιο σύμφωνα με την εξίσωση (2.3).

Η οικογένεια *Methanosarcinaceae* είναι η πιο πολύπλευρη όσον αφορά την ποικιλία των υποστρωμάτων που χρησιμοποιούν, αφού μπορούν να σχηματίσουν μεθάνιο από οξικό οξύ, μεθανόλη και μεθυλαμίνες. Το μεθάνιο προέρχεται από την αναγωγή του μεθυλίου. Αν το υπόστρωμα είναι οξικό οξύ έχουμε ταυτόχρονη απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα από το καρβοξύλιο.

Το CO_2 της αντίδρασης (2.5) μπορεί να αναχθεί σε μεθάνιο με βάση την αντίδραση (2.1).

Οι Whiticar et al. (1986); Whiticar (1999) πρότειναν ότι η αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα είναι η κύρια διεργασία σχηματισμού μεθανίου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Αντίθετα στα λιμναία ιζήματα η ζύμωση του οξικού οξέος μέσω βακτηρίων αποτελεί το κυριότερο παράγοντα σχηματισμού μεθανίου. Αυτό αποδίδεται στη μεγάλη παρουσία διοξειδίου του άνθρακα που υπάρχει στο θαλάσσιο περιβάλλον από την δράση των θειικών βακτηριδίων όπως περιγράφεται στην εξίσωση (2.2).

Σύμφωνα με τον Rice (1992) οι συνθήκες στις οποίες μεθανογενή μικρόβια υπάρχουν στα θαλάσσια ιζήματα είναι:

- Ανοξικό περιβάλλον
- Χαμηλή συγκέντρωση θειικού άλατος
- Χαμηλή θερμοκρασία (βέλτιστη 35-45°C)
- Αρκετό οργανικό υλικό, πιθανά >0.5% TOC
- Ο τύπος του οργανικού υλικού, καθώς τα μεθανογενή μικρόβια εξαρτώνται από την προηγούμενη παρουσία άλλων μικροβίων που θα αποικοδομήσουν τις αρχικές οργανικές αλυσίδες
- Πόρους στο ιζημα: το μέγεθος των μεθανογενών είναι περίπου 1μm, συνεπώς χρειάζονται χώρο για να λειτουργήσουν
- Ρυθμός ιζηματογένεσης: πολύ μεγάλος ρυθμός σημαίνει ότι τα ιζήματα θα περάσουν πολύ γρήγορα από το βέλτιστο θερμοκρασιακό εύρος, ενώ πολύ αργός ρυθμός θα οδηγήσει στην οξείδωση του οργανικού υλικού. Ρυθμός ιζηματογένεσης από 200 έως 1000cm/year είναι ο βέλτιστος, και εξαρτάται από τη γεωθερμική βαθμίδα (Clayton, 1992).

Οι καλύτερες συνθήκες για τη δημιουργία μεθανίου βρίσκονται στα ανώτερα 2m των ιζημάτων. Η δράση όμως των μεθανογενών μικροβίων μπορεί να φτάσει μέχρι σε βάθος >1km. Σύμφωνα με τον Clayton, 1992 περίπου το 10% του συνολικού οργανικού άνθρακα (TOC) μπορεί να μετατραπεί σε μεθάνιο κάτω από κατάλληλες συνθήκες. Επίσης το νερό των πόρων των ιζημάτων στα βάθη σχηματισμού του μεθανίου θα κορεστούν σε μεθάνιο όταν λιγότερο από το 0.02% του TOC μετατραπεί σε μεθάνιο, άρα μετατροπή του 10% θα οδηγήσει στη δημιουργία ελεύθερης μικροβιακής αέριας φάσης.

Καθώς η ταφή των σύγχρονων ιζημάτων οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας, ο ρυθμός της μικροβιακής μεθανογένεσης μειώνεται και τελικά σταματάει. Ένα μέρος του οργανικού υλικού παραμένει στα ιζήματα όταν η ιζηματογένεση είναι μεγάλη. Τα μη χρησιμοποιημένα τμήματα της οργανικής ύλης από τα μεθανογενή μικρόβια κυρίως αποτελούνται από λιπίδια και λιγνίνη, αλλά και από πιο απλές μορφές που όμως είναι προστατευμένες (όπως πρωτεΐνες μέσα στα κελύφη οργανισμών). Το υπολειπόμενο οργανικό υλικό θα δημιουργήσει συμπυκνωμένα πολυμερή και τελικά κηρογόνο δηλαδή θερμογενείς υδρογονάνθρακες.

2.1.1.1.2 Θερμογενείς Υδρογονάνθρακες

Οι θερμογενείς υδρογονάνθρακες παράγονται σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, σε βάθη μεγαλύτερα των 1000m και αποτελούν μέρος πετρελαιοειδών (εικόνα 2.4) (Hunt, 1996; Judd and Hovland, 1997).

Ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν σημαντικό ποσοστό οργανικού άνθρακα (>2% TOC), στη μορφή κηρογόνου¹ καλούνται μητρικά πετρώματα. Κηρογόνο σε μητρικά πετρώματα που θάβεται σε βάθη μεγαλύτερα της ζώνης διαγένεσης παρουσιάζει χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την φύση του αρχικού οργανικού υλικού. Τρεις κύριοι τύποι κηρογόνου διαχωρίζονται σύμφωνα με τους λόγους υδρογόνου/άνθρακα και οξυγόνου/άνθρακα:

- Τύπος I (υψηλός λόγος H:C, χαμηλός O:C) αποτελείται από λιπίδια που προήλθαν από άλγες και μικρόβια σε λιμναία περιβάλλοντα. Κατά τη διάρκεια της καταγένεσης δημιουργείται πετρέλαιο.
- Τύπος II (ενδιάμεσος λόγος H:C και O:C) αποτελείται από υδρογονάνθρακες που προέρχονται από άλγες, φυτοπλαγκτόν και ζωοπλαγκτόν από ανοξικά θαλάσσια περιβάλλοντα. Κατά τη διάρκεια της καταγένεσης δημιουργείται αργό πετρέλαιο, συμπύκνωμα και υγραέριο.
- Τύπος III (χαμηλός λόγος H:C, υψηλός O:C) προέρχεται κυρίως από τη λιγνίνη και την κελουόζη της φυτοκάλυψης των χερσαίων περιβαλλόντων. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας καταγένεσης ή της αρχικής μεταγένεσης δημιουργείτε ξηρό αέριο.

Η παραγωγή υδρογονανθράκων από το κηρογόνο πραγματοποιείτε από το θερμικό σπάσιμο της αλυσίδας των μορίων κηρογόνου και τη δημιουργία απλούστερων μορίων υδρογονανθράκων (εικόνα 2.5).

Οι υδρογονάνθρακες που παράγονται διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες. Ο διαχωρισμός γίνεται ανάλογα με τα άτομα άνθρακα που έχουν οι υδρογονάνθρακες στο μόριο τους:

Αργό πετρέλαιο (crude oil), 15 άτομα C και άνω. Βρίσκονται σε υγρή μορφή, σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στην επιφάνεια. Εξάιρεση αποτελούν τα βιτουμένα.

Συμπύκνωμα (condensate), από 8 - 15 άτομα C. Βρίσκεται σε αέρια μορφή στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στο βάθος που βρίσκεται, αλλά σε υγρή μορφή σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στην επιφάνεια.

Υγρό αέριο (wet gas) ή συνοδό αέριο, από 2 - 7 άτομα C. Κυρίως αιθάνιο - προπάνιο και αποτελούν περισσότερο από το 5% της ολικής παραγωγής αερίου. Πολλές φορές συνοδεύεται από αργό πετρέλαιο και συμπύκνωμα

Ξηρό αέριο (dry gas) ή μη συνοδό αέριο, 1 άτομο C. Μεθάνιο.

¹Το στερεό, αδιάλυτο οργανικό υλικό που βρίσκεται στα ιζήματα, και μπορεί να οδηγήσει μετά από θέρμανση στο σχηματισμό υδρογονανθράκων

Η πολυπλοκότητα των πετρελαιοειδών είναι πολύ μεγάλη αλλά οι κύριοι τύποι είναι οι παραφίνες, οι κυκλικές αλκαλίνες και οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Οι τύποι του πετρελαίου που θα σχηματιστούν εξαρτώνται από τον τύπο του κηρογόνου, την θερμοκρασία και το χρόνο κατά τον οποίο τα μητρικά πετρώματα παραμένουν σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές συνθήκες (ονομάζεται ωριμότητα). Υπάρχουν τρία στάδια ωριμότητας, ανώριμα (διαγένεση), ώριμα (καταγένεση) και μετά-ώριμα (μεταγένεση). Κάθε πετρέλαιο που δεν μπορεί να διαφύγει από το μητρικό πέτρωμα και να ανέλθει σε ένα πιο ψυχρό περιβάλλον, θα διασπαστεί σε απλούστερες μορφές υδρογονανθράκων και τελικά σε μεθάνιο. Εάν θαφτεί σε μεγάλο βάθος θα σχηματιστεί γραφίτης. Βαθύτερα στο φλοιό, σε βάθος 10-35 km, ο γραφίτης αντιδρά με το υδρογόνο σε ιζήματα που μεταμορφώνονται δημιουργώντας μεθάνιο σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις (Apps and van de Kamp, 1993, Burruss, 1993, 2.8 και 2.9 αντίστοιχα).

Εικόνα 2.4. Τα βάρη σχηματισμού υδρογονανθράκων (τροποποίηση από Judd and Hovland, 2007).

2.1.1.2 Αβιογενείς υδρογονάνθρακες

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία έντονη συζήτηση για το εάν σχηματίζονται υδρογονάνθρακες χωρίς την παρουσία του έμβιου κόσμου. Οι Jensen et al., 1993 έδωσαν πέντε λόγους που υποστηρίζουν την αβιογενώς παραγωγή υδρογονανθράκων:

1. Η αφθονία μεθανίου στους εξωτερικούς πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος.
2. Η αφθονία και ποικιλότητα των οργανικών ενώσεων σε μετεωρίτες.
3. Η παρουσία βιτουμένων και αέριων υδρογονανθράκων σε πυριγενή πετρώματα.
4. Η σχέση μεταξύ συγκεντρώσεων υδρογονανθράκων και μεγάλων ρηγμάτων τα οποία λειτουργούν ως δίοδοι μετανάστευσης από ρευστά που βρίσκονται βαθιά.
5. Το γεγονός ότι ήλιο που προέρχεται από το μανδύα βρίσκεται μαζί με μεθάνιο και ανώτερους υδρογονάνθρακες σε γεωθερμικά φυσικά αέρια.

Αβιογενείς υδρογονάνθρακες μπορούν να σχηματιστούν με μετά-μαγματική ανόργανη σύνθεση (Mahfoud and Beck, 1995), ενώ σύμφωνα με τους Gold and Soter (1980), Gold (1999) υδρογονάνθρακες σχηματίζονται σύμφωνα με τη θεωρία *Deep-Earth Hypothesis*, όπου μεθάνιο και άλλοι υδρογονάνθρακες παγιδεύτηκαν κατά την επαύξηση των υλικών της Γης πριν από 4.5 δισεκατομμύρια χρόνια, όταν στη γη απελευθερώνονταν αέρια.

2.1.1.3 Διαχωρισμός Προέλευσης Αέριων Υδρογονανθράκων

Τα ρευστά στα θαλάσσια ιζήματα συμπεριφέρονται σύμφωνα με τη σύνθεση τους και όχι σύμφωνα με την προέλευση τους. Η μετανάστευση του μικροβιακού, του θερμογενούς και αβιογενούς μεθανίου θα εντοπιστεί με τις ίδιες μεθόδους. Από την άλλη πλευρά είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την προέλευση των ρευστών.

Το πιο σημαντικό εργαλείο για τον διαχωρισμό της προέλευσης των ρευστών είναι η ισοτοπική ανάλυση του άνθρακα. Ο άνθρακας έχει δύο σταθερά ισότοπα, τον ^{13}C και τον ^{12}C , από τα οποία το δεύτερο είναι το πιο σπάνιο. Ο ^{14}C είναι ασταθής, έχει χρόνο ημίσειας ζωής 5730 χρόνια και χρησιμοποιείται για χρονολόγηση έως 30000 χρόνια. Ο λόγος των δύο σταθερών ισοτόπων κυμαίνεται μεταξύ των διαφορετικών οργανικών υλικών που θάβονται. Ο λόγος που χρησιμοποιείτε είναι ο παρακάτω:

$$\delta^{13}\text{C}^{\circ}/_{\infty} = \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}} - ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{standard}})}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{standard}}} \times 100 \quad (2.10)$$

Όπου το πιο συνηθισμένο πρότυπο (standard) είναι το PeeDee Belemnite (PDB) και ο λόγος εκφράζεται ως $\delta^{13}\text{C}^{\circ}/_{\text{PDB}}$. Στην εικόνα 2.5 φαίνεται ότι το αβιογενές, το θερμογενές και το μικροβιακό μεθάνιο χαρακτηρίζονται από μεγάλο εύρος $\delta^{13}\text{C}$ το οποίο αλληλεπικαλύπτεται με αποτέλεσμα να μην είναι αξιόπιστη η μέθοδος.

Εικόνα 2.5. Η χρήση των ισοτόπων του άνθρακα για τη διάκριση του μεθανίου διαφορετικής προελεύσεως (τροποποίηση από Judd and Hovland, 2007).

Δύο άλλες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η πρώτη για το διαχωρισμό μεταξύ μικροβιακού και θερμογενούς μεθανίου, και μεταξύ μεθανίου που προέρχεται από πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Σε αυτή χρησιμοποιείται ο λόγος των ισοτόπων άνθρακα σε συνδυασμό με το λόγο:

$$\frac{C_2 + C_3 + C_4}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \times 100 \quad (2.11)$$

Η τιμή που παίρνει ο λόγος αυτός είναι πολύ μικρή ($\approx 0.01\%$) για το ξηρό αέριο (σχετιζόμενο το τύπο III κηρογόνου) και το μικροβιακό αέριο, ενώ για υγρό αέριο (σχετιζόμενο με πετρέλαιο) η τιμή του λόγου κυμαίνεται έως 90% (Miles, 1994).

Η δεύτερη μέθοδος στηρίζεται στο ότι η αφθονία των ισότοπων του υδρογόνου είναι χαρακτηριστική για την ωριμότητα και την προέλευση. Η αφθονία του δευτέρου που μετράται σε σχέση με το Τυπικό Μέσο Ωκεάνιο Νερό (SMOW) υπολογίζεται ως $\delta D\text{‰}_{\text{SMOW}}$. Στην εικόνα 2.6 δίνονται οι σχέσεις μεταξύ μεθανίου διαφορετικής προέλευσης χρησιμοποιώντας μαζί τα ισότοπα άνθρακα και υδρογόνου (Whiticar, 1999).

Εικόνα 2.6. Η χρήση των ισοτόπων άνθρακα και υδρογόνου για τη διάκριση της προέλευσης του μεθανίου (τροποποίηση από Whiticar, 1999).

2.1.2 Διαφυγές Νερού

Το νερό στους πόρους των πετρωμάτων περιλαμβάνει το μετεωρικό νερό, το απολιθωμένο νερό και το μαγματικό νερό. Από αυτά το μετεωρικό νερό συμβάλει κυρίως στις διαφυγές από τον πυθμένα διότι το μετεωρικό νερό ρέει προς τη θάλασσα, εισερχόμενο στο θαλάσσιο περιβάλλον ως η ποτάμια ροή είτε ως εκφόρτιση υπόγειου νερού (εικόνα 2.7).

Εικόνα 2.7. Σχηματικό διάγραμμα των διαφυγών γλυκού νερού από τον πυθμένα (τροποποίηση από Burnett et al., 2003)

2.1.2.1 Εκφόρτιση υπόγειου νερού

Σύμφωνα με τον Church (1996) το 97% των αποθεμάτων γλυκού νερού της γης είναι υπόγειο νερό. Το υπόγειο νερό βρίσκεται στους πόρους, και στα κενά των εδαφών και των πετρωμάτων στη χέρσο. Η μεγαλύτερη πηγή υπογείου νερού είναι το μετεωρικό νερό που προέρχεται από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Εκτός από την παρουσία ποταμών και υδροφόρων που διατέμνουν τον πυθμένα, οι παράμετροι που ελέγχουν εάν θα πραγματοποιηθεί εκφόρτιση υπόγειου νερού από τον πυθμένα της θάλασσας είναι η βροχόπτωση, η διαπερατότητα των πετρωμάτων, η βλάστηση, η τοπογραφία και ο ρυθμός κατείσδυσης (Burnett et al., 2003).

Ενώ υπάρχουν πολύ λεπτομερείς μελέτες για τη συνεισφορά των ποταμών σε γλυκό νερό προς το ωκεανό, η συνεισφορά της εκφόρτισης υπόγειου νερού από τον πυθμένα (submarine groundwater discharge, S.G.D) δεν είναι μέχρι σήμερα γνωστή καθώς είναι δύσκολο να μετρηθεί (Burnett et al., 2003). Το μέγεθος των εκφορτίσεων γλυκού νερού ποικίλει πολύ από περιοχή σε περιοχή. Γενικά όμως ο ρυθμός εκφόρτισης του γλυκού νερού από το θαλάσσιο πυθμένα ελαττώνεται όσο αυξάνεται το βάθος και η απόσταση από την ακτή (Tanigushi et al., 2002). Μικρές υποθαλάσσιες πηγές μπορεί να εκφορτίζουν πολύ μεγάλες ποσότητες νερού. Για παράδειγμα οι πηγές Onacis στην νοτιοανατολική Τουρκία βρίσκονται σε βάθος 1.5 μέτρων, και είναι ορατές καθώς το διαφεύγων νερό σχηματίζει κώνους εύρους 1.2 μέτρων στην επιφάνεια της θάλασσας. Οι πηγές έχουν παροχή $0.75\text{m}^3/\text{sec}$, δηλαδή $23.3 \times 10^{-6} \text{m}^3$ νερού διαφεύγουν το χρόνο (Elhatip, 2003). Εκτός από τις παράκτιες διαφυγές έχουν αναφερθεί και διαφυγές γλυκού νερού σε μεγάλα βάθη και σε μεγάλες αποστάσεις από την ακτή όπως η διαφυγή στο Black Ridge, σε βάθος 600 μέτρα και σε απόσταση 200km από την ανατολική ακτή των Η.Π.Α. (Manheim, 1967).

2.1.2.2 Διαφυγή νερού των πόρων

Το νερό των πόρων των ιζημάτων διαφεύγει προς την υδάτινη στήλη κατά τη διαδικασία της συμπίεσης των ιζημάτων. Οι άμμοι δέχονται μικρή συμπίεση, αντίθετα οι ιλύες που αποτελούνται από 80% νερό κατά τη διάρκεια της απόθεσής τους, μειώνουν τον όγκο τους κατά 40% κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Αυτή η ογκομετρική διαφορά πετυχαίνεται με την εκδίωξη του νερού των πόρων, αρχικά όταν τα αργιλικά ορυκτά αναδιατάσσονται στο μικρότερο χώρο. Βαθύτερα στην ιζηματογενή στήλη, όπου η θερμοκρασία και η πίεση αυξάνονται πραγματοποιούνται αλλαγές στα αργιλικά ορυκτά. Το μεγαλύτερο μέρος του νερού διαφεύγει όταν η θερμοκρασία αυξάνεται από τους 100°C στους 200°C , προκαλώντας μείωση του όγκου από 15 έως 30% και την αλλαγή του σμεκτίτη σε ιλλίτη (Selley, 1998).

Συνήθως το διαφεύγον νερό παραμένει στα ανώτερα ή στα γειτονικά ιζήματα, αλλά σε συγκεκριμένες συνθήκες υψηλής συμπίεσης λόγω μεγάλης ιζηματογένεσης ή σε περιοχές που δέχονται τεκτονική συμπίεση, το διαφεύγον νερό μπορεί να κινηθεί προς τα πάνω και να διαπεράσει τον πυθμένα. Σύμφωνα με τους Dugan and Flemings (2000) η χωρική διακύμανση του ρυθμού ιζηματογένεσης προκαλεί υδραυλική ροή που οδηγεί τα ρευστά προς τα κατάντη.

2.2 Τρόποι ανίχνευσης ρευστών στα επιφανειακά ιζήματα

Η παρουσία ρευστών στα θαλάσσια ιζήματα μπορεί να διαπιστωθεί με άμεσες και έμμεσες μεθόδους. Οι άμεσες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των ρευστών είναι τηλεπισκοπικές (γεωφυσική διασκόπηση), γεωχημικές μέθοδοι ή ακόμη και υποθαλάσσιες οπτικές παρατηρήσεις. Έμμεσες αποδείξεις παρουσίας ρευστών στα θαλάσσια ιζήματα είναι διάφορα μορφολογικά χαρακτηριστικά του θαλάσσιου πυθμένα, οι διαφυγές ρευστών στην υδάτινη στήλη, τα αυθιγενή ανθρακικά ορυκτά που σχηματίζονται από μεθάνιο (methane-derived authigenic carbonates καθώς επίσης και οι τοπικά ανεπτυγμένες ιδιαίτερες βιοκοινότητες.

2.2.1 Άμεσες μέθοδοι εντοπισμού

2.2.1.1 Τηλεπισκοπικές μέθοδοι

2.2.1.1.1 Τομογράφοι υποδομής πυθμένα

Με τους τομογράφους υποδομής πυθμένα μπορεί να εντοπιστεί κυρίως η αέρια φάση των ρευστών, η οποία προκαλεί αλλαγές στις ακουστικές ιδιότητες των ιζημάτων.

2.2.1.1.1 Η ακουστική απόκριση των φυσαλίδων αερίων

Οι φυσαλίδες αερίων είτε βρίσκονται στο νερό των πόρων των ιζημάτων είτε στην υδάτινη στήλη, επηρεάζουν τις ακουστικές και μηχανικές ιδιότητες του μέσου, η απόσβεση των ακουστικών κυμάτων αυξάνεται, η ακουστική ενέργεια διαχέεται, η ταχύτητα ακουστικών κυμάτων μεταβάλλεται (εικόνα 2.8) και η ελαστική απόκριση (tensile strength) του θαλασσινού νερού και των ιζημάτων μειώνεται (Hampton and Anderson, 1974, D'Arrigo, 1986).

Εικόνα 2.8. Η επίδραση της παρουσίας αερίων στα ιζήματα στην ταχύτητα των ακουστικών κυμάτων (τροποποίηση από Wilkens and Richardson, 1998).

Το μέγεθος της απόσβεσης εξαρτάται από το μέγεθος των φυσαλίδων σε σχέση με το μήκος κύματος. Η απόσβεση είναι μεγαλύτερη όταν η συχνότητα του ακουστικού κύματος γίνεται ίση με τη συχνότητα συντονισμού των φυσαλίδων. Σύμφωνα με τα παραπάνω υπάρχουν τρεις περιπτώσεις (Judd and Hovland, 2007) (εικόνα 2.9):

1. Όταν το μέγεθος των φυσαλίδων είναι περίπου ίδιο με το μήκος κύματος η ακουστική απόκριση είναι κυρίως αυτή του μέσου και οι φυσαλίδες διαχέουν τον ήχο.
2. Όταν το μήκος κύματος είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέγεθος των φυσαλίδων, η ακουστική απόκριση είναι αυτή του συνολικού μέσου (φυσαλίδες και ιζήμα ή νερό). Η ακουστική ταχύτητα μειώνεται δραματικά όταν υπάρχει ακόμα και πολύ μικρή (1%) παρουσία αερίου. Η απόσβεση αυξάνεται όταν αυξάνεται η παρουσία αερίου.
3. Όταν το μήκος κύματος είναι λίγο μεγαλύτερο από το μέγεθος των φυσαλίδων, η απόσβεση είναι μεγαλύτερη έναντι των δύο προηγούμενων περιπτώσεων. Σε αυτή τη περίπτωση το μέγεθος των φυσαλίδων είναι πιο σημαντικό από το ποσοστό παρουσίας του αερίου.

Για την πρώτη περίπτωση, σε χαλαρά λεπτόκοικα ιζήματα με ταχύτητα του ήχου περίπου 1500m/sec, μήκος κύματος από 0.5 έως 50mm (μέγεθος που έχουν κυρίως και οι φυσαλίδες) δημιουργείται από ηχητικές πηγές με συχνότητα 30 έως 3000kHz, συχνότητες που έχουν τα βυθόμετρα και οι ηχοβολιστές πλευρικής σάρωσης, τα οποία δεν διεισδύουν κάτω από τον πυθμένα. Συνεπώς η πρώτη περίπτωση έχει εφαρμογή μόνο στην υδάτινη στήλη.

Αντίθετα για τη δεύτερη περίπτωση, το μήκος κύματος των χαμηλόσυχνων συστημάτων (π.χ. airgun) είναι πολύ μεγάλο, (σήμα συχνότητας 250Hz στο θαλασσινό νερό με ταχύτητα

του ήχου 1500m/sec θα έχει μήκος κύματος περίπου 6m). Συνεπώς τα χαμηλόσυχνα συστήματα μπορούν να εντοπίσουν αέρια στην υδάτινη στήλη και στα επιφανειακά ιζήματα αλλά μόνο μεγάλες συγκεντρώσεις αερίων βαθύτερα.

Τα ενδεδειγμένα συστήματα για τον εντοπισμό αερίων στα επιφανειακά ιζήματα είναι οι τομογράφοι υποδομής πυθμένα τύπου 3.5kHz που ικανοποιούν την τρίτη περίπτωση. Επίσης για τον εντοπισμό αερίων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι παρακάτω παράγοντες:

- Ενώ το φαινόμενο συντονισμού των φυσαλίδων μπορεί να συμβεί σε όλα τα ιζήματα που περιέχουν αέρια, θα είναι πιο έντονο σε χαμηλής διατμητικής αντοχής ιζήματα όπως χαλαρά λεπτόκοκκα ιζήματα. Έτσι σεισμοκονιασμένη καταγραφή (acoustic turbidity) εμφανίζεται περισσότερο σε ιλυούχα ιζήματα σε σχέση με άμμους και χάλικες.
- Ένα ανακλώμενο σήμα μπορεί να είναι ανιχνεύσιμο ακόμα και μετά την απόσβεση λόγω των αερίων εάν το αρχικό ακουστικό κύμα είχε επαρκές πλάτος.
- Μικρές συγκεντρώσεις αερίων στο ιζημα, προκαλούν μικρές αλλαγές στην ακουστική ταχύτητα αλλά μπορούν να προκαλέσουν μεγάλη απόσβεση.
- Ενώ στα επιφανειακά ιζήματα οι φυσαλίδες έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν το σχήμα τους, μετά από μερικές εκατοντάδες μέτρα στο ιζημα γίνονται άκαμπτες, όποτε οι ακουστικές τους ιδιότητες είναι διαφορετικές. Έτσι η παρουσία αερίων προκαλεί έντονες ανακλάσεις (Mayer, 2004).

Εικόνα 2.9. Η συχνότητα συντονισμού των φυσαλίδων σύμφωνα με τη διάμετρο τους. Οι σκιασμένες περιοχές δείχνουν τις συχνότητες λειτουργίας των τομογράφων υποδομής πυθμένα boomer και pinger (περιλαμβάνει τον τύπο 3.5kHz) και του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης (τροποποίηση από Wilkens and Richardson, 1998).

2.2.1.1.2 Ακουστικοί χαρακτήρες που δηλώνουν την ύπαρξη ρευστών (αερίων υδρογονανθράκων) στα ιζήματα.

Ο εντοπισμός των αερίων υδρογονανθράκων στα ιζήματα βασίζεται στην εμφάνιση σεισμικών ανακλάσεων ανώμαλου ακουστικού χαρακτήρα (Hovland and Judd, 1988; Judd and Hovland, 1992; 2007). Οι σημαντικότερες ανώμαλες σεισμικές ανακλάσεις που δηλώνουν παρουσία αερίων υδρογονανθράκων κυρίως στα επιφανειακά ιζήματα είναι οι εξής (εικόνα 2.10):

Σεισμοκονιασμένη καταγραφή (Acoustic turbidity) (ATZ). Είναι ο πιο διαδεδομένος ακουστικός χαρακτήρας που σχετίζεται με την παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα ιζήματα. Αυτός εμφανίζεται ως χαοτικές ανακλάσεις που προκαλούνται από τη διάχυση της ηχητικής ενέργειας και δίνει την εικόνα «αμμοκονιασμένης» καταγραφής εξαλείφοντας κάθε άλλη σεισμική ανάκλαση. Σεισμοκονιασμένη καταγραφή μπορεί να υπάρξει εάν το ποσοστό του αερίου στο ιζημα είναι $\geq 1\%$.

Πλούμες αερίων (Gas plumes) (GPI). Περιγράφει ανακλάσεις με τη μορφή ανεστραμμένου -U- ή -V- στην υδάτινη στήλη και ουσιαστικά υποδηλώνει τη διαφυγή αερίων ή και άλλων ρευστών από τον θαλάσσιο πυθμένα προς την υδάτινη στήλη.

Έντονες σεισμικές ανακλάσεις (Enhanced reflections) (ER). Είναι σαφείς σεισμικές ανακλάσεις αυξημένης έντασης (παρατεταμένες, prolonged) σε κάποιο τμήμα της έκτασης τους. Αυτές οι ανακλάσεις αποδίδονται σε μικρές συγκεντρώσεις αερίων μέσα σε μικρού πάχους πορώδη στρώματα ιζημάτων. Πολλές φορές συνδέονται με περιοχές σεισμοκονιασμένης καταγραφής.

Λαμπερές κηλίδες (Bright Spots) (BS). Είναι παρόμοιες με τις έντονες σεισμικές ανακλάσεις αλλά εντοπίζονται σε καταγραφές συστημάτων με πολλαπλές συχνότητες (multichannel systems). Σχηματίζονται από μεγάλους αρνητικής φάσης ανακλάσεις.

Ακουστική σιιά (Acoustic blanking) (AB). Σε περιοχές του πυθμένα που χαρακτηρίζονται από παρουσία αερίων στη σεισμική καταγραφή μπορεί να υπάρχουν αχνές ή καθόλου ανακλάσεις. Αυτό μπορεί να γίνει από τη διατάραξη της στρωμάτωσης των ιζημάτων από μετανάστευση αερίων ή λόγω απορρόφησης της ακουστικής ενέργειας από ένα υπερκείμενο στρώμα αερίου. Ακουστική σιιά επίσης μπορεί να προκαλέσει κάθε συνεκτικό στρώμα ιζήματος μικρής διεισδυτικότητας.

Θύλακες αερίων (Gas pockets) (GP). Είναι συγκέντρωση αερίων που έχουν παγιδευτεί κάτω από ένα αδιαπέραστο στρώμα. Στα γειτονικά ιζήματα δεν υπάρχουν αέρια και ουσιαστικά υποδηλώνει τοπική κατακόρυφη μετανάστευση αερίων. Παρουσιάζει εσωτερικό ακουστικό χαρακτήρα παρόμοιο με αυτόν της σεισμοκονιασμένης καταγραφής.

Στηλοειδής διατάραξη (Columnar disturbance) (CD). Είναι κατακόρυφες ζώνες στην σεισμική καταγραφή οι οποίες διακόπτουν τις κανονικές στρωσιγενείς σεισμικές ανακλάσεις λόγω της κάθετης μετανάστευσης αερίων και της καταστροφής της εσωτερικής δομής των ιζημάτων.

Εικόνα 2.10 Ακουστικές ανωμαλίες που δηλώνουν την παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα ιζήματα (ATZ-Σεισμοκοιμισμένη καταγραφή, D-Αναθλώσεις του πυθμένα, ER-Έντονες σεισμικές ανακλάσεις, CD-Στηλοειδής διατάραξη, GP-Θύλακες αερίων, GPI-Πλούμες αερίων, (από Papatheodorou et al., 1993), brightspot-Λαμπερές κηλίδες (από Judd and Horland, 2007)).

2.2.1.2 Γεωχημική Διασκόπηση

Στα πλαίσια της διερεύνησης διαφυγών ρευστών από τον θαλάσσιο πυθμένα πραγματοποιούνται έρευνες γεωχημικής διερεύνησης (sniffer surveys). Η μέθοδος 'Sniffer' (ονομάζεται και άμεση ανίχνευση υδρογονανθράκων - *Direct Hydrocarbon Detection* (DHD)) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση διαφυγών υδρογονανθράκων με τη χρήση ενός συρόμενου δειγματολήπτη νερού (submerged tow-fish) πολύ κοντά στον πυθμένα ο οποίος αντλεί συνεχώς θαλασσινό νερό που διοχετεύεται σε ένα γεωχημικό εργαστήριο επάνω στο πλοίο, όπου οι υδρογονάνθρακες διαχωρίζονται και μετρώνται με αέρια χρωματογραφία. Παρόμοια μέθοδος πραγματοποιείται με τη συλλογή δειγμάτων νερού από υποβρύχια τηλεκατευθυνόμενα και ανάλυση τους στο εργαστήριο. Τα τελευταία χρόνια προκρίνεται και η χρησιμοποίηση αισθητήρων μέτρησης διαλυμένων αερίων στο θαλασσινό νερό, οι οποίοι είτε χρησιμοποιούνται δημιουργώντας κατακόρυφες κατανομές με το βάθος σε ρηχά περιβάλλοντα (Christodoulou et al., 2003), είτε τοποθετούνται σε συρόμενα υποβρύχια παρατηρητήρια (Etiope et al., 2009) ή σε αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUV) (Newman et al., 2008). Επίσης με τη συλλογή και την γεωχημική ανάλυση ιζημάτων μπορούν να

εντοπιστούν, πέραν των ενεργών μακροδιαφυγών (macroseeps) διαφυγών (που εντοπίζονται και με γεωφυσική διασκόπηση), μικροδιαφυγές (microseeps) (Horvitz, 1980) ή και παθητικές διαφυγές (passive seeps) (Abrams, 1996), οι οποίες δεν είναι ενεργές σήμερα ή είναι πολύ μικρές και δεν υπάρχουν γεωφυσικές ενδείξεις της παρουσίας τους.

Για την επιβεβαίωση της παρουσίας αερίων υδρογονανθράκων στα ιζήματα πραγματοποιούνται χημικές αναλύσεις σε δείγματα που προέρχονται από γεωτρήσεις για πετρέλαια, σε αναλύσεις επιφανειακών ιζημάτων καθώς επίσης και σε αναλύσεις θαλασσινού νερού σε περιοχές με διαφυγές αερίων. Οι χημικές αναλύσεις των ρευστών και των αερίων που διαφεύγουν μπορεί να αποκαλύψει τόσο τη σύσταση των ρευστών (υδρογονάνθρακες, γλυκό νερό) αλλά και μέσω ισοτοπικών αναλύσεων και την προέλευση και τον τρόπο σχηματισμού των ρευστών (Hovland, 2003). Επίσης η γεωχημική ανάλυση δειγμάτων ιζημάτων σε συνδυασμό με ορυκτολογικές και βιολογικές αναλύσεις από τις περιοχές διαφυγών υδρογονανθράκων μπορεί να δείξει (Schumacher, 1996) (α) ορυκτολογικές μεταβολές (σχηματισμός ασβεστίτη, πυρίτη, ορυκτά του ουράνιου, στοιχειακό θείο, οξείδια του σιδήρου και του θείου), (β) μεταβολές στα αργιλικά ορυκτά, (γ) μικροβιακές μεταβολές, (δ) ηλεκτροχημικές μεταβολές (pH, Eh), (ε) ανωμαλίες ακτινοβολίας γ, βιογεωχημικές ανωμαλίες.

2.2.2 Έμμεσες μέθοδοι εντοπισμού

2.2.2.1 Μορφολογικά χαρακτηριστικά στην επιφάνεια του πυθμένα που σχετίζονται με διαφυγές ρευστών.

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του θαλάσσιου πυθμένα που αποτελούν έμμεσες αποδείξεις για την παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα θαλάσσια ιζήματα καταγράφονται με τηλεπισκοπικές μεθόδους (ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, πολυδεσμικό βυθόμετρο), ενώ τα αποτελέσματα των παραπάνω επιβεβαιώνονται με επιτόπια οπτική παρατήρηση από αυτοδύτες, υποβρύχια τηλεκατευθυνόμενα/κατευθυνόμενα ή επανδρωμένα οχήματα.

2.2.2.1.1 Κρατήρες Διαφυγής Ρευστών (Pockmarks)

Με τον όρο κρατήρες διαφυγής ρευστών (*pockmarks*) εννοούμε κρατήρες που δημιουργούνται στον πυθμένα από τη διαφυγή ρευστών στην υδάτινη στήλη. Η ύπαρξη των κρατήρων διαφυγής ρευστών ανακαλύφθηκε από τους King and Mac Lean, 1970 στη Nova Scotia στον Καναδά. Τα ρευστά που διαφεύγουν από το θαλάσσιο πυθμένα μπορεί να είναι αέριοι υδρογονάνθρακες, αέριοι υδρογονάνθρακες και νερό των πόρων των ιζημάτων ή γλυκό νερό. Κρατήρες διαφυγής ρευστών έχουν καταγραφεί σε πολλές περιοχές του πλανήτη (Judd and

Hovland, 2007). Παρότι η ύπαρξη των κρατήρων διαφυγής ρευστών στον πυθμένα έγινε σχετικά πρόσφατα γνωστή αποδείχθηκε ότι είναι σημαντικοί για τους εξής λόγους:

- είναι ένδειξη παρουσίας αποθεμάτων πετρελαίου (Hovland and Judd, 1988).
- συνιστούν παράκτιους γεωλογικούς κινδύνους (Sills and Wheeler, 1992).
- συνεισφέρουν στην αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας με την απελευθέρωση μεθανίου (Lashof and Ahuja, 1990 , Judd and Hovland, 1992).
- είναι πηγές αυξημένης βιολογικής παραγωγικότητας (Levy and Lee, 1988).

Ο σχηματισμός και η χωρική κατανομή κρατήρων διαφυγής ρευστών ελέγχεται από τρεις κύριους παράγοντες (Judd and Hovland, 2007):

- το μηχανισμό σχηματισμού,
- τη σταθερότητα του πυθμένα, χωρίς μεγάλη απόθεση ιζημάτων ή διάβρωση και
- την παρουσία ιζημάτων που είναι ευνοϊκά στο σχηματισμό κρατήρων.

Οι κρατήρες διαφυγής παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση όσον αφορά το μέγεθός τους, με διάμετρο από μερικά μέτρα έως εκατοντάδες μέτρα και βάθος από <1μ. έως και 25μ. Η μορφολογία των κρατήρων διαφυγής παρουσιάζει ανάλογη ποικιλία με αυτή του μεγέθους τους. Σύμφωνα με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους μπορούν να διαχωριστούν (Hovland and Judd, 1988, Judd and Hovland, 2007) σε:

- Κυκλικούς και ελλειψοειδείς κρατήρες (standard circular and elliptical pockmarks). Κρατήρες των οποίων η μεγάλη και η μικρή διάμετρος τους παρουσιάζουν λόγο από 1.0 (κυκλικά) έως 1.25 (ελλειπτικά). Η μεγάλη διάμετρος παρουσιάζεται συνήθως παράλληλη με την επικρατούσα κλίση του πυθμένα, ενώ έχει διαπιστωθεί ένας προσανατολισμός σύμφωνα με τα επικρατούντα ρεύματα.
- Σύνθετους κρατήρες (composite pockmarks). Οι σύνθετες κρατήρες προκύπτουν από τη συνένωση περισσότερων του ενός κρατήρων.
- Ασύμμετρους κρατήρες (asymmetric pockmarks).. Οι ασύμμετροι κρατήρες παρουσιάζουν σε ηχογραφίες μία αριετή επιμηκυσμένη “ουρά” και ένα καλοσχηματισμένο πρηνές από τη μία μόνο πλευρά του. Η μία πλευρά του κρατήρα παρουσιάζει πολύ μικρή κλίση και απολήγει ομαλά στον οριζόντιο αδιατάραχτο πυθμένα.
- Συγγραμμικούς κρατήρες (pockmarks strings). Πρόκειται για εξατομικευμένους κρατήρες οι οποίοι είναι συνήθως συμμετρικοί, ρηχοί και διαμέτρου 10-15μ, διευθετούνται σε ευθείες ή καμπύλες γραμμές και διαπιστώθηκαν στη θαλάσσια περιοχή της Νορβηγίας. Οι συγγραμμικοί κρατήρες είναι δυνατόν να έχουν αναπτυχθεί σε απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων και συνήθως η “αλυσίδα” των κρατήρων απολήγει σε ένα μεγάλο

κρατήρα ή είναι δυνατόν να ενώνει δύο σημαντικούς κρατήρες. Στον Ελληνικό χώρο συγγραμμικοί γιγάντιοι κρατήρες (διαμέτρου 600μ.) εντοπίστηκαν στη θαλάσσια περιοχή της Κυλλήνης χωρίς να είναι επιβεβαιωμένη η προέλευση τους (Hasiotis et al., 2002).

- Επιμηκυσμένους κρατήρες (elongated rockmarks). Πρόκειται για κρατήρες οι οποίοι παρουσιάζουν σημαντική επιμήκυνση, σε σημείο να ομοιάζουν μορφολογικά περισσότερο με τάφρους ή αυλάκια παρά με τυπικούς κρατήρες διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων.
- “Αρχικούς” κρατήρες (unit rockmarks, pit, pit clusters). Κρατήρες πολύ μικρού μεγέθους (<5μ) που διαπιστώνονται είτε σε ομάδες είτε στις παρυφές μεγαλύτερων κρατήρων. Έχουν διατυπωθεί απόψεις ότι οι “αρχικοί” κρατήρες σταδιακά εξελίσσονται σε τυπικούς κρατήρες διαφυγής αερίων.
- Νέους κρατήρες (fresh rockmarks). Είναι κρατήρες μεγάλου συνήθως μεγέθους οι οποίοι περιβάλλονται από αριθμό “αρχικών” κρατήρων. Η πυκνότητα των “αρχικών” κρατήρων μειώνεται σε διεύθυνση απομάκρυνσης από το “νέο” κρατήρα.
- Κρατήρες με εσωτερική αναθόλωση (outcrop mounds). Πρόκειται για κρατήρες στο εσωτερικό τμήμα των οποίων έχει δημιουργηθεί αναθόλωση λόγω λασπούχου διαπυρισμού, προσδίδοντας μια δακτυλιοειδή διαμόρφωση στον κρατήρα.
- Κρατήρες σε αναθολώσεις (crater mounds). Πρόκειται για κωνικής μορφής αναθολώσεις του πυθμένα πάνω στις οποίες έχει σχηματισθεί κρατήρας διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων.

2.2.2.1.1.1 Σχηματισμός και ανάπτυξη κρατήρων διαφυγής ρευστών

Κρατήρες διαφυγής ρευστών σχηματίζονται όταν ο ρυθμός διαφυγής ρευστών είναι επαρκής για να επηρεάσουν τα ιζήματα και όταν τα ιζήματα είναι κατάλληλα. Το παρακάτω μοντέλο αποτελούμενο από 7 στάδια περιγράφει τον τρόπο σχηματισμού και ανάπτυξης των κρατήρων (εικόνα 11) (Judd and Hovland, 2007).

Εικόνα 2.11. Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα του σχηματισμού κρατήρων διαφυγής ρευστών (από Judd and Hovland, 2007).

1. Η συγκέντρωση αερίων στα επιφανειακά ιζήματα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης των πόρων των ιζημάτων και προκαλεί την αναθόλωση αρχικά των υποεπιφανειακών στρωμάτων και στη συνέχεια την αναθόλωση του πυθμένα. Αυτή η αναθόλωση αντιπροσωπεύει μία ζώνη τάσης όπου τα ιζήματα τείνουν να καταλάβουν την καινούργια τοπογραφία.
2. Τα αέρια βρίσκουν δίοδο προς τον πυθμένα διαμέσου των ανορθώσεων. Εφόσον η υδραυλική ένωση δημιουργηθεί μεταξύ της επιφάνειας συγκέντρωσης των αερίων και της επιφάνειας του πυθμένα προκαλείτε πτώση της πίεσης με αποτέλεσμα την βίαιη εκτόξευση των αερίων. Τα αέρια διαστέλλονται καθώς ανεβαίνουν προς τον πυθμένα και τα περιβάλλοντα ιζήματα χαλαρώνουν και συμπρασύρονται από τα αέρια δημιουργώντας μία πλούσια αέριων – ιζήματος που ανεβαίνει στην υδάτινη στήλη. Αυτή η διεργασία ονομάστηκε ‘gasturbation’ από τους Josenhans et al., 1978, προσθέτοντας ότι η ανάβλυση νερού (upwelling) σε συνεργασία με τη διαφυγή φουσαλίδων μπορεί να βοηθήσει στη αιώρηση των ιζημάτων. Η ύπαρξη πυθμαίων ρευμάτων θα μπορούσε να εκτρέψει ροή φουσαλίδων και την ανάβλυση νερού προκαλώντας τύρβη και διάβρωση των τοιχωμάτων του κρατήρα, με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του κρατήρα. Επίσης ο επιμηκυμένος κρατήρας μπορεί να προκαλέσει αλλαγή στο ρεύμα που στροβιλίζεται που θα μπορούσε να επιτρέψει την διάβρωση των τοιχωμάτων και την περαιτέρω επιμήκυνση ακόμα και σε περιόδους που δεν διαφεύγουν φουσαλίδες.
3. Τα λεπτόκοκκα ιζήματα (άργιλοι) συμπρασύρονται από τα ρεύματα για κάποιο χρόνο πριν αποτεθούν μακριά από τον κρατήρα ενώ τα πιο χονδρόκοκκα (πηλός και άμμος) αποτίθενται κοντά ή μέσα στον κρατήρα. Το μέγεθος των διαφυγών, η κοκκομετρική σύσταση των ιζημάτων και η ένταση των θαλασσίων ρευμάτων καθορίζουν την κατανομή των ιζημάτων που απομακρύνονται από κάθε κρατήρα.
4. Η αρχική διαφυγή από ένα αδιατάρακτο (‘παρθένο’) πυθμένα μπορεί να είναι βίαιη, καθώς θα πρέπει να δημιουργηθεί μία καινούργια δίοδος διαφυγής. Τα επόμενα γεγονότα διαφυγών δεν θα συναντήσουν την ίδια αντίσταση καθώς η δίοδος έχει επαναχρησιμοποιηθεί. Επίσης τα επόμενα γεγονότα διαφυγών θα είναι μικρότερης κλίμακας και η αναθόλωση του πυθμένα δεν θα ξανασυμβεί. Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις τα τοιχώματα των κρατήρων, λόγω της συνεχούς διαφυγής, αποικτούν μεγάλες κλίσεις και συνεπώς γίνονται επιρρεπή σε βαρυτικές μεικνήσεις ιζημάτων προς τη βάση του κρατήρα.
5. Από τη στιγμή που σχηματίζεται ο κρατήρας τα αέρια που βρίσκονται στην περιοχή του θα οδηγούνται προς αυτόν, έτσι ο κάθε κρατήρας αποτελεί στην πραγματικότητα ένα σύστημα διοχέτευσης αερίου μίας συγκεκριμένης περιοχής – κελί (cell) όπου ο κρατήρας

βρίσκεται συνήθως στο κέντρο της. Η ακριβής θέση του κρατήρα σε σχέση με τον ταμειυτήρα του εξαρτάται από την τοπογραφία του ορίζοντα συγκέντρωσης του αερίου. Το μέγεθος του κελιού και κατά συνέπεια η πυκνότητα των κρατήρων σε μία περιοχή εξαρτάται από το πάχος, την αντοχή και τη διαπερατότητα των επιφανειακών ιζημάτων, όσο μικρότερη είναι η διαπερατότητα τόσο μικρότερη θα είναι και πυκνότητα των κρατήρων.

6. Οι περίοδοι ηρεμίας, κατά τη διάρκεια των οποίων τα οι ρηχοί ταμειυτήρες αερίων επαναπληρούνται, χαρακτηρίζονται από “μπάζωμα” των κρατήρων εξαιτίας των καταρρεύσεων των τοιχωμάτων τους και γενικά από ιζηματογένεση. Οι περισσότεροι κρατήρες παγκοσμίως χαρακτηρίζονται ως ανενεργοί ή κοιμισμένοι, συνεπώς αυτοί με την πάροδο του χρόνου που έχουν σχηματιστεί σε περιοχές με μεγάλη ιζηματογένεση θα γεμίσουν, σε περιοχές με διάβρωση θα διαβρωθούν και θα χαθούν, ενώ σε παράκτιες περιοχές όπου ο πυθμένας επηρεάζεται από τύρβη θα καταστραφούν.
7. Οι “μπάζωμένοι” κρατήρες μπορεί να κλείσουν τελείως την δίοδο διαφυγής των ρευστών. Οι εναπομείναντες παλαιοί δίοδοι διαφυγής μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν από τα μεταναστεύοντα ρευστά, όπως έχει βρεθεί στη διάυλο της Νορβηγίας, και συνεπώς νέοι κρατήρες να σχηματιστούν πάνω σε θαμμένους παλιότερους κρατήρες.

2.2.2.1.1.2 Σχηματισμός κρατήρων από διαφυγές γλυκού νερού.

Ο Harrington (1985) πρότεινε ότι οι κρατήρες μπορεί να σχηματιστούν από τη διαφυγή του νερού των πόρων των ιζημάτων κατά τη διάρκεια συμπαγοποίησης των ιζημάτων. Επίσης ο Whitticar (2002) πρότεινε ότι οι κρατήρες στον κόλπο του Eckernforde στη Γερμανία είναι υποβρύχιες δίοδοι γλυκού νερού και όχι γεωμορφές από διαφυγές υδρογονανθράκων. Αυτός ο τρόπος σχηματισμού κρατήρων μπορεί να συμβεί σε περιοχές όπου ο υδροφόρος ορίζοντας εμφανίζεται στην επιφάνεια του πυθμένα, άλλα και η υδραυλική πίεση του υδροφόρου να είναι επαρκής ώστε να υποστηρίξει τη ροή. Ως αποτέλεσμα, κρατήρες τέτοιου τύπου περιορίζονται σε παράκτιες περιοχές..

2.2.2.1.2 Αναθολώσεις του πυθμένα (seabed domes).

Η παρουσία αερίων υδρογονανθράκων κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα είναι δυνατόν να προκαλέσει την αναθόλωση του. Οι αναθολώσεις είναι μικρού ύψους (1-2μ) αλλά έχουν διάμετρο πολλών μέτρων (>100μ). Μια άποψη για τη δημιουργία των αναθολώσεων είναι η μετατόπιση του νερού των πόρων προς τα πάνω λόγω της μετανάστευσης των αερίων και συνεπώς αύξηση του όγκου και δημιουργία αναθόλωσης. Η παρουσία αναθόλωσης μπορεί να θεωρηθεί το πρώτο στάδιο της δημιουργίας ενός κρατήρα διαφυγής ρευστών. Οι αναθολώσεις

του πυθμένα εντοπίζονται με τομογράφους και κάτω από προϋποθέσεις με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης (εικόνα 2.12).

Εικόνα 2.12. Αναθόλωση πυθμένα (D) στη βόρεια θάλασσα (Τομογραφία από Hovland and Judd, 1988).

2.2.2.1.3 Λασπούχα διάπυρα ή ηφαίστεια (*mud diapirs, mud volcanoes, mud lumps*).

Το φαινόμενο του διαπυρισμού αναπτύσσεται από την πλαστική παραμόρφωση ιζημάτων και την άνοδο τους διαμέσου άλλων σχηματισμών λόγω της επίδρασης της άνωσης. Η δημιουργία λασπούχου διάπυρου λόγω των αερίων υδρογονανθράκων οφείλεται στην αστάθεια (*static instability*) που προκαλείται από την είσοδο των αερίων σε στρώμα ιζημάτων με πλαστική συμπεριφορά. Τα λασπούχα διάπυρα εντοπίζονται με τομογράφους και κάτω από προϋποθέσεις με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης (εικόνα 2.13). Τα λασπούχα ηφαίστεια αποτελούν σημαντικές μορφολογικές ενδείξεις για τη διαφυγή ρευστών από τον πυθμένα αλλά ο τρόπος σχηματισμού τους και η διασπορά τους δεν θα αναλυθούν περαιτέρω καθώς ξεφεύγουν από τα όρια της παρούσας διατριβής.

Εικόνα 2.13. Λασπούχα ηφαίστεια από τη Μαύρη Θάλασσα σε σεισμική τομογραφία και σε ηχογραφία (Krastel et al., 2003).

2.2.2.2 Άλλες έμμεσες ενδείξεις

2.2.2.2.1 Κηλίδες υψηλής ανακλαστικότητας (*highly-reflective seabed*).

Οι κηλίδες υψηλής ανακλαστικότητας εντοπίζονται με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης και αποδόθηκαν στη μαζική και εκτεταμένη διαφυγή αερίων υδρογονανθράκων από τον πυθμένα προς την υδάτινη στήλη. Οπτική παρατήρηση τέτοιου τύπου κηλίδων έδειξε ότι καλύπτονται από ελασματοβράγχια ενώ διαπιστώθηκε επιφανειακή κρούστα τσιμεντοποιημένων (cemented) ιζημάτων (carbonate-cemented sediments) (εικόνα 2.14). Πρέπει να τονισθεί ότι η συγκέντρωση αδρομερών υλικών (άμμος, κροκάλες) σε συγκεκριμένες περιοχές του πυθμένα δίνει τον ίδιο ακουστικό τύπο στις ηχογραφίες.

Εικόνα 2.14. Ηχογραφία στην οποία φαίνεται κηλίδα υψηλής ανακλαστικότητας στο Rockall Trough, Ηνωμένο Βασίλειο (ηχογραφία από Masson et al., 2003).

2.2.2.3 Διαφυγές ρευστών στην υδάτινη στήλη (*fluid seepage*).

Οι διαφυγές στην υδάτινη στήλη διακρίνονται, σύμφωνα με το μέγεθός τους, σε μικρο- και μακροδιαφυγές. Οι μακροδιαφυγές χαρακτηρίζονται αυτές που διακρίνονται και καταγράφονται από οποιοδήποτε ηχοβολιστικό σύστημα. Οι μακροδιαφυγές παρουσιάζονται με τη μορφή σκουρόχρωμων κηλίδων ή αντεστραμμένων -V- στην υδάτινη στήλη (εικόνα 2.15). Τον ίδιο ακουστικό χαρακτήρα δίνουν τόσο οι διαφυγές γλυκού νερού στο θαλάσσιο περιβάλλον όσο και οι ιχθυοπληθυσμοί. Οι μακροδιαφυγές εντοπίζονται με βυθόμετρα, τομογράφους και ηχοβολιστές πλευρικής σάρωσης.

Εικόνα 2.15. Διαφυγές ρευστών στην υδάτινη στήλη σε βυθόμετρο και σε τομογραφία από την Βόρεια ακτή της Αυστραλίας (εικόνες από Rollet and Logan, 2005).

2.2.2.3.1 Μεθανογενή αυθιγενή ανθρακικά ορυκτά (Methane – derived authigenic carbonates MDAC)

Μεθανογενή αυθιγενή ανθρακικά ορυκτά έχουν εντοπιστεί σε περιοχές με αξιοσημείωτες διαφυγές ρευστών (Judd and Hovland, 2007). Τα μεθανογενή αυθιγενή ανθρακικά πετρώματα σχηματίζονται από το συνδυασμό της αναερόβιας οξείδωσης του μεθανίου (Boetius et al., 2000) και της θειικής αναγωγής ακριβώς κάτω από τον πυθμένα με τη δράση μικροβίων:

Ο σχηματισμός HCO_3^- αυξάνει την αλκαλικότητα και σε συνδυασμό με την αφθονία Ca^{2+} και Mg^{2+} στο θαλασσινό νερό προκαλεί την καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου οδηγώντας στο σχηματισμό αραγωνίτη και δολομίτη (εικόνα 2.16).

Εικόνα 2.16. Φωτογραφίες στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο όπου φαίνονται ανθρακικά ορυκτά προερχόμενα από την αναερόβια οξείδωση του μεθανίου (Φωτογραφίες από Judd et al., 2007).

2.2.2.3.2 Βιολογική σημασία των διαφυγών ρευστών

Οι διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα της θάλασσας συνδέονται με ανώμαλη βιολογική δραστηριότητα (Hovland and Judd, 1988; Judd and Hovland, 2007). Η πιο σημαντική διεργασία που συμβάλει στην μεταβολή της βιοποικιλότητας σε περιοχές με διαφυγές ρευστών, εκτός από τα μεθανότροφα βακτήρια (που χρειάζονται οξυγόνο) είναι η χημική σύνθεση από τους χημικοσυνθετικούς οργανισμούς (χωρίς την παρουσία οξυγόνου). Τα μικρόβια που πραγματοποιούν τη μεθανογένεση (θειικά βακτήρια – BRS και archaea) όταν υπάρχει προσφορά μεθανίου τότε πραγματοποιούν την αντίστροφη διεργασία και γίνονται ουσιαστικά μεθανότροφοι οργανισμοί (εξίσωση 2.13). Αυτή η διεργασία ονομάζεται αναερόβια οξείδωση του μεθανίου (AOM) (Boetius et al., 2000) και λαμβάνει χώρα στην ζώνη μετάβασης θείου μεθανίου στο ιζημα (DeLong, 2000).

Η εξίσωση 2.13 είναι ίδια με την 2.12 και η σχέση των δύο διεργασιών συνοψίζεται στην εικόνα 2.17.

Εικόνα 2.17. Αναερόβια οξείδωση μεθανίου και τα προϊόντα της (τροποποίηση από Judd and Hovland, 2007).

Τα βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα (bacterial mats) (εικόνα 2.18) που απαρτίζονται από θειο-οξειδωτικά βακτήρια (θειότροφα) είναι η πιο διαδεδομένη οπτική ένδειξη διαφυγών ρευστών καθώς υπάρχουν συνήθως όπου υπάρχουν διαφυγές μεθανίου. Βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα έχουν αναφερθεί σε πολλές περιοχές με διαφυγές (Judd and Hovland, 2007),

από πολύ ρηχά περιβάλλοντα (Ria de Figo - Judd and Hovland, 2007) έως σε βαθειά σημεία του ωκεανού (τάφρος των Αλεούτιων – Suess et al., 1998). Έχουν βρεθεί επίσης σε περιοχές με πλούσια σε θείο ιζήματα, σε θειούχες υδροθερμικές πηγές και κλειστές ανοξικές λεκάνες.. Περιγράφονται ως νηματοειδείς, λευκού έως πορτοκαλί χρώματος χνουδωτά συσσωματώματα οργανισμών, που επιβάθονται στα ιζήματα, στην διεπιφάνεια μεταξύ ανοξικών, θειούχων ιζημάτων και οξυγονωμένου θαλασσινού νερού. Το πάχος τους μπορεί να είναι από <1cm και μπορεί να φτάσει σπάνια τα 10cm. Τα κυριότερα είδη είναι του γένους *Beggiatoa*, ενώ έχουν αναφερθεί τα είδη *Thiothrix* και *Thioploca* spp. Αυτά τα μικρόβια οξειδώνουν το θείο χρησιμοποιώντας ως οξειδωτικά είτε το οξυγόνο είτε το άζωτο, όπως περιγράφεται από την εξίσωση:

Εικόνα 2.18. Υποβρύχιες φωτογραφίες όπου φαίνονται βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα σε χονδρόκοκκο και σε λεπτόκοκκο πυθμένα.

Σύμφωνα με τους Sibuet and Olu, 1998 η βιοποικιλότητα στα περιβάλλοντα βαθειά θάλασσας διακρίνεται σε αυτή στο κοινό πυθμένα βαθέων θαλασσών που χαρακτηρίζεται από μικρή βιομάζα και βιοποικιλότητα, σε αυτή σε υδροθερμικές πηγές που χαρακτηρίζεται από μεγάλη βιομάζα αλλά μικρή βιοποικιλότητα με ιδιαίτερα είδη μεγαπανίδας και τέλος σε περιοχές με ψυχρές διαφυγές ρευστών που χαρακτηρίζεται από μικρό αριθμό μεγαπανίδας ασπόνδυλων και υψηλή βιομάζα που δημιουργείται από χημικοσυνθετικά βακτήρια.

Στα ρηχά περιβάλλοντα η βιοποικιλότητα σε περιοχές με διαφυγές ρευστών (εκτός των υδροθερμικών) εκτός από την παρουσία βακτηριδιακών ινωδών συσσωματωμάτων, δεν παρατηρείται μεγάλη βιολογική δραστηριότητα (Tarasov et al., 1999). Στο παραπάνω συμφωνεί και ο Dando, 2001, ο οποίος μελέτησε τις βιοκοινωνίες στους κρατήρες διαφυγής ρευστών της Βόρειας Θάλασσας, και σημειώνει πως παρά τη πληθώρα οργανισμών στους

κρατήρες δεν υπάρχει κάποια ένδειξη πως αυτοί σχετίζονται με τους χημικοσυνθετικούς οργανισμούς. Αντίθετα, στη Βόρεια θάλασσα όμως βιντεοσκοπήθηκε μεγάλος αριθμός καρκινοειδών στον πυθμένα των κρατήρων διαφυγής ρευστών (Hovland and Judd, 1988) με αποτέλεσμα οι Hovland and Thomsen, 1989 να προτείνουν ότι η πανίδα στους κρατήρες διαφυγής ρευστών είναι εξαρτώμενη από τους υδρογονάνθρακες. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Hill et al., 2003 τα τρηματοφόρα μπορούν να είναι δείκτες παρουσίας διαφυγών μεθανίου και συγκεκριμένα το είδος *Bolivina tumida*.

2.3 Παράγοντες ενεργοποίησης διαφυγών ρευστών

Η φυσική αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων των ιζημάτων υπό το αυξανόμενο βάρος των υπερκείμενων, οδηγεί τα ελαφρύτερα ρευστά να μεταναστεύουν προς την επιφάνεια του πυθμένα διαπερνώντας τα ιζηματογενή στρώματα, εφόσον τα τελευταία είναι διαπερατά. Πέραν αυτής της φυσικής διεργασίας, άλλοι εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να επισπεύσουν αυτή τη μετανάστευση..

2.3.1 Σεισμική δραστηριότητα

Όταν τα σεισμικά κύματα διαπερνούν χαλαρά, κορεσμένα σε νερό κυρίως αμμούχα ιζήματα, τείνουν να τα συμπυκνώσουν ώστε να καταλάβουν μικρότερο όγκο, με αποτέλεσμα την εκτόπιση του νερού των πόρων. Εάν όμως τα ρευστά των πόρων δεν μπορέσουν να διαφύγουν, η πίεση τους αυξάνει. Όταν η πίεση των ρευστών ξεπεράσει την κατακόρυφη τάση λόγω του βάρους των υπερκείμενων στρωμάτων, οι κόκκοι των ιζημάτων χάνουν την επαφή μεταξύ τους και συμπρασύρονται από το νερό των πόρων, και το ιζημα μαζί με το νερό των πόρων συμπεριφέρεται συνολικά ως ρευστό. Το φαινόμενο καλείται ρευστοποίηση. Αποτέλεσμα της ρευστοποίησης των ιζημάτων του πυθμένα σε οριζόντιες σχεδόν περιοχές είναι οι “αμμοφουσκάλες” (sand-boils) ή «αμμώδεις ράχες» όταν παρουσιάζουν επιμήκη μορφή και οι εγκατακρημνισιγενείς κοιλότητες (collapse depressions).

Η επίδραση της παρουσίας φυσαλίδων αερίου στα ιζήματα όταν αυτά δέχονται την επίδραση ενός σεισμού δεν είναι ξεκάθαρη, με δύο να είναι τα πιο πιθανά σενάρια. Η φόρτιση από το σεισμό, η οποία είναι κατά κανόνα κυκλική, απορροφάται και μετριάζεται από την συμπίεση των αερίων, ή η παρουσία αερίου μειώνει τη διατμητική αντοχή των ιζημάτων με αποτέλεσμα τα ιζήματα να είναι πιο επιρρεπή στην διάρρηξη (Judd and Hovland, 2007). Σε οποιαδήποτε περίπτωση η επίπτωση των σεισμών στην ενεργοποίηση διαφυγών ρευστών έχει αναφερθεί στην Καλιφόρνια στην περιοχή Malibu point μετά από ένα σεισμό με μέγεθος $M=6.6R$ το 1971 (Clifton et al., 1971) και στο δέλτα του ποταμού Klamath μετά από ένα

σεισμό με μέγεθος $M=7R$ το 1980 (Field et al., 1982; Field and Jennings, 1987), στην Ελλάδα μετά από τους σεισμούς της Πάτρας το 1993 (Hasiotis et al., 1996), μετά από το σεισμό του Αιγίου το 1995 (Soter, 1999), στην θάλασσα του Μαρμαρά (Kuksu et al., 2005; Geli et al., 2008).

Από την άλλη πλευρά έχουν καταγραφεί ενδείξεις ότι οι διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα μπορεί να αποτελούν πρόδρομα φαινόμενα σεισμών. Πριν από το σεισμό της Πάτρας το 1993, καταγράφηκαν τρεις απότομες αυξήσεις της θερμοκρασία σε ένα υποθαλάσσιο σταθμό κοντά στην παράκτια ζώνη της Πάτρας (Hasiotis et al., 1996). Πριν από το σεισμό του Αιγίου το 1995, ο Soter (1999) αναφέρει μαρτυρίες για περίεργα φαινόμενα που παρατηρήσανε κάτοικοι της ευρύτερης περιοχής στο θαλάσσιο περιβάλλον. Σύμφωνα με τους Gold and Soter (1985); Soter (1999) τα ρευστά δεν μπορούν να προσδώσουν την ενέργεια που χρειάζεται για να συμβεί ένας σεισμός, αυτή προέρχεται από την τεκτονική τάση, αλλά η άνοδος ρευστών μπορεί να αυξήσει την πίεση των ρευστών των πόρων, μειώνοντας την αντοχή των πετρωμάτων για θραύση. Τα ρευστά δηλαδή λειτουργούν ως 'λιπαντικά' προκαλώντας το σεισμό.

2.3.2 Κύματα και Παλίρροιες

Οι μεταβολές της υδροστατικής πίεσης που προκαλούνται από τα μεγάλα κύματα και τις παλίρροιες επηρεάζουν τις τρεις φάσεις των ιζημάτων (στερεά, υγρή και αέρια) που περιέχουν αέριους υδρογονάνθρακες. Η στερεά και υγρή φάση είναι ασυμπίεστες ενώ η αέρια συμπίεστη. Η ελαστική συμπεριφορά των ιζημάτων που περιέχουν ρευστά (αέρια) ελέγχεται από τους νόμους του Henry όπου η διαλυτότητα των αερίων αυξάνεται με την πίεση και το νόμο του Boyle όπου ο όγκος των αερίων μειώνεται όταν αυξάνεται η πίεση (Sills and Nageswaran, 1984). Στα χονδρόκοικα ιζήματα η συστολή των αερίων που προκαλείται από την αύξηση της πίεσης μπορεί να επιτρέψει στις φυσαλίδες (οι οποίες έχουν ελαττωθεί σε όγκο) να διαπεράσουν από κενά όπου πριν τη συστολή δεν ήταν δυνατό. Στα λεπτόκοικα ιζήματα η μείωση της υδροστατικής πίεσης θα προκαλέσει αύξηση της μερικής πίεσης των αερίων η οποία με τη σειρά της μπορεί να προκαλέσει αστοχία (θραύση) των ιζημάτων. Επίσης η αύξηση της πίεσης των αερίων, θα οδηγήσει τα αέρια σε διαλυτοποίηση, προκαλώντας βαθμωτή μεταβολή της συγκέντρωσης τους εγιάρσια στη δίοδο διαφυγής με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ροή λόγω διάχυσης (Sills et al., 1991). Αυτό είναι ικανό να μετασχηματίσει τις διόδους διαφυγής σε βαλβίδες που ανοίγουν όταν η πίεση αυξάνεται και τα ρευστά διαφεύγουν, και κλείνουν όταν η πίεση μειώνεται.

2.3.3 Μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης

Η μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης επηρεάζει την υδροστατική πίεση που δέχονται τα ιζήματα. Οι Mattson and Likens (1990) διαπίστωσαν ότι οι μεγαλύτερες διαφυγές ρευστών σε μία ρηχή λίμνη προκλήθηκαν κατά τη διάρκεια χαμηλών βαρομετρικών συστημάτων. Σύμφωνα με τους McQuiad and Mercier (1991) δεν είναι σημαντικές οι απόλυτες τιμές της πίεσης αλλά οι πολύ απότομες μεταβολές αυτής. Στα βαθιά νερά οι μεταβολές της πίεσης δεν είναι σημαντικές καθώς η συμβολή τους στην υδροστατική πίεση είναι πολύ μικρή αλλά στα ρηχά νερά και κυρίως σε περιοχές με μικρές παλίρροιες, απότομες πτώσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης μπορούν να προκαλέσουν διαφυγές ρευστών.

2.3.4 Φόρτιση και αποφόρτιση ιζημάτων

Ο υψηλός ρυθμός ιζηματογένεσης, κυρίως σε δελταϊκά περιβάλλοντα, μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πίεσης των υποκείμενων ιζημάτων που περιέχουν ρευστά αλλά δεν μπορούν να απολέσουν τα ρευστά τους όταν έχουν μικρή διαπερατότητα. Η αδυναμία αποστράγγισης των ιζημάτων μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη πυκνότητα σε σχέση με την πυκνότητα των υπερκειμένων. Η αντιστροφή της πυκνότητας μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα διαπυρισμού και τη δημιουργία κυρίως λασπούχων διαπύρων (Prior and Coleman, 1982; Judd and Hovland, 2007).

Τα ρευστά που ανέρχονται στην ιζηματογενή στήλη είναι πιθανόν να παγιδευτούν κάτω από αδιαπέρατα λεπτόκοκκα ιζήματα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πίεση τους ώστε να κατορθώσουν να διαπεράσουν τα στρώματα. Στην περίπτωση κατά την οποία η κατακόρυφη πίεση (υπερκειμένων) στα ιζήματα μειωθεί απότομα, όπως για παράδειγμα μετά από μία βαρυντική μετακίνηση, η διατμητική αντοχή των ιζημάτων θα μειωθεί καθώς εξαρτάται από την κατακόρυφη τάση με αποτέλεσμα την θραύση των υπερκειμένων ιζημάτων από τα υπό πίεση ρευστά. Κρατήρες διαφυγής ρευστών έχουν καταγραφεί στη Βόρεια Θάλασσα, στη Storegga Slide (Paul et al., 2008), περιοχή με τις μεγαλύτερες βαρυντικές μετακινήσεις μαζών που έχουν καταγραφεί σε Ολοκαινικά ιζήματα (Haflidason et al., 2004). Τα ιζήματα με αυξημένη παρουσία αερίων υπέστησαν ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια της ολίσθησης και δείχνουν διαφορετικούς μηχανισμούς ροής σε σχέση με αυτά που έχουν μικρή παρουσία αερίων, ενώ σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν ενδείξεις παρουσίας αερίων τα ιζήματα παρέμειναν ανέπαφα (Bünz et al., 2005). Η κατολίσθηση αυτή πιθανόν να προκλήθηκε από το λιώσιμο των υδριτών που υπάρχουν στην περιοχή κατά τη τελευταία παγετώδη περίοδο (Bryn et al. 2005; Paull et al., 2008). Επίσης η παρουσία αέριας φάσης στα ρευστά των πόρων μπορεί να είναι ένας

σημαντικός παράγοντας πυροδότησης βαρυτικών μετακινήσεων μαζών (Papatheodorou et al., 1997; Lykousis et al., 2009; Sultan et al., 2004).

2.3.5 Ανθρωπογενείς επιδράσεις

Η εξισορρόπηση των πιέσεων μεταξύ των διαφορετικών φάσεων των ρευστών των πόρων είναι σημαντική καθώς κάθε μεταβολή των τάσεων που προκαλείται από τη δημιουργία κατασκευών πάνω στον πυθμένα μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα διαφυγών. Επίσης ατυχήματα έχουν προκληθεί όταν γεωτρήσεις διαπερνούν ιζήματα που υπάρχουν αέρια, τα οποία είναι υπό πίεση και βρίσκουν διαμέσου της γεώτρησης ένα διάδρομο ώστε να ανέλθουν προς τον πυθμένα της θάλασσας (Rehder et al., 1998). Από την άλλη πλευρά η άντληση αερίων από ρηχούς ταμιευτήρες προκαλεί μείωση της πίεσης των ρευστών των πόρων με αποτέλεσμα τη μείωση των διαφυγών (Quigley et al., 1999). Σύμφωνα με τους Hornafius et al. (1999), η άντληση υδρογονανθράκων έχει ευεργετική επίδραση προς το περιβάλλον, μειώνοντας τη ρύπανση από την είσοδο φυσικών υδρογονανθράκων στο θαλάσσιο περιβάλλον και τη διαφυγή υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με τους Kvalstad et al. (2001) οι ανθρωπογενείς δράσεις που μπορεί να προκαλέσουν μεταβολές στην πίεση των ρευστών των πόρων και κατ' επέκταση διαφυγές ρευστών είναι:

- οι γεωτρήσεις που μπορεί προκαλέσουν μεγάλες διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα και να σχηματιστούν κρατήρες ,
- υπόγειες εκρήξεις που μεταβάλλουν την πίεση των πόρων στα ρηχά ιζήματα, και μπορεί να προκαλέσουν βαρυτικές μετακινήσεις,
- η εξόρυξη πετρελαίου που οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας γύρω από τις γεωτρήσεις, μπορεί να οδηγήσει στο λιώσιμο των υδριτών (μεταβάλλοντας τη διατμητική αντοχή των ιζημάτων),
- η εξάντληση των ταμιευτήρων πετρελαίου μπορεί να οδηγήσει στην καθίζηση των μητρίκων πετρωμάτων, με αποτέλεσμα τη μεταβολή των τάσεων στα υπερκείμενα στρώματα,
- οι υποθαλάσσιες κατασκευές και κυρίως οι κατασκευές βαρύτητας που αυξάνουν την κατακόρυφη τάση, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της πίεσης των πόρων.

2.4 Η συμβολή των διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα ρευστά που διαφεύγουν από τον πυθμένα της θάλασσας, όπως ήδη έχει αναπτυχθεί, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι χημικές, οι φυσικές και οι βιολογικές παράμετροι του θαλασσινού νερού φαίνεται να επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις διαφυγές ρευστών. Ένα μέρος των διαφυγών διαπερνά την υδρόσφαιρα και εισέρχεται στην ατμόσφαιρα. Το μεθάνιο είναι το πιο σημαντικό αέριο των ρευστών καθώς είναι αυτό που κυριαρχεί στα ρευστά που διαφεύγουν, ενώ είναι ένα από τα πιο σημαντικά αέρια που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Συνεπώς η συνεισφορά του παγκόσμιου Ωκεανού στο ατμοσφαιρικό μεθάνιο και κατ'επέκταση του «παγκόσμιου» θαλάσσιου πυθμένα είναι σημαντική όχι μόνο για το σημερινό κλίμα αλλά και τις αλλαγές στο κλίμα διαμέσου του γεωλογικού χρόνου.

2.4.1 Μεθάνιο προς την ατμόσφαιρα

Το 2001 στην έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής του Ο.Η.Ε. για την κλιματική αλλαγή (IPCC) αναφέρεται ότι η φυσική και η ανθρωπογενής συνεισφορά σε μεθάνιο ανέρχεται 598 Tg/year (Ehhalt et al., 2001). Στην εικόνα 2.19 δίνονται τα ποσοστά που συνεισφέρει η κάθε πηγή. Ο Etiope, 2004 υπολόγισε την συνεισφορά μεθανίου από φυσικές και από ανθρωπογενείς πηγές και διαχώρισε τις γεωλογικές πηγές μεθανίου (εικόνα 2.20). Αρκετοί υπολογισμοί για τη συνεισφορά των διαφυγών μεθανίου από τον πυθμένα των θαλασσών έχουν πραγματοποιηθεί άλλα περιορίζονται σε τοπικό επίπεδο (Judd et al., 1997; Dimitrov, 2002; Garcia-Gil, 2003). Οι Kvenolden et al., 2001 συνυπολογίζοντας όλες τις εκτιμήσεις για το ποσό του μεθανίου που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα από διαφυγές ρευστών του πυθμένα το υπολόγισαν σε περίπου 20 Tg/year. Αυτός ο υπολογισμός σύμφωνα με τον Judd, 2004, έρχεται σε αντιδιαστολή με τα αποτελέσματα της IPCC καθώς στους υπολογισμούς δέχθηκαν ότι όλο το απολιθωμένο μεθάνιο (ελεύθερο ^{-14}C) προέρχεται από τη καύση άνθρακα. Η πλειονότητα του μεθανίου που διαφεύγει από τον πυθμένα είναι ελεύθερο ^{-14}C . Συνεπώς ένα μέρος του ελεύθερο- ^{-14}C μεθανίου που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα προέρχεται από διαφυγές από τον πυθμένα και εάν προστεθεί επιπλέον το μεθάνιο που προέρχεται από γεωλογικές πηγές στη χέρσο (Etiope and Klunssman, 2002), τότε η συνεισφορά από την καύση του άνθρακα από τον άνθρωπο είναι μικρότερη από αυτή που είχε αρχικά υπολογιστεί.

Εικόνα 2.19. Το μεθάνιο που διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα σε Tg/year και το ποσοστό της κάθε πηγής επί του συνόλου σύμφωνα με την IPCC (Ehhalt et al., 2001).

Εικόνα 2.20. Το μεθάνιο που διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα σε Tg/year και το ποσοστό της κάθε πηγής επί του συνόλου σύμφωνα με τον Etiope, 2004.

2.4.2 Παγκόσμια κλιματική αλλαγή

Οι κύκλοι του Milankovitch επηρεάζουν το 50% της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής (Raynaud et al., 1993). Εάν αυτός ήταν ο μόνος παράγοντας που επηρέαζε το κλίμα τότε οι αλλαγές από παγετώδεις σε μεσοπαγετώδεις περιόδους θα ήταν πιο ομαλές. Οι μετρήσεις μεθανίου στους πάγους της Γροιλανδίας (Chappellaz et al., 1993) και τις Ανταρκτικής (Jouzel et al., 1993) έδειξαν την πολύ στενή σχέση μεταξύ της αλλαγής της θερμοκρασίας και των μεταβολών του μεθανίου στην ατμόσφαιρα (εικόνα 2.21). Δεν είναι σίγουρο όμως εάν οι μεταβολές του μεθανίου ήταν η αιτία για την κλιματική αλλαγή ή ήταν αποτέλεσμα αυτής (Judd and Hovland, 2007).

Εικόνα 2.21. Διαγράμματα των παγκόσμιων μεταβολών της στάθμης της θάλασσας, της θερμοκρασίας και του μεθανίου στην ατμόσφαιρα τα τελευταία 160.000 χρόνια (τροποποίηση από Judd et al., 2002).

2.4.3 Διαφυγές μεθανίου και κύκλος του άνθρακα

Οι φυσικές διαφυγές μεθανίου από τον πυθμένα επιδρούν στην υδρόσφαιρα, στη ατμόσφαιρα και στη βιόσφαιρα και συνεπώς συνεισφέρουν στον κύκλο του άνθρακα. Στις περισσότερες περιγραφές του κύκλου του άνθρακα η μοναδική φυσική διεργασία ανταλλαγής του άνθρακα μεταξύ πυθμένα και υδάτινης στήλης είναι η ταφή του οργανικού υλικού το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε πετρέλαιο, υδρίτες και ασβεστόλιθους. Στην αντίθετη κατεύθυνση δίνεται η εξαγωγή πετρελαίου και φυσικό αερίου. Όμως στο κύκλο του άνθρακα στο θαλάσσιο περιβάλλον υπάρχουν και οι παρακάτω διεργασίες (εικόνα 2.22):

- Η μετανάστευση μεθανίου στον πυθμένα
- Η δέσμευση μεθανίου στους υδρίτες
- Η κατανάλωση του μεθανίου κοντά στον πυθμένα και η ροή του στη βιόσφαιρα και στην λιθόσφαιρα (μεθανογενή-αυθιγενή ανθρακικά πετρώματα)
- Η ροή μεθανίου προς την υδάτινη στήλη
- Η ροή προς την υδρόσφαιρα που έχει αποτέλεσμα τη μικροβιακή οξείδωση και συνεπώς τη ροή προς τη βιόσφαιρα
- Η ροή προς την ατμόσφαιρα.

Εικόνα 2.22. Ο κύκλος του άνθρακα στο θαλάσσιο περιβάλλον (τροποποίηση από Judd and Hovland, 2007).

2.5 Παγκόσμια εξάπλωση διαφυγών ρευστών

Διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα άλλα και αέριοι υδρογονάνθρακες στα επιφανειακά θαλάσσια ιζήματα που σχετίζονται με διαφυγές έχουν εντοπιστεί και καταγραφεί σε όλη την έκταση του παγκόσμιου Ωκεανού. Παρατηρείται όμως μια μεγαλύτερη παρουσία στο βόρειο ημισφαίριο και κυρίως γύρω από τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και την Ευρώπη. (εικόνα 2.23). Η μεγαλύτερη παρουσία στο βόρειο ημισφαίριο δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική εξάπλωση των αερίων στα θαλάσσια ιζήματα άλλα οφείλεται στην έλλειψη ερευνητικών δεδομένων στο νότιο ημισφαίριο.

Διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα της θάλασσας έχουν εντοπιστεί σε διάφορα γεωλογικά περιβάλλοντα από τις παράκτιες περιοχές έως τις αβυσσικές πεδιάδες των ωκεανών, στα όρια και στο εσωτερικό των λιθοσφαιρικών πλακών. Στο Παράρτημα II δίνεται μία συνοπτική περιγραφή των περιβαλλόντων όπου εντοπίζονται διαφυγές ρευστών.

Στον πίνακα 1 που δίνεται στο παράρτημα II παρουσιάζονται συνοπτικά οι περιοχές όπου έχουν εντοπιστεί διαφυγές ρευστών ή η παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα ιζήματα και οι συνοδές τους γεωμορφές.

Εικόνα 2.23. Παγκόσμιος χάρτης στον οποίο έχουν τοποθετηθεί θαλάσσιες περιοχές με παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα επιφανειακά ιζήματα και συνοδές γεωμορφές.

Κεφάλαιο 3^ο Περιοχές Μελέτης - Γεωλογική Επισκόπηση

3 Περιοχές Μελέτης – Γεωλογική Επισκόπηση

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής επιλέχθηκαν τρεις περιοχές (εικόνα 1.1) όπου μελετήθηκαν τα ρευστά που διαφεύγουν και η σχέση τους με τις γεωμορφές που σχηματίζουν. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η φύση και ο χημισμός των ρευστών που διαφεύγουν, ο ρυθμός διαφυγής ρευστών προς την υδάτινη στήλη, οι μηχανισμοί πυροδότησης των διαφυγών και οι γεωμορφές που σχηματίζουν, η επίδραση τους στις τοπικές θαλάσσιες βιοκοινωνίες και στην ατμόσφαιρα. Οι περιοχές είναι:

- το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών στο ΝΑ τμήμα του Πατραϊκού κόλπου στην παράκτια ζώνη της Πάτρας,
- το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών στον Όρμο του Ελαιώνα στο νότιο περιθώριο του Δυτικού Κορινθιακού κόλπου και
- η περιοχή του Κατακόλου.

Στο παρών κεφάλαιο δίνεται μία σύντομη περιγραφή των φυσιογραφικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών της κάθε περιοχής που μελετήθηκε.

3.1 Πατραϊκός Κόλπος

3.1.1 Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά

Ο Πατραϊκός κόλπος είναι μια αβαθής σχετικά θαλάσσια λεκάνη, ελλειψοειδούς σχήματος, η οποία περικλείεται από τις ΒΔ ακτές της Πελοποννήσου και τις νότιες ακτές του νομού Αιτωλοακαρνανίας της Στερεάς Ελλάδας και ενώνει τον βαθύτερο Κορινθιακό κόλπο με το Ιόνιο Πέλαγος μέσω του στενού Ρίου-Αντιρρίου. Το μέγιστο βάθος του κόλπου βρίσκεται στο κέντρο του που φτάνει τα 132m ενώ το μεγαλύτερο μέρος αυτού δεν ξεπερνά το βάθος των 80m. Το μέγιστο μήκος του (μεγάλος άξονας, διεύθυνση Α-Δ) είναι 33km ενώ το μέγιστο πλάτος του (μικρός άξονας, διεύθυνση Β-Ν) είναι 22km (εικόνα 3.1).

Η επιφάνεια του καλύπτει 400km² και περιέχει όγκο νερού 45km³ περίπου. Ο Πατραϊκός κόλπος επικοινωνεί στα δυτικά με το Ιόνιο με ένα διάυλο μέσου πλάτους 12km και βάθους 70m, μεταξύ του ακρωτηρίου Πάππας και της λιμνοθάλασσας του Μεσολογίου, ενώ ανατολικά επικοινωνεί με τον Κορινθιακό κόλπο μέσω του στενού Ρίου-Αντιρρίου.

Εικόνα 3.1. Βυθομετρικός χάρτης του Πατραϊκού κόλπου.

3.1.2 Ωκεανογραφικά χαρακτηριστικά

Το νερό του Πατραϊκού κόλπου είναι μίγμα των νερών του Ιονίου και του Κορινθιακού στο οποίο επιδρά και το νερό που εισέρχεται μέσω των ποταμών. Από την κατανομή των φυσικών παραμέτρων θερμοκρασίας και αλατότητας φαίνεται ότι ο Πατραϊκός κόλπος παρουσιάζει

κατακόρυφη στρωμάτωση κατά τη θερινή περίοδο και η υδάτινη στήλη του διακρίνεται σε δυο στρώματα: α) ένα επιφανειακό στρώμα πάχους 15 μέτρων (θερμοκρασίας $T = 25^{\circ}\text{C}$, αλατότητας $S = 38.5\text{‰}$) και β) ένα υποεπιφανειακό, που εκτείνεται μέχρι τον πυθμένα (θερμοκρασίας $T = 13.8^{\circ}\text{C}$, αλατότητας $S = 38.5\text{‰}$), ενώ το χειμώνα η υδάτινη στήλη ομογενοποιείται με μέση θερμοκρασία 15°C και αλατότητα 38.3‰ , λόγω της ισχυρής επίδρασης των ανέμων που πνέουν στην περιοχή (Lascaratos et al, 1989, Αχιλλεόπουλος, 1990). Το παλιρροιακό κύμα στον Πατραϊκό κόλπο είναι ημihμερήσιου τύπου με $F = (K1+O1)/(M2+S2) < 0.25$. Δηλαδή εμφανίζονται δύο πλήμμες και δύο ρηχίες την ημέρα οι οποίες έχουν περίπου το ίδιο ύψος. Το πλάτος των ημερήσιων συνιστωσών είναι συγκριτικά μικρότερο. Το μέσο παλιρροιακό εύρος είναι 16cm και αυξάνεται από τα δυτικά προς τα ανατολικά του κόλπου (Αχιλλεόπουλος, 1990). Τα παλιρροιακά ρεύματα, σχηματίζουν στάσιμες ταλαντώσεις κατά μήκος του Πατραϊκού και το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι ταχύτητες των ρευμάτων, κατά τη φάση της πλήμμης και της ρηχίας, να είναι μηδενικές. Ενώ, κατά τη διάρκεια της πλημμυρίδας και της αμπώτιδας, τα νερά εισέρχονται και εξέρχονται, αντίστοιχα, από τον κόλπο προς το Ιόνιο, ακολουθώντας μια ευθύγραμμη και περιοδικά εναλλασσόμενη (ανατολικά – δυτικά) ροή (Αχιλλεόπουλος, 1990). Η διαφορά στους χρόνους άφιξης της πλήμμης, μεταξύ των ημερήσιων και ημihμερήσιων συνιστωσών, η διατάραξη των ισοπαλιρροιακών τους γραμμών, η επίδραση του ανέμου αλλά και η τοπογραφία της περιοχής έχουν σαν αποτέλεσμα την περιστροφική κίνηση των υδάτων του Πατραϊκού (κυκλωνική, αντικυκλωνική (Αχιλλεόπουλος, 1990).

3.1.3 Γεωλογία

Ο Πατραϊκός κόλπος είναι μία ενεργή Πλειοκαινική – Τεταρτογενής τάφρος η οποία αναπτύσσεται εγκάρσια στη διεύθυνση των εξωτερικών ελληνίδων. Στα Δυτικά συνδέεται με την λεκάνη της Κεφαλονιάς στο Ιόνιο πέλαγος ενώ στα ανατολικά συνδέεται με τον Κορινθιακό κόλπο με του στενού του Ρίου. Βορειανατολικά περιορίζεται από τα βουνά Κλόκοβα και Βαράσοβα με υψόμετρο περίπου 1000 μέτρα αποτελούμενα από Κρητιδικούς ασβεστόλιθους και Ηωκαινικό φλύσχη της ζώνης Γαβρόβου – Τριπόλεως. Βορειοδυτικά περιλείεται από Τεταρτογενείς δελταϊκές αποθέσεις των ποταμών Αχελώου και Εύηνου. Νότια περιορίζεται από Πλειοκαινικές – Τεταρτογενής θαλάσσιες και λιμνοθάλασσες αποθέσεις με μέγιστο πάχος 1500 μέτρα.

3.1.3.1 Τεκτονικά και ιζηματολογικά χαρακτηριστικά

Τα μεγαλύτερα βάθη του Πατραϊκού κόλπου, με μέγιστο βάθος 135 μέτρα, εντοπίζονται σε μία εσωτερική τάφρο διεύθυνσης ΔΒΔ-ΑΝΑ που ελέγχεται από κανονικά ενεργά ρήγματα. Η

τάφρος του Πατραϊκού αποτελεί το δυτικό άκρο της ζώνης εφελκυσμού B-N που διαχωρίζει την Πελοπόννησο με τη Στερεά Ελλάδα, και σχηματίζει μαζί με την κορινθιακή τάφρο μία διαδοχική (en-echelon) δομή (Melis et al., 1989) που συνδέονται μεταξύ τους με ρήγματα μετασχηματισμού (transfer-faults). Τα κυρίως κανονικά ρήγματα εντοπίζονται στο νότιο τμήμα της τάφρου ενώ στο βόρειο τμήμα υπάρχουν αντιθετικά και συνθετικά κανονικά ρήγματα (Ferentinos et al., 1985) (εικόνα 3.2). Τα ρήγματα αυτά σχετίζονται με το μεγάλο ρήγμα της Βόρειας Πελοποννήσου (NPMF) (εικόνα 3.2) (Flotte et al., 2005). Το νοτιοανατολικό τμήμα του Πατραϊκού και η παράκτια ζώνη επηρεάζεται από το ρήγμα μετασχηματισμού Ρίο-Πάτρα (RPTF) (Flotte et al., 2005). Το χερσαίο τμήμα στα νότια του κόλπου χαρακτηρίζεται από δύο κύριες διευθύνσεις ρηγμάτων ΑΒΑ-ΔΝΔ και ΒΒΑ-ΝΝΔ με ρομβοειδή διάταξη (Zelilidis et al., 1988). Στα βόρεια της τάφρου εμφανίζεται η προδελταική κατωφέρεια του ποταμού Εύηνου. Στο δυτικό άκρο του κόλπου, μεταξύ του ακρωτηρίου Άραξου και της λιμνοθάλασσας του Μεσολογγίου τα βάθη είναι μικρά (<45 μέτρα) ως αποτέλεσμα της προσέλασης του ποταμού Αχελώου κατά το τέλος του Πλειστόκαινου έως τις αρχές του Ολοκαινού.

Εικόνα 3.2. Τεκτονικός χάρτης του Πατραϊκού κόλπου όπου σημειώνεται η θέση του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών (Κ.Δ.Ρ.). (Τροποποίηση από Ferentinos et al., 1985; Flotte et al., 2005).

Ο Πατραϊκός κόλπος καλύπτεται από μία επιφανειακή ενότητα, πάχους 20 έως 50 μέτρων, με κυρίως διάφανο ακουστικό χαρακτήρα στα σεισμικά προφίλ, η οποία επικάθεται με

γωνιώδη ασυμφωνία στα παλαιότερα ιζήματα (εικόνα 4.3) (Ferentinos et al, 1985; Chronis et al, 1991; Papatheodorou et al, 1993; Hasiotis et al, 1996). Η ασυμφωνία τοποθετείται στο όριο Πλειστοκαίνου - Ολοκαίνου (Ferentinos et al, 1985; Papatheodorou et al, 1993; Hasiotis et al, 1996). Οι Chronis et al, 1991, προτείνουν ότι η ασυμφωνία τοποθετείται στο ισοτοπικό στάδιο 2. Η επιφανειακή ενότητα μπορεί να διακριθεί σε τρεις υποενότητες (Chronis et al, 1991). Η κατώτερη υποενότητα, πάχους έως 10 μέτρα, χαρακτηρίζεται από υψηλής ανακλαστικότητας ανακλάσεις και εμφανίζεται μόνο στα βαθύτερα τμήματα του κόλπου (βάθος νερού >75 μέτρα). Η ενδιάμεση υποενότητα, πάχους 10-20 μέτρα, χαρακτηρίζεται από διάφανο ακουστικό χαρακτήρα με απουσία εσωτερικών ανακλάσεων, ενώ η ανώτερη υποενότητα με πάχος 10-20 μέτρα χαρακτηρίζεται από την παρουσία εσωτερικών ανακλάσεων με μειούμενη ένταση ανακλαστικότητας προς τα περιθώρια του κόλπου. Κάτω από τη γωνιώδη ασυμφωνία έχουν αναγνωριστεί 4 ακουστικές φάσεις (Chronis et al, 1991). Στο βόρειο τμήμα του κόλπου η ασυμφωνία βρίσκεται πάνω στις δελταϊκές αποθέσεις του Εύηνου ποταμού (ακουστική φάση 1), στο νότιο τμήμα επάνω σε μία ελαφρά πτυχωμένη και ρηγματομένη ακολουθία Πλειο-πλειστοκαινικής ηλικίας (ακουστική φάση 2). Στο μεγαλύτερο μέρος του κεντρικού τμήματος του κόλπου η ασυμφωνία βρίσκεται επάνω σε μία ακολουθία από ασαφής σεισμικές ανακλάσεις, λόγω όμως της μεγάλης ανακλαστικότητας της ασυμφωνίας, δεν επιτρέπεται η περαιτέρω διεξόδυση των ηχητικών κυμάτων (ακουστική φάση 3). Σε μερικά τμήματα του κεντρικού τμήματος του κόλπου, όπου η ανακλαστικότητα της ασυμφωνίας δεν είναι πολύ μεγάλη, διακρίνεται μία ακουστικά διάφανη ακολουθία με μερικούς υποπαράλληλους ανακλαστήρες (ακουστική φάση 4).

Εικόνα 3.3. Τομογραφία 3.5kHz κάθετα στη κεντρική τάφρο του Πατραϊκού κόλπου όπου φαίνεται η βασική ασυμφωνία και οι τρεις υποενότητες της ανώτερης ενότητας ιζημάτων (από Chronis et al., 1991).

Τα Πλειο – Πλειστοκαινικά ιζήματα που αναγνωρίστηκαν σε γεωτρήσεις στην ευρύτερη περιοχή της πόλης των Πατρών χαρακτηρίζονται από δύο ενότητες (Koukis et al., 2005). Μία ανώτερη, πάχους 50 μέτρων, αποτελούμενη από αργιλούχες μάργες με πηλούς, άμμους, χάλικες και κροιάλες και μία κατώτερη, αποτελούμενη από πηλούχες μάργες και αμμούχους πηλούς με πάχος τουλάχιστον 150 μέτρα.

3.1.3.2 Πλειο – Πλειστοκαινική και Ολοκαινική εξέλιξη

Η εξέλιξη του κόλπου κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενές είναι συνέπεια της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ενεργής τεκτονικής βύθισης, της μεγάλης τροφοδοσίας με ποτάμια ιζήματα και της παγκόσμιας μεταβολής της στάθμης της θάλασσας (Chronis et al., 1991). Η μορφολογία του Πατραϊκού κόλπου έχει δημιουργηθεί από τεκτονική βύθιση. Το κεντρικό τμήμα του κόλπου καταβυθίζεται με ρυθμό 3-mm/y ενώ στο βόρειο τμήμα ο ρυθμός είναι μικρότερος. Ο τύπος της καταβύθισης σχετίζεται με την ύπαρξη του μεγάλου λιστρικού ρήγματος στο νότιο περιθώριο. Μόνο στις περιοχές των στομιών των ποταμών η ιζηματογένεση έχει μεγαλύτερο ρυθμό από το ρυθμό καταβύθισης. Τα μικρά βάθη του Πατραϊκού κόλπου, καθώς επίσης και η παρουσία της γωνιώδους ασυμφωνίας η οποία τοποθετείται από τους Ferentinos et al, 1985 μεταξύ των Ολοκαινικών και των παλαιότερων ιζημάτων και από τους Chronis et al, 1991, στο ισοτοπικό στάδιο 2 της τελευταίας παγετώδους περιόδου δείχνει ότι ο Πατραϊκός κόλπος κατά το τέλος του Πλειστοκαινού ήταν χέρσος. Πάνω από τη γωνιώδη ασυμφωνία, η δελταϊκή προέλαση μεταξύ 13 και 10.5ka και στο μέσο του Ολοκαινού ήταν μεγάλη. Η είσοδος του κόλπου από τα Δυτικά είναι ρηχή ως αποτέλεσμα της προέλασης του Αχελώου κατά τη διάρκεια του τέλους του Πλειστοκαινού και της αρχής του Ολοκαινού, και δεν οφείλεται στην τεκτονική.

3.2 ΔΥΤΙΚΟΣ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ – ΟΡΜΟΣ ΕΛΛΙΩΝΑ

3.2.1 Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά

Ο Κορινθιακός κόλπος αποτελεί μια επιμήκη θαλάσσια λειάνη προσανατολισμένη σε διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ, η οποία διατέμνει την κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα χωρίζοντας την Στερεά Ελλάδα από την Πελοπόννησο. Ο Κορινθιακός κόλπος εκτείνεται από το πορθμό του Ρίου – Αντιρρίου στα δυτικά έως και τον κόλπο των Αλκυονίδων στα ανατολικά. Το συνολικό μήκος του κόλπου ξεπερνά τα 115 km ενώ το πλάτος του κυμαίνεται από 5 έως και 30 km περίπου. Πρόκειται για μια απομονωμένη από την ανοιχτή θάλασσα, θαλάσσια λειάνη. Στα δυτικά ο Κορινθιακός κόλπος επικοινωνεί με το Ιόνιο πέλαγος μέσω του Πορθμού του Ρίου – Αντιρρίου και του Πατραϊκού κόλπου (Εικόνα 3.4). Στα ανατολικά η τεχνητή διώρυγα του Ισθμού επιτρέπει από το 1893 την επικοινωνία του με τον Σαρωνικό κόλπο.

Εικόνα 3.4. Βυθομετρικός και τεκτονικός χάρτης του Κορινθιακού κόλπου (από Στεφάτος, 2005)

3.2.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά Δυτικού Κορινθιακού κόλπου

Ο Κορινθιακός κόλπος χαρακτηρίζεται ως μια μετα-απλική υποθαλάσσια ιζηματογενή λεκάνη, η οποία διατέμνει σχεδόν κάθετα τις ενότητες των εσωτερικών Ελληνίδων (Brooks & Ferentinos, 1984; Παπανικολάου κ.α., 1997) και αποτελεί τμήμα της Κορινθιακής τεκτονικής τάφρου (Doutsos et al., 1988). Η Κορινθιακή τάφρος είναι μία ενεργός τεκτονική τάφρος ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνσης της οποίας οι πλευρές οριοθετούνται από επάλληλα ενεργά κανονικά ρήγματα (εικόνα 3.4).

Η ιζηματογένεση στον Κορινθιακό κόλπο είχε και έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό παλαιών και σύγχρονων δελταϊκών ριπιδίων τα οποία προελαύνουν προς βορρά από τα νότια περιθώρια του κόλπου. Τα προγενέστερα (Πλειόκαινο - Τεταρτογενές) δελταϊκά ριπίδια βρίσκονται σήμερα ανυψωμένα έως και 1000 με 1200m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στις βόρειες ακτές της Πελοποννήσου (Ori, 1989; Poulimenos et al., 1993; Zelilidis and Kontopoulos, 1996). Τα δελταϊκά αυτά ριπίδια αναγνωρίστηκαν ως τύπου Gilbert (Ori, 1989; Doutsos & Piper, 1990), ενώ οι Zelilidis and Kontopoulos, (1996) αναγνώρισαν στο δυτικό Κορινθιακό κόλπο, έναν καινούργιο υποτύπο των κατηγορίας Gilbert δελταϊκών ριπιδίων, τα τραπεζοειδή δελταϊκά ριπίδια. Τα τραπεζοειδή δελταϊκά ριπίδια, χαρακτηρίζονται από την απουσία του τρίτου και κατώτερου τμήματος (bottomsets) ενός δελταϊκού ριπιδίου τύπου Gilbert. Ο ιδιαίτερος αυτός τύπος ριπιδίων αποδίδεται από τους ερευνητές στις ιδιαίτερες

τεκτονικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή και εμπόδιζαν την απόθεση στο κατώτερο τμήμα των ριπιδίων αυτών. Τα σύγχρονα υποθαλάσσια δελταϊκά και αλλουβιακά ριπίδια σχηματίζονται κατά μήκος των ακτών του νοτίου περιθωρίου του Κορινθιακού κόλπου, στις περιοχές εκβολής των ποταμών (Ferentinis et al., 1988).

Η στενή θαλάσσια λεκάνη του δυτικού Κορινθιακού κόλπου, διακρίνεται και αυτή όπως ο υπόλοιπος Κορινθιακός κόλπος σε τρεις φυσιογραφικές ενότητες: την κρηπίδα, την πλαγιά και την λεκάνη. Η φυσιογραφία αυτή διαμορφώνεται από τα αντίστοιχα τεκτονικά τεμάχια που αναπτύσσονται κατά μήκος ενός άξονα διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ και οριοθετούν την έκταση της λεκάνης προς βορρά και νότο (εικόνα 3.5). Η λεκάνη ουσιαστικά αποτελείται από το τέμαχος βάσης των περιθωριακών ρηγμάτων του Κορινθιακού κόλπου, ενώ η κρηπίδα και οι ακτές αποτελούν τα τεμάχια οροφής τους. Τα περιθώρια της λεκάνης ορίζονται από ζώνες που συνήθως περιλαμβάνουν περισσότερα του ενός ρήγματα. Το Νότιο περιθώριο χαρακτηρίζεται από μικρού εύρους υφαλοκρηπίδα και διαμορφώνεται από δύο κύριες τεκτονικές δομές, το ρήγμα της Ελικής (ΕΛΙ) διεύθυνσης ΑΝΑ-ΔΒΔ και το ρήγμα του Αιγίου (ΑΙΓ) διεύθυνσης Α-Δ που κλίνουν προς το βορρά (Stefatos et al., 2002; Στεφάτος, 2005; McNeil et al., 2005, Koukouvelas, 1998). Αντίθετα το Βόρειο περιθώριο διαμορφώνεται από δύο ρήγματα διεύθυνσης Α-Δ εκ των οποίων το βόρειο (Ν-ΕΡΑ) κλίνει προς τον βορρά και το νότιο (S-ΕΡΑ) προς το νότο διαμορφώνοντας ένα τεκτονικό κέρα. Αποτέλεσμα αυτού του τεκτονικού καθεστώτος είναι η διαμόρφωση μιας υφαλοκρηπίδας μεγάλης έκτασης, βόρεια του κέρατος.

Εικόνα 3.5. Τεκτονικός χάρτης του δυτικού Κορινθιακού κόλπου (από Στεφάτος, 2005). ΑΙΓ: ρ. Αίγιο, ΑΚΡ: ρ. Ακράτα, ΑWC: αξονικό ρήγμα δυτικού Κορινθιακού, ΔΙΑ: ρ. Διακοφτό, DUN: ρ. Ντόνος, ΕΛΙ: ρ. Ελίκη, Ν-ΕΡΑ: ρ. Βόρειο Ερατεινή, S-ΕΡΑ: ρ. Νότιο Ερατεινή, ΤΡΙ: ρ. Τριζόνα, VAL: ρ. Βαλμίτια.

Εντός της λεκάνης, την κυρίαρχη τεκτονική δομή αποτελεί ένα ρήγμα με διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ, παράλληλη στον άξονα μέγιστου βάθους του κόλπου. Το ρήγμα αυτό (αξονικό ρήγμα δυτικού Κορινθιακού (AWC)) (εικόνα 3.5) έχει κλίση προς τα νοτιοδυτικά αντιθετικά προς τα ρήγματα του νοτίου περιθωρίου.

3.2.2.1 Νότιο Περιθώριο Δυτικού Κορινθιακού κόλπου

Στο δυτικό τμήμα του Κορινθιακού κόλπου, οι βόρειες ακτές της Πελοποννήσου χαρακτηρίζονται από κλιμακωτή διάταξη, η οποία είναι αντίθετη με τη σχεδόν ευθύγραμμη διάταξη των ακτών της βόρειας Πελοποννήσου στο κεντρικό τμήμα του κόλπου. Το σχήμα της ακτογραμμής στην περιοχή αυτή, φαίνεται να ελέγχεται από την παρουσία τριών ρηγμάτων, το ρήγμα Βαλιμίτικα (VAL), το ρήγμα Διακοφτό (DIA) και το ρήγμα Ακράτα (AKR) τα οποία παρουσιάζουν αντίστοιχα δεξιόστροφη κλιμακωτή διάταξη παράλληλη στην ακτή (εικόνα 3.5) (Στεφάτος, 2005).

Τα υποθαλάσσια αυτά ρήγματα είναι κλιμακωτές (en-echelon) δομές και σε αρκετές περιπτώσεις προεκτείνονται στη χέρσο. Το μήκος των ρηγμάτων δεν ξεπερνά τα 12 χιλιόμετρα, με εξαίρεση το ρήγμα της Ελίκης το έχει συνολικό μήκος μεγαλύτερο των 30 χιλιομέτρων (Pavlidis et al., 2004). Το ρήγμα Αιγίου στα δυτικά και το ρήγμα Ελίκη νότια και ανατολικά του ρήματος Αιγίου, αποτελούν τις δύο κύριες τεκτονικές δομές που διαμορφώνουν το περιθώριο του κόλπου. Τα δύο αυτά ρήματα έχουν διεύθυνση ανατολή – δύση και κλιμακωτή διάταξη προς τα δεξιά. Μεταξύ των δύο ρηγμάτων σχηματίζεται μια ζώνη μεταβίβασης (relay ramp) που κλίνει προς τα Α – ΑΒΑ (Koukouvelas, 1998). Ανάλογα με την σχετική τους απόσταση από την ακτογραμμή, τα περιθωριακά ρήματα της λεκάνης, ελέγχουν την ανάπτυξη και το εύρος της κρηπίδας. Στα ανατολικά το υποθαλάσσιο τμήμα του ρήματος Ελίκη, περιορίζει την ανάπτυξη της κρηπίδας σε ένα εύρος 500 μέτρων. Στα δυτικά, μετατόπιση του τέμαχους οροφής των δύο υποθαλάσσιων ρηγμάτων Βαλιμίτικα (VAL) και Γύφτισα (GYF), έχει ως συνέπεια τη διαμόρφωση του ορίου της κρηπίδας πολύ κοντά στο ακρωτήριο Γύφτισα σε απόσταση μόλις 70 μέτρων από την ακτή. Αντίθετα, στο κεντρικό τμήμα της νότιας παράκτιας ζώνης, η ζώνη μεταβίβασης διαμορφώνει μια εκτενή και με ομαλή κλίση κρηπίδα. Με μέση γωνία κλίσης 2° η κρηπίδα και εκτείνεται έως και 2.8 χιλιόμετρα ανοικτά των ποταμών Κερυνίτη και Βουραϊκού. Η σημαντική στερεοπαροχή των ποταμών στην περιοχή, καθώς και το γεγονός ότι το πλησιέστερο στην ακτή υποθαλάσσιο ρήγμα απέχει 2.5-3km, ευνοούν τον σχηματισμό μιας εκτενούς κρηπίδας.

Η υφαλοκρηπίδα χαρακτηρίζεται στις σεισμικές τομογραφίες από την ύπαρξη μίας ακολουθίας επιφανειακών στρωμάτων (Perissoratis et al., 2000), η οποία υπέρκειται μιας ακολουθίας διασταυρωμένων στρωμάτων (clinoforms) στην εξωτερική υφαλοκρηπίδα, ενώ

στην εσωτερική υφαλοκρηπίδα επικάθεται σε διαβρωσιγενή επιφάνεια. Ο διαχωρισμός της επιφανειακής ακολουθίας βασίζεται στην παρουσία ενός χαρακτηριστικού σεισμικού ανακλαστήρα, ο οποίος χρονολογείται στα 12000 χρόνια BP και αντιπροσωπεύει την επίκληση του ισοτοπικού σταδίου 2/1. Στα αρχικά στάδια της προέλασης μία λεπτή ακολουθία αποτέθηκε στην εξωτερική υφαλοκρηπίδα, ενώ οι Ολοκαινικές δελταϊκές ακολουθίες ξεκίνησαν να προελαύνουν 6500 χρόνια BP (Perissoratis et al., 2000). Η ήπια κλίση εκτενής κρηπίδα καλύπτεται από ένα επιφανειακό κάλυμμα επικλισηγενών ποταμό-δελταϊκών φάσεων με πάχος μεταξύ 15 και 35m.

Το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών εντοπίζεται στον Όρμο του Ελαιώνα μεταξύ των εμβολών των ποταμών Κερυνίτη και Βουραϊκού (Soter, 1999; Christodoulou et al., 2003) (εικόνα 3.6). Η θέση του πεδίου κρατήρων πιθανώς να ελέγχεται από την παρουσία του ρήγματος μετασχηματισμού Κερυνίτη (Pacchiani and Lyon-Caen, 2010) του οποίου η πιθανή υποθαλάσσια συνέχεια τέμνει τη περιοχή του πεδίου.

Εικόνα 3.6. Η περιοχή μελέτης στο νότιο περιθώριο του Δυτικού Κορινθιακού κόλπου, στον Όρμο του Ελαιώνα. Η θέση του ρήγματος Κερυνίτη από Pacchiani and Lyon-Caen, 2010.

3.2.3 Υδρογεωλογικό καθεστώς της παράκτιας ζώνης του Όρμου του Ελαιώνα

Τα διάφορα πετρώματα και οι γεωλογικοί σχηματισμοί, ανάλογα με την ικανότητά τους να επιτρέπουν την κατείδυση, τη διακίνηση και την αποθήκευση του νερού μέσα από τον όγκο τους διακρίνονται σε υδροπερατούς, υδροστεγανούς και ημιπερατούς. Σύμφωνα με την ταξινόμηση της Διεθνούς Ένωσης Υδρογεωλόγων (Struckmeier and Margat, 1995) στην ευρύτερη περιοχή του Βορείου περιθωρίου του Κορινθιακού κόλπου αναγνωρίστηκαν οι παρακάτω υδρολιθολογικές ενότητες (εικόνα 3.7) (Νίκας, 2004; Κατσάνου, 2007):

- 1. Πορώδη (κυρίως μη συνεκτικά) πετρώματα.

1Α. Εκτεταμένοι και με υψηλή απόδοση υδροφόροι που περιλαμβάνουν: τις αλλουβιακές αποθέσεις Ολοκαίνου, που αποτελούνται από αλλουβιακούς κώνους που αναπτύσσονται στην έξοδο των κυριότερων ποταμών, από την ορεινή-ημιορεινή ζώνη και καταλαμβάνουν μεγάλο τμήμα της πεδινής και παράκτιας ζώνης. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και οι σύγχρονες αποθέσεις κοίτης που αναπτύσσονται εκατέρωθεν της σύγχρονης ενεργής κοίτης των ποταμών, παρουσιάζουν μεγάλη ετερογένεια, συμμετέχουν όλα τα κοκκομετρικά μεγέθη, με επικράτηση κατά κανόνα των άμμων, χαλίκων και κροκαλών. Εντός των στρωμάτων αυτών αναπτύσσεται ελεύθερος υδροφόρος, με καλά υδραυλικά χαρακτηριστικά και μέτριες έως υψηλές ειδικές αποδόσεις μεταβιβαστικότητα (I) της τάξης των 2.200-8.800m²/day και πάχος που κυμαίνεται, από μερικά, έως μερικές δεκάδες μέτρα και (Νίκας, 2004). Στην ίδια κατηγορία εντάσσονται οι δελταϊκές και παράκτιες χειμαρρώδεις αποθέσεις Ολοκαίνου, σχηματισμούς που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τις σύγχρονες αποθέσεις κοίτης, αλλά μεγαλύτερη συμμετοχή λεπτομερών υλικών. Οι αποθέσεις αυτές μαζί με τα αλλουβιακά ριπίδια του Ολοκαίνου, δημιουργούν ένα ενιαίο υδροφόρο που μπορεί να χαρακτηριστεί ως προσχωματικός υδροφόρος του Ολοκαίνου και τέλος τις αλλουβιακές αποθέσεις Πλειστοκαίνου που είναι ανάλογης δομής και ιζηματολογικής σύστασης με τα σύγχρονα αλλουβιακά ριπίδια, με τη διαφορά ότι εμφανίζουν μεγάλα πάχη και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη συνεκτικότητα. Εντός των σχηματισμών αυτών αναπτύσσονται ελεύθεροι υδροφόροι ορίζοντες, σε μεγάλα βάθη (>100 m), με μέτριες έως υψηλές αποδόσεις. Η επικράτηση των αδρομερών υλικών (άμμοι, κροκάλες), σε όλο το πάχος των σχηματισμών αυτών, εξασφαλίζει τις συνθήκες ελεύθερης υδροφορίας αλλά και την τροφοδοσία των υδροφόρων αυτών, μέσω της απευθείας κατείδυσης αλλά και μέσω της διήθησης του νερού των ποταμών που τους διαρρέουν. Η μεταβιβαστικότητα (I) των σχηματισμών αυτών παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις με τιμές από 640 έως 30.000 m²/day (Νίκας, 2004).

1.Β Τοπικοί ή μικρού πάχους υδροφόροι με υψηλή απόδοση ή εκτεταμένοι αλλά μέτριας απόδοσης υδροφόροι που περιλαμβάνουν τα πλευρικά κορήματα, που είναι αδρομερή

θραύσματα ασβεστολιθικής και κερατολιθικής σύστασης, που αναπτύσσονται στις παρυφές των πρηνών. Επειδή έχουν μικρό πάχος και γεωγραφική εξάπλωση δεν αναπτύσσουν σημαντική υδροφορία.

- 2. Συνεκτικά πετρώματα με δευτερογενή περατότητα (κυρίως ανθρακικά)

2Α. Εκτεταμένοι και με υψηλή απόδοση υδροφόροι που περιλαμβάνουν τους λεπτοστρωματώδεις Άνω Κρητιδικούς ασβεστόλιθους της ζώνης Πίνδου. Στους σχηματισμούς αυτούς, λόγω του δικτύου ασυνχειών, που έχει σχηματιστεί στην τεκτονισμένη μάζα, αναπτύσσεται ένας ετερογενής υδροφόρος ορίζοντας. Το δίκτυο των ασυνχειών και η διεύρυνση που λαμβάνει χώρα λόγω διάλυσης, αυξάνουν την μεταβιβασιμότητα και την αποθηκευτικότητα του υδροφόρου. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών αυτών είναι μέτρια έως υψηλά, πιο συγκεκριμένα οι τιμές μεταβιβασιμότητας για τους υδροφόρους αυτούς κυμαίνονται από 1.000 έως 5.500 m²/day (Νίκας, 2004). Αυτό αποδεικνύει ότι το δίκτυο ασυνχειών και η επακόλουθη διεύρυνσή τους, λόγω διάλυσης, συντελούν στην ευχερή κίνηση και αποθήκευση του υπόγειου νερού. Η παρεμβολή των κερατολιθικών και πηλινικών διαστρώσεων εντός του σχηματισμού των Άνω Κρητιδικών ασβεστόλιθων, η συχνή κανονική ή τεκτονική αλληλουχία τους με τους υποκείμενους ραδιολαρίτες, αλλά και ο υπερκείμενος Ηωκαινικός φλύσχος, δημιουργούν πολλαπλά επίπεδα βάρσεως, με αποτέλεσμα την εκδήλωση πολυάριθμων πηγών, με κατά κανόνα μικρή, έως μέτρια παροχή (14-55 m³/h).

- Συνεκτικά και πορώδη πετρώματα, με περιορισμένη ή μη συγκέντρωση υπόγειων υδάτων – γενικά άνευ πρακτικής σημασίας.

3Α. Τοπικής σημασίας υπόγεια νερά, κυρίως σε ζώνες διάρρηξης και αποσάθρωσης συνεκτικών πετρωμάτων που περιλαμβάνουν τα Συνεκτικά κροκαλοπαγή του Πλειστοκαίνου που είναι χερσαίες ποτάμιες (δελταϊκές) αποθέσεις, οι οποίες καλύπτουν τμήμα της ημιορεινής ζώνης στις οποίες επικρατούν κροκαλοπαγή, με ασβεστομαργαϊκό, αλλά και ψαμμιτικό συνδετικό υλικό και ποικίλο βαθμό συνεκτικότητας. Οι σχηματισμοί αυτοί παρουσιάζουν μικρή πρωτογενή, αλλά σημαντική δευτερογενή περατότητα, λόγω του τεκτονισμού που έχουν υποστεί, αλλά και της επακόλουθης διάλυσης και απομάκρυνσης του συνδετικού τους υλικού. Δημιουργούν πολλές μικρές διαλείπουσες πηγές, σε διάφορα επίπεδα, γεγονός που υποδεικνύει μέτρια έως μικρή δυναμικότητα, αλλά και περιορισμένη έκταση και πάχος υδροφόρου. Κατά περίπτωση διαπιστώνονται χαρακτηριστικά ελεύθερης ή υπό πίεση υδροφορίας, ανάλογα με το αν μεσολαβούν λεπτομερή στρώματα.

3Β. Υδροφόροι χωρίς πρακτική σημασία ή μη υδροφόροι σχηματισμοί που περιλαμβάνουν λιμναίες, λιμνοθαλάσσιες και ποταμολιμναίες αποθέσεις του Πλειστοκαίνου, που χαρακτηρίζονται από εναλλαγές αργίλων, πηλών, άμμων, κροκαλοπαγών και μαργών, με

επιγράτση γενικά του λεπτομερούς κλάσματος. Στους σχηματισμούς αυτούς δεν αναμένεται, ούτε έχει διαπιστωθεί, υδροφορία. Εξαιρεση αποτελεί η ύπαρξη κάποιων επικρεμάμενων υδροφόρων εντός των φακών των κροκαλοπαγών, έτσι μπορεί να θεωρηθούν πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί. Στις περισσότερες περιπτώσεις αποτελούν το στεγανό υπόβαθρο των προσχωματικών υδροφόρων του Ολοκαίνου, αλλά και των μικρότερης δυναμικότητας υδροφόρων των κροκαλοπαγών του Πλειστοκαίνου.

Εικόνα 3.7. Υδρολιθολογικός χάρτης του βορείου περιθωρίου του δυτικού Κορινθιακού κόλπου (από Νίκας, 2004).

Σύμφωνα με την πιεζομετρική επιφάνεια των προσχωματικών υδροφόρων η γενική κατεύθυνση ροής του υπόγειου νερού είναι από τα τοπογραφικά υψηλά προς τα τοπογραφικά χαμηλά (ΝΔ-ΒΑ) κάθετα προς την ακτογραμμή. Συγκεκριμένα στην περιοχή του Ελαιώνα η πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφόρου είναι μεταξύ 1-3 μέτρων (απόλυτο υψόμετρο) και οι μεταβολές των τιμών της απόλυτης στάθμης μεταξύ της ξηρής και της υγρής περιόδου δεν ξεπερνούν το ένα μέτρο (Νίκας, 2004).

Το σύνολο σχεδόν των δειγμάτων υπόγειου νερού που αναλύθηκαν από τις πηγές και τις γεωτρήσεις, αλλά και από τον ποταμό Κερυνίτη, είναι του τύπου: $\text{Ca} - \text{HCO}_3$, χαρακτηρίζονται δηλαδή ως ασβεστούχα – οξυανθρακικά (Ταβλά, 2007). Η χημική τους σύσταση δείχνει μια πολύ γρήγορη και ρηχή αλληλεπίδραση με τα κροκαλοπαγή και τους

ασβεστόλιθους που εμφανίζονται στην επιφάνεια και δείχνουν υδρολογικούς κύκλους μικρού βάθους κατά μήκος των τοπικών τεκτονικών δομών, ενώ θεωρούνται ως φρέσκα νερά. Τόσο τα χημικά όσο και τα φυσικά χαρακτηριστικά είναι τυπικά ενός αρχικού σταδίου της αλληλεπίδρασης του μετεωρικού νερού με τα πετρώματα και τα εδάφη. Η χημική τους σύσταση είναι αποτέλεσμα της σύντομης επαφής του νερού με τα Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα που πληρούν την περιοχή

Η ισοτοπική ανάλυση $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^2\text{H}$ του νερού των πηγών και των γεωτρήσεων έδειξε ότι τα νερά του υδροφόρου είναι μετεωρικής προέλευσης, και δεν παρατηρείτε καμία ανάμειξη με το θαλασσινό νερό (Τάβλα, 2007).

3.3 ΚΟΛΠΟΣ ΚΑΤΑΚΟΛΟΥ

3.3.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή του Κατακόλου ανήκει τεκτονοστρωματογραφικά στην Ιόνια ζώνη (Monopolis and Bruneton, 1982; Καμπέρης, 1987), στις εξωτερικές ελληνίδες. Η στρωματογραφική στήλη της Ιονίου αρχίζει κατά το Τριαδικό με την ιζηματογένεση των εβαποριτών, που συνεχίζεται μέχρι το Ανώτερο Τριαδικό. Τότε αρχίζει η ανθρακική ιζηματογένεση, που χαρακτηρίζεται από μία κατώτερη ακολουθία αποτελούμενη από νηριτικούς ασβεστόλιθους παχυστρωματώδεις έως άστρωτους και μία ανώτερη ακολουθία με πελαγικά, κυρίως ανθρακικά, ιζήματα έως το Ηώκαινο. Στη συνέχεια αποτίθεται ο φλύσχος από το Αν. Ηώκαινο έως τη βάση του Ολιγοκαίνου. Οι μεταλλικοί σχηματισμοί είναι κυρίως θαλάσσιοι σχηματισμοί Νεογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας (Zelilidis et al., 1998). Το πάχος των νεογενών στη ΒΔ Πελοπόννησο, το οποίο εμφανίζεται μεγάλο και μεταβαλλόμενο από θέση σε θέση, δεν εξαρτάται μόνο από τους ρυθμούς ιζηματογένεσης αλλά και από τα φαινόμενα συνιζηματογενούς τεκτονισμού. Οι επιφανειακές εμφανίσεις συνίστανται από κλαστικά ιζήματα, άμμους, ιλύαργίλους τα οποία αποτέθηκαν σε διαφορετικά παλαιο-περιβάλλοντα όπως ποτάμια, λιμναία, λιμνοθαλάσσια και ρηχής θάλασσας. Από ερευνητικές γεωτρήσεις που έγιναν στη περιοχή προέκυψε ότι τόσο οι εβαπορίτες όσο και οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες των πυρήνων των γεωτρήσεων είναι έντονα διερρηγμένοι, έχουν χρώμα σκούρο τερφό οφειλόμενο στα οργανικά (βιτουμενιούχα) συστατικά.. Οι κινήσεις των εβαποριτών προκάλεσαν τον κατακερματισμό των υπερκείμενων ανθρακικών και τον σχηματισμό κροκαλοπαγών στις επιφάνειες ολίσθησης και στην ράχη των εβαποριτών, τα οποία είναι ταμειυτήρες φυσικών υδρογονανθράκων (Καμπέρης, 1987).

Βαθεία σεισμικά έδειξαν ότι η ανάπτυξη των Νεογενών λεκανών ελέγχεται από την προέλαση προς τα δυτικά του καλύμματος της σειράς Γαβρόβου (Kamberis et al., 2000b). Ως αποτέλεσμα των ορογενετικών κινήσεων, μία ασύμμετρη λεκάνη (foredeep) σχηματίστηκε μπροστά από τα καλύματα ενώ μία piggyback λεκάνη σχηματίστηκε στο προελαύνων κάλυμμα. Ιουρασικοί έως Ηωκανικοί ασβεστόλιθοι διαχωρίζονται από τα μεγάλου πάχους καινοζωικά κλαστικά ιζήματα από Τριαδικούς εβαπορίτες, οι οποίοι διεισδύουν στις ασβεστολιθικές σειρές λόγω διαφυρισμού (εικόνα 3.8).

Εικόνα 3.8. Ερμηνευτική τομή από σεισμική τομογραφία στην οποία φαίνεται η γεωλογική δομή στην περιοχή του Κατακόλου. Στον ένθετο χάρτη δίνεται η θέση της τομής (από Kamberis et al., 2000b).

Στην χερσόνησο του Κατακόλου, μία διαφυρική δομή από τους Τριαδικούς εβαπορίτες έχει αναπτυχθεί στη θέση ενός προϋπάρχοντος αλπικού αντικλίνου. Αυτή η δομή περιορίζεται προς τα δυτικά από ένα ανάστροφο ρήγμα διεύθυνσης B-N, το οποίο βρίσκεται στο δυτικό άκρο της χερσονήσου. Κατά μήκος αυτής της δομής οι εβαπορίτες κινήθηκαν προς τα δυτικά, και σε ένα επόμενο στάδιο πέρασαν επάνω από τους Μεσοζωικούς ασβεστόλιθους και κατά ένα μέρος επάνω από τη βάση των νεογενών ιζημάτων. Δευτερογενείς διαφυρικές κινήσεις, δημιούργησαν δύο τοπογραφικά υψηλά στο προϋπάρχον αντίκλινο στη βάση του Νεογενούς. Ένα από αυτά αντιπροσωπεύει την θετική δομή ‘flower structure’ του Κατακόλου. Μεταξύ των δύο δομών σχηματίστηκε μία ασύμμετρη τάφρος από BA-NΔ κανονικά ρήγματα βορειοανατολικά του Κατακόλου. Στο Κατάκολο τα ΔΒΔ-ΑΝΑ και ΒΔ-ΝΑ ρήγματα αντιπροσωπεύουν νεότερες τεκτονικές κινήσεις, επιδρούν στην περιοχή από το Πλειστόκαινο και θεωρούνται νεοτεκτονικά (εικόνα 3.9).

Αέριοι υδρογονάνθρακες βρέθηκαν σε πλήθος γεωτρήσεων τόσο στη Νεογενή κλαστική ακολουθία σε βάθη μικρότερα από 2000m όσο και στο υπόβαθρο των Νεογενών που αντιπροσωπεύεται από μεσοζωικούς ασβεστόλιθους και τριαδικούς εβαπορίτες σε βάθη

μεγαλύτερα από 2000m. Τα αέρια που βρέθηκαν στα νεογενή χαρακτηρίζονται ως ξηρά αέρια σύμφωνα με το λόγο $C_1/(C_2+C_3)$, ενώ τα αέρια στο υπόβαθρο ως υγρά αέρια (Kamberis et al., 2000a).

Εικόνα 3.9.Τεκτονικός χάρτης του Κατακόλου (τροποποίηση από Kamberis et al., 2000a; 2000b).

3.3.2 Διαφυγές ρευστών στο θαλάσσιο και στο χερσαίο περιβάλλον του Κατακόλου.

Η ευρύτερη περιοχή του Κατακόλου χαρακτηρίζεται από σημαντικές διαφυγές ρευστών τόσο στο χερσαίο όσο και στο θαλάσσιο περιβάλλον. Μία σημαντική χερσαία θέση έχει εντοπιστεί σε απόσταση 500m από τον λιμένα του Κατακόλου (Kamberis et al., 2000b). Η θέση αυτή, γνωστή ως «Φάρος», τοποθετείται κατά μήκος ενός ρήγματος διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ, και εντοπίζεται από την απουσία φυτοκάλυψης και την ιλυώδη σύσταση του εδάφους (εικόνα 3.10).

Διαφυγές αερίων έχουν εντοπιστεί σε πολλές θέσεις στις εγκαταστάσεις του λιμένα του Κατακόλου, όπως δηλώνουν οι διαβρώσεις και οι βλάβες στις ασφάλτινες επιφάνειες και τις κτιριακές εγκαταστάσεις του λιμένος και η έντονη οσμή υδροθείου («κλούβια αυγά») που αναδύεται στην περιοχή. Επιπλέον, οι διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα του λιμένα είναι σημαντικές και εκτεταμένες καθώς είναι εύκολα διακριτές στην επιφάνεια της θάλασσας ιδιαίτερα όταν αυτή δεν έχει κυματισμούς (εικόνα 3.11). Ο λιμένας του Κατακόλου παρουσιάζει μεγάλη τουριστική κίνηση καθώς αποτελεί το λιμάνι υποδοχής μεγάλων κρουαζιερόπλοιων (μήκους >100m) που μεταφέρουν τουρίστες στον αρχαιολογικό χώρο της Ολυμπίας.

Οι θαλάσσιες και χερσαίες έρευνες σχεδιάστηκαν και οργανώθηκαν έτσι ώστε να εντοπίσουν, αποτυπώσουν και μελετήσουν τις διαφυγές ρευστών τόσο στο χερσαίο όσο και στο θαλάσσιο χώρο του Κατακόλου.

Εικόνα 3.10. Φωτογραφία από τη θέση «Φάρος» στην οποία διακρίνεται η χερσαία διαφυγή από την απουσία φυτοκάλυψης και την ιλυώδη σύσταση του εδάφους.

Εικόνα 3.11. Φωτογραφία από το λιμένα Κατακόλου στην οποία διακρίνεται η άνοδος φυσαλίδων στην επιφάνεια της θάλασσας

Κεφάλαιο 4^ο Μεθοδολογία

4 Μεθοδολογία

Η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή βασίστηκε τόσο στις ‘παραδοσιακές μεθόδους’ του γεωφυσικού εντοπισμού των ρευστών και των μετρήσεων της γεωχημικής διασκόπησης όσο και στην σύγχρονη τάση της ωκεανογραφικής έρευνας που είναι η σχεδίαση και η τοποθέτηση υποθαλάσσιων παρατηρητηρίων μακράς διάρκειας στο θαλάσσιο περιβάλλον, τα οποία εξοπλισμένα με διάφορους αισθητήρες καταγράφουν τις παραμέτρους του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Επίσης δείγματα ρευστών που συλλέχθηκαν τόσο από το θαλάσσιο περιβάλλον όσο και από τις παρακείμενες παράκτιες περιοχές αναλύθηκαν για την εύρεση του χημισμού και της προέλευσής τους. Στο διάγραμμα ροής της εικόνας 4.1 παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της διατριβής.

Εικόνα 4.1. Διάγραμμα ροής στο οποίο παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας διατριβής.

4.1 Εργασίες Πεδίου

4.1.1 Γεωφυσική Διασκόπηση

4.1.1.1 Τομογράφοι υποδομής πυθμένα

Οι τομογράφοι υποδομής πυθμένα βασίζονται στη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης. Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στην αρχή διάδοσης και ανάκλασης ελαστικών κυμάτων από το θαλάσσιο πυθμένα και περιορίζεται στη χρήση των πρωτεύοντων ή επιμήκων σεισμικών κυμάτων (P- waves).

Τα παραγόμενα ελαστικά (σεισμικά) κύματα μεταφέρονται μέσω της υδάτινης στήλης στον πυθμένα όπου και διαδίδονται με ταχύτητα, U_p .

$$Up = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (4.1)$$

όπου ρ : πυκνότητα του μέσου διάδοσης

λ και μ : ελαστικές σταθερές (Lame)

Όταν το διεισδύον -οδεύον- ελαστικό κύμα συναντήσει διεπιφάνεια μεταξύ ιζημάτων διαφορετικής πυκνότητας και ελαστικών σταθερών, μέρος της μεταφερόμενης ενεργείας θα ανακλαστεί προς την επιφάνεια με τη μορφή νέων ελαστικών κυμάτων, ενώ το υπόλοιπο της ενέργειας θα συνεχίσει να διεισδύει στα ιζήματα με τη μορφή νέων διαθλασμένων κυμάτων.

Το ποσοστό της ενέργειας που θα ανακλαστεί (E_R) από μια διεπιφάνεια είναι συνάρτηση της διαφοράς της πυκνότητας και της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων μεταξύ δύο ιζημάτων εκατέρωθεν της διεπιφάνειας, και ορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή ανακλαστικότητας (R) ως:

$$E_R = R^2 \quad (4.2)$$

$$\text{όπου: } R = \frac{A_1}{A_0} = \frac{U_{P2}\rho_2 - U_{P1}\rho_1}{U_{P2}\rho_2 + U_{P1}\rho_1}$$

και A_1 , A_0 τα αντίστοιχα πλάτη του ανακλώμενου και του προσπίπτοντος παλμού.

Η μέθοδος βασίζεται στην ανίχνευση και στην καταγραφή των ανακλώμενων κυμάτων από τα ιζήματα του πυθμένα. Ανακλάσεις που προέρχονται από διαφορετικά βάθη κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα, ανιχνεύονται και καταγράφονται σε διαφορετικούς χρόνους. Η ανάλυση και ερμηνεία των σεισμικών τομογραφιών που στοιχειοθετούνται με βάση το χρόνο καταγραφής, τις ταχύτητες διάδοσης, το πλάτος και την κυματομορφή των ανακλώμενων κυμάτων, παρέχει πληροφορίες ως προς τις γεωτεχνικές ιδιότητες των ιζημάτων του πυθμένα και τις στρωματογραφικές σχέσεις μεταξύ των ιζηματογενών στρωμάτων. Η σεισμική τομογραφία αποτελεί μια τεχνικά στοιχειοθετημένη διατομή του πυθμένα στην οποία ιχνοθετούνται οι διεπιφάνειες σημαντικής μεταβολής των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των ιζημάτων του πυθμένα. Κάθε διεπιφάνεια καταγράφεται με τη μορφή ίχνους που καλείται σεισμική ανάκλαση.

Οι δύο παράμετροι που ελέγχουν την αποτελεσματικότητα ενός τομογράφου στη μελέτη της υποδομής του πυθμένα είναι: (i) η διεισδυτικότητα των σεισμικών κυμάτων κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα και (ii) η διακριτική ικανότητα των σεισμικών κυμάτων, που εκφράζει τη λεπτομέρεια με την οποία μπορεί να ανιχνευθεί η υποδομή του πυθμένα

Τα δεδομένα της διδακτορικής διατριβής συλλέχθηκαν με τομογράφους υποδομής πυθμένα τύπου 3.5kHz και Sparker. Συγκεκριμένα το σύστημα τομογράφου υποδομής πυθμένα τύπου 3.5kHz αποτελείται από:

- Πομπό GEOPULSE model 5430A (εικόνα 4.2)
- Δέκτη – ενισχυτή GEOPULSE model 5210B (εικόνα 4.2)
- Καταγραφέα E.P.C. (εικόνα 3.2)
- Ημιπλωτή συστοιχία 4 πομποδεκτών O.R.E. model 132B (-over the side transducer array-) (εικόνα 4.3)
- Ψηφιακό σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας ακουστικών κυμάτων TRITON Elies (εικόνα 4.4)
- Συρόμενη συστοιχία 9 πομποδεκτών O.R.E. (εικόνα 4.5)

Το μήκος ή η χρονική διάρκεια του παλμού ελέγχει τη διακριτική ικανότητα του τομογράφου. Σε όλες τις έρευνες χρησιμοποιήθηκε η μικρότερη δυνατή χρονική διάρκεια του παλμού, δηλαδή 1ms. Με αυτή τη χρονική διάρκεια επιτυγχάνεται διακριτική ικανότητα περίπου 50cm.

Εικόνα 4.2. Το σύστημα τομογράφου υποδομής, πυθμένα 3.5kHz με αναλογική καταγραφή που χρησιμοποιήθηκε στις έρευνες.

Εικόνα 4.3. Ο ημιπλωτός πομποδέκτης O.R.E. model 132B.

Εικόνα 4.4. Το σύστημα καταγραφής ψηφιακών δεδομένων τομογράφου υποδομής, πυθμένα TRITON Elies που χρησιμοποιήθηκε στις έρευνες.

Εικόνα 4.5. Ο συρόμενος πομποδέκτης O.R.E.

Το σύστημα sparket που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από:

- Σύστημα παραγωγής ενέργειας (SIG) αποτελούμενη από 2 μονάδες (2000A και 2000B). Η μονάδα 2000A περιλαμβάνει έναν μετασχηματιστή υψηλής τάσης και έναν διακόπτη υψηλής ενέργειας (thyatron) ενώ η μονάδα 2000B αποτελείται από 5 πυκνωτές απόδοσης μέχρι 9000 Kv. (Εικόνα 4.6α)
- Διάταξη 42 παράλληλων ηλεκτροδίων (SIG seismic marine) (Εικόνα 4.6β)
- Πλωτή συστοιχία υδροφώνων (SIG hydrophone 16-12-12) (Εικόνα 4.6γ)
- Δέκτη – ενισχυτή GEOPULSE model 5210B (Εικόνα 4.2)
- Καταγραφέα E.P.C. (Εικόνα 4.2)

Εικόνα 4.6 α) Οι μονάδες παραγωγής ενέργειας SIG 2000A και 2000B, β) το ενεργειακό καλώδιο και η διάταξη ηλεκτροδίων, γ) το καλώδιο με τη συστοιχία υδροφώνων.

Με τομογράφο υποδομής πυθμένα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 144.16km πορειών στον Πατραϊκό κόλπο (εικόνα 4.7), 12.3 km πορειών στον Όρμο του Ελαιώνα (εικόνα 4.8) και 59.5 km πορειών στον κόλπο του Κατακόλου (εικόνα 4.9). Λεπτομερής ανάλυση για κάθε έρευνα δίνεται στο Παράρτημα Ι.

Εικόνα 4.7. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με τομογράφο υποδομής πυθμένα στον Πατραϊκό κόλπο.

Εικόνα 4.8. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με τομογράφο υποδομής πυθμένα στον όρμο του Ελαιώνα.

Εικόνα 4.9. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με τομογράφο υποδομής πυθμένα στον κόλπο του Κατακόλου.

4.1.1.2 Ηχοβολιστής Πλευρικής Σάρωσης

Η αρχή λειτουργίας των ηχοβολιστών πλευρικής σάρωσης είναι παρόμοια με εκείνη των τομογράφων. Ένας πομπός, σχήματος τορπίλης, που ρυμουλκείται από το ερευνητικό σκάφος,

εκπέμπει ένα ηχητικό σήμα υψηλής συχνότητας. Ο πομπός εκπέμπει τα ηχητικά σήματα εκατέρωθεν του επιμήκους άξονα της τορπίλης, έτσι ώστε να σχηματίζεται μια ευρεία κωνική δέσμη ήχου. Η τομή της κωνικής δέσμης με τον πυθμένα είναι η ζώνη σάρωσης της συσκευής. Κάθε ανακλώμενο σήμα από την ζώνη αυτή προσλαμβάνεται από τον δέκτη και καταγράφεται έτσι ώστε να δίνει μια εικόνα ή καλύτερα μια ηχογραφία του πυθμένα. Οι ηχοβολιστές πλευρικής σάρωσης χαρακτηρίζονται από τη διακριτική τους ικανότητα.

Η διακριτική ικανότητα ως προς τον επιμήκη άξονα (tranverse resolution) ελέγχεται κυρίως από το οριζόντιο άνοιγμα της ηχητικής δέσμης (beam spreading) καθώς και από παραμέτρους που ελέγχονται από τον χρήστη όπως η πορεία, η ταχύτητα του σκάφους, το ύψος της τορπίλης από τον πυθμένα και το εύρος της ζώνης σάρωσης (ping rate). Η διακριτική ικανότητα ως προς τον εγκάρσιο άξονα (range resolution) ελέγχεται απόλυτα από το μήκος του ηχητικού παλμού (pulse length) του πομπού (Fish & Carr, 1990).

Το σύστημα του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή των δεδομένων της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι ισομετρικής καταγραφής (image corrected) και αποτελείται από:

- ηχοβολιστική τορπίλη EG&G 272TD (εικόνα 4.10)
- δύο καλώδια έλξης ελαφρού τύπου (Kevlar), μήκους 50 και 250m (εικόνα 4.10)
- καταγραφική μονάδα EG&G 260 (εικόνα 4.11)
- ψηφιακό σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας σήματος Edgetech 4100 P (εικόνα 4.12)

Εικόνα 4.10. Η ηχοβολιστική τορπίλη EG&G 272TD και καλώδιο έλξης 250m.

Εικόνα 4.11 Αναλογικό σύστημα καταγραφής EG&G260

Εικόνα 4.12 Ψηφιακό σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας σήματος Edgetech 4100 P.

Με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης πραγματοποιήθηκαν συνολικά 136.296km πορειών στον Πατραϊκό κόλπο (εικόνα 4.13), 20.4 km πορειών στον Όρμο του Ελαιώνα (εικόνα 4.14) και 15.5 km πορειών στον κόλπο του Κατακόλου (εικόνα 4.15). Λεπτομερής ανάλυση για κάθε έρευνα δίνεται στο Παράρτημα Ι.

Εικόνα 4.13. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στον Πατραϊκό κόλπο.

Εικόνα 4.14. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στον όρμο του Ελαιώνα.

Εικόνα 4.15. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στον κόλπο του Κατακόλου.

4.1.1.3 Βυθόμετρο

Η λεπτομερής βυθομετρική αποτύπωση του πυθμένα στην περιοχή του πεδίου κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου εκτελέστηκε με μονοδεσμικό ηχοβολιστή (βυθόμετρο) τύπου ECHOTRAC (εικόνα 4.16), υψηλής διακριτικότητας, το οποίο επιτρέπει την ψηφιακή καταγραφή των βυθομετρικών στοιχείων. Πραγματοποιήθηκαν πορείες παράλληλα με την ακτή συνολικού μήκους 186 χιλιομέτρων. Στην εικόνα 4.17 φαίνεται η κάλυψη της περιοχής του Πατραϊκού κόλπου με βυθόμετρο.

Εικόνα 4.16. Το μονοδεσμικό βυθόμετρο που χρησιμοποιήθηκε.

Εικόνα 4.17. Χάρτης όπου φαίνεται η περιοχή που αποτυπώθηκε με βυθόμετρο

4.1.2 Γεωχημική Διασκόπηση

Η γεωχημική διασκόπηση διαχωρίζεται στις επί τόπου μετρήσεις αερίων και των φυσικοχημικών παραμέτρων του θαλασσινού νερού, στις επί τόπου μετρήσεις ροής αερίων στη χέρσο και στη συλλογή δειγμάτων που αναλύθηκαν στο εργαστήριο. Οι θέσεις όπου πραγματοποιήθηκε γεωχημική διασκόπηση δίνονται στις εικόνες 3.18 για τον Πατραϊκό κόλπο, 3.19 για τον όρμο του Ελαιώνα και 3.20 για τον κόλπο του Κατακόλου. Λεπτομερής ανάλυση των επιμέρους δειγματοληψιών δίνεται στο Παράρτημα Ι.

Εικόνα 4.18. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι θέσεις γεωχημικής διασκόπησης στον Πατραϊκό κόλπο

Εικόνα 4.19. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι θέσεις γεωχημικής διασκόπησης στον Όρμο του Ελαιώνα.

Εικόνα 4.20. Χάρτης όπου παρουσιάζονται οι θέσεις γεωχημικής διασκόπησης στον κόλπο του Κατακόλου.

4.1.2.1 Επί τόπου μετρήσεις αερίων

4.1.2.1.1 Αισθητήρας μέτρησης διαλυμένου μεθανίου (METS)

Ο αισθητήρας μεθανίου (METS) βασίζεται στο Νόμο του Henry. Η ειδική ημιπερατή μεμβράνη που διαθέτει ο αισθητήρας ροφά το διαλυμένο αέριο του θαλασσινού νερού προς την αέρια φάση. Στον αισθητήρα πραγματοποιείται χημική αντίδραση που μεταβάλλει το δυναμικό. Ο τύπος από τον οποίο υπολογίζεται η συγκέντρωση του μεθανίου στο θαλασσινό νερό με βάση τον αισθητήρα METS δίνεται πιο κάτω:

$$c = \exp \left[1,399 * \ln \left\{ \left(0,423 + 3,906 * \exp \frac{-U_t}{0,741} \right) * \left(\frac{1}{U_{CH_4}} - \frac{1}{0,844 + 4,818 * \exp \frac{-U_t}{1,205}} \right) \right\} \right]$$

$$t = \left(\frac{U_t * 89,50 + 990,2}{1000} - 1 \right) * 255,86$$

τύπος υπολογισμού συγκέντρωσης μεθανίου που χρησιμοποιήθηκε στον αισθητήρα METS

όπου:

c = συγκέντρωση μεθανίου

t = θερμοκρασία αερίου [°C]

U_{CH_4} = τάση μεθανίου[V]

U_t = τάση θερμοκρασίας [V]

4.1.2.1.1.1 Επιχειρησιακά χαρακτηριστικά αισθητήρα

Ο αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει μέχρι ένα βάθος 2000 μέτρων. Το επιχειρησιακό εύρος θερμοκρασιών είναι από -2 έως +60°C αλλά βαθμονομήθηκε για θερμοκρασίες μεταξύ 2 και 30°C που πρόκειται να επικρατούν στην περιοχή μελέτης.

Το εύρος των συγκεντρώσεων μεθανίου που μπορεί να μετρηθεί με τον αισθητήρα METS είναι 50 nmol/l – 10 μmol/l. Ο χρόνος αντίδρασης του αισθητήρα ώστε να βρεθεί σε ισορροπία με το θαλάσσιο περιβάλλον που τον περιβάλλει είναι 1 έως 3sec.

4.1.2.1.1.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά αισθητήρα

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα και τα μέρη από τα οποία αποτελείται φαίνονται στις εικόνες 3.21 και 3.22. Ο αισθητήρας για να αποφευχθούν φαινόμενα διάβρωσης είναι κατασκευασμένος από τιτάνιο και έχει διάμετρο 49mm, συνολικό μήκος 200mm και βάρος στον αέρα 0.8kg.

Εικόνα 4.21. Ο αισθητήρας μεθανίου METS και σχεδιάγραμμα με τις διαστάσεις του.

Position	Quantity	Item
1	1	body
2	1	sensor head
3	1	membrane sealing flange
4	2	Teflon detector socket
5	1	rear lid
6	1	sintered metal plate
7	1	methane detector
8	1	humidity detector
9	1	electronic board
10	1	8-pin Subconn® MC BH-8M underwater connector
11	3	cheese-head Allen screw M3X6
12	3	cheese-head Allen screw M3X25
13	3	cheese-head Allen screw M3X20
14	1	upper membrane seal ring Viton – 31X2
16	2	detector socket seal ring inner Viton – 8X1 outer Viton – 8X2
17	2	body seal ring Perbunan 33X2,5
18	1	membrane

Εικόνα 4.22. Μέρη του αισθητήρα μεθανίου METS.

4.1.2.1.3 Αξιοπιστία αισθητήρα

Ο αισθητήρας μεθανίου METS είναι από τους πρώτους αισθητήρες που κατασκευάστηκαν για επι-τόπου μετρήσεις διαλυμένου μεθανίου στο θαλασσινό νερό (Garcia and Masson, 2004) και στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε μία από τις πρώτες εφαρμογές του (Christodoulou et al., 2003). Επίσης δεν είχε ξαναχρησιμοποιηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα να μην είναι γνωστή η αξιοπιστία του με την πάροδο του χρόνου. Εργαστηριακές όμως αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ASSEM (Etiope and Marinaro, 2003) έδειξαν γενικά πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ πραγματικών και μετρηθέντων συγκεντρώσεων διαλυμένου μεθανίου, με μία μικρή υποεκτίμηση στις χαμηλές συγκεντρώσεις και υπερεκτίμηση στις υψηλές συγκεντρώσεις. Επίσης ο αισθητήρας παρουσίασε μία μεταβολή της τάσεως εξόδου (σταθερή θερμοκρασία και συγκέντρωση μεθανίου) μετά από 4.5 μήνες λειτουργίας της τάξης του 0.1V που αντιστοιχεί σε συγκέντρωση μεθανίου περίπου 70-100nmol/l.

4.1.2.1.2 Μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων υδάτινης στήλης

Για την μέτρηση των φυσικοχημικών παραμέτρων της υδάτινης στήλης χρησιμοποιήθηκαν ένας πολυπαραμετρικός ρευματογράφος *Aanderaa RCM9MKII* (εικόνα 4.23) και ένα πολυπαραμετρικό σύστημα μέτρησης περιβαλλοντικών παραμέτρων του νερού *YSI XL600* (εικόνα 4.24). Ο ρευματογράφος *Aanderaa RCM9MKII* αποτελείται από ένα ρευματογράφο

Doppler και αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, αγωγιμότητας, διαλυμένου οξυγόνου, pH/δυναμικού οξειδοαναγωγής και θολερότητας. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε εσωτερική μνήμη του οργάνου και μετά αποκρυπτογραφούνται στο εργαστήριο μέσω ειδικού λογισμικού (aanderaa DRP 5059). Το σύστημα YSI XL600 αποτελείται από αισθητήρες θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, διαλυμένου οξυγόνου, pH/δυναμικού οξειδοαναγωγής. Η αναπαράγωγή των δεδομένων γίνεται μέσω καλωδίου απευθείας στον υπολογιστή μέσω ειδικού λογισμικού (EcoWatch).

Εικόνα 4.23. Ο πολυπαραμετρικός ρευματογράφος Aanderaa RCM9-MKII.

Εικόνα 4.24. Το πολυπαραμετρικό σύστημα μετρήσεων ποιότητας θαλασσινού νερού YSI XL600.

4.1.2.1.3 *Επι τόπου μετρήσεις αερίων και ροής μεθανίου στο έδαφος*

Επι-τόπου χημικές αναλύσεις μεθανίου και αιθανίου έγιναν επίσης με τη χρήση φορητού αέριου χρωματογράφου με FID *Autofim II*, *Telega*, χρησιμοποιώντας πρότυπα βαθμονόμησης Rivoira με ακρίβεια $\pm 2\%$ (εικόνα 4.25), καθώς επίσης και υδρόθειου χρησιμοποιώντας χρωματομετρικούς σωλήνες μέτρησης αερίων (RAE colorimetric tubes and sampling pump) με όριο ανιχνευσιμότητας: 0.2 ppmv, ακρίβεια $< 10\%$ (εικόνα 4.26).

Επίσης μετρήθηκε η ροή από μικροδιαφυγές από το έδαφος στις παράκτιες περιοχές των περιοχών μελέτης. Οι μετρήσεις έγιναν με τη μέθοδο του κλειστού θαλάμου (closed chamber method) (Norman et al., 1997; Klusman et al., 2000) (εικόνα 4.27). Το αέριο συγκεντρώθηκε

στο θάλαμο 10 λίτρων και από εκεί με σύριγγα συλλέχθηκε δείγμα μετά από 5 λεπτά και 20 λεπτά εγκατάστασης του θαλάμου στο έδαφος. Για τη μέτρηση του μεθανίου χρησιμοποιήθηκε φορητός αέριος χρωματογράφος με όριο ανιχνευσιμότητας 0.1 ppm, και ακρίβεια 4-5%. Οι μετρήσεις ροής διαφυγών με αυτή τη μέθοδο αντιπροσωπεύουν το 13% και το 20% των πραγματικών ροών όταν η ροή είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από 5.000 mg m⁻² d⁻¹, αντίστοιχα (Etiope et al., 2006). Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένα φορητός αισθητήρας μεθανίου τύπου Metrex 2, Huberg. Αυτός ο αισθητήρας είναι κατάλληλος για γρήγορες μετρήσεις (με τη μέθοδο του κλειστού θαλάμου σε 3-4 λεπτά) αλλά έχει μεγαλύτερο όριο ανιχνευσιμότητας (>100 mg/m².d).

Εικόνα 4.25. Ο φορητός αέριος χρωματογράφος με FID *Autofim II*, Telega

Εικόνα 4.26. Το σύστημα χρωματομετρικών σωλήνων μέτρησης αερίων

Εικόνα 4.27. Το σύστημα κλειστού θαλάμου που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ροής μεθανίου.

4.1.3 Οπτική παρακολούθηση

Για την οπτική παρακολούθηση και διερεύνηση των διαφυγών από τον πυθμένα χρησιμοποιήθηκε το κατευθυνόμενο υποβρύχιο όχημα R.O.V. Benthos MKII (εικόνα 4.28). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 5 καταδύσεις με συνολικό χρόνο εγγραφής εικόνας περίπου 6 ώρες. Επίσης σε επιλεγμένες θέσεις πραγματοποιήθηκαν καταδύσεις με αυτοδύτες με σκοπό τη φωτογράφιση του πυθμένα και των διαφυγών ρευστών.

Εικόνα 4.28. Το κατευθυνόμενο υποβρύχιο όχημα (R.O.V.) Benthos MKII

4.2 Υποβρύχιο παρατηρητήριο μακράς διάρκειας GMM

Το Υποβρύχιο παρατηρητήριο μακράς διάρκειας (GMM) είναι ένας ενόργανος βενθικός σταθμός, ο οποίος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ASSEM (εικόνα 4.29) (Christodoulou et al., 2003; Favali et al., 2004; Marinaro et al., 2004).

Εικόνα 4.29. Σχέδια του υποβρυχίου παρατηρητηρίου μακράς διάρκειας (GMM) σε όψη και σε κάτοψη.

Για τις ανάγκες παρακολούθησης της δραστηριότητας του πεδίου κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου τοποθετήθηκαν στο παρατηρητήριο GMM οι παρακάτω αισθητήρες και διατάξεις (εικόνες 4.30, 4.31):

- αισθητήρες μεθανίου CH_4 METS (methane sensors) κατασκευασμένα από την CAPSUM. Ο κάθε αισθητήρας καταγράφει την τιμή του μεθανίου στο συγκεκριμένο βάθος και την θερμοκρασία του αισθητήρα κάθε δευτερόλεπτο. Τοποθετήθηκαν τρεις αισθητήρες λόγω της αβέβαιης μακροπρόθεσμης σταθερότητας στο χρόνο αυτού του τύπου αισθητήρα.
- 1 αισθητήρας υδρόθειου H_2S από την εταιρεία AMT. Μετράει κάθε 10 λεπτά για 30 δευτερόλεπτα.
- 1 Sea Bird SBE 37-SI MicroCAT CTD (Conductivity Temperature Density). Μετράει τη θερμοκρασία, την αγωγιμότητα και την πίεση του θαλασσινού νερού και στη συνέχεια υπολογίστηκαν η πυκνότητα και η αλατότητα. Οι μετρήσεις καταγράφονται κάθε 10 λεπτά.
- 1 κυλινδρικό δοχείο (Battery Vessel) που περιέχει τη πηγή τροφοδοσίας του υποθαλάσσιου σταθμού GMM με ηλεκτρική τάση 12Vdc και χωρητικότητα 960Ah.
- 1 μικρότερο κυλινδρικό δοχείο (vessel of Data Acquisition and Control System (DACS)). Αποτελεί τον αποθηκευτικό χώρο των μετρήσεων και διαθέτει 512 Mb Compact Flash Mass Memory.

Εικόνα 4.30. Σχέδιο του υποβρύχιου παρατηρητηρίου μακράς διάρκειας (GMM) μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων.

Εικόνα 4.31. Το υποβρύχιο παρατηρητήριο παρακολούθησης μακράς διαρκείας (1:METs, 2:H₂S, 3:CTD, 4: Battery, 5: DACS).

Όλοι οι αισθητήρες προγραμματίστηκαν ώστε να λαμβάνουν μετρήσεις ανά 10 λεπτά. Λεπτομέρειες για τον σχεδιασμό και τον τρόπο λειτουργίας του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου δίνονται στο παράρτημα Ι.

Για την συσχέτιση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από το υποβρύχιο παρατηρητήριο με παράγοντες που θα μπορούσαν να επιδράσουν στις διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα χρησιμοποιήθηκαν σεισμολογικά δεδομένα από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

4.3 Μέθοδοι επεξεργασίας και ανάλυσης

4.3.1 Δεδομένα γεωφυσικής διασκόπησης

4.3.1.1 Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα

Η συλλογή των δεδομένων γεωφυσικής διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε πριν από το 2006 έγινε σε αναλογικές καταγραφές. Τα αναλογικά δεδομένα στη συνέχεια επεξεργάστηκαν με ψηφιακό σαρωτή εικόνων και τα ψηφιακά αρχεία γεωαναφέρθηκαν σύμφωνα με τα σημεία προσδιορισμού θέσης (fix points) που είχαν ληφθεί κατά τη διάρκεια της συλλογής ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους. Για την ψηφιοποίηση των σαρωμένων τομογραφιών χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί στο Ε.Θ.Α.Γ.Ε.Φ.Ω (Χάλαρη 2008).:

- η SBP_Avenue η οποία αναπτύχθηκε το 2003 σε περιβάλλον ArcView (Chalari et al, 2008), και
- η SBP-Im-An η οποία είναι εξέλιξη της πρώτης και αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab και της οποίας τα αποτελέσματα στη συνέχεια εισάγονται GIS (Fakiris et al, 2007).

Η συλλογή των δεδομένων μετά το 2006 έγινε με το Ψηφιακό σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας ακουστικών κυμάτων TRITON Elics με το λογισμικό SB-logger. Η ψηφιακή καταγραφική μονάδα Triton Elics πραγματοποιεί υψηλής συχνότητας δειγματοληψία του ηλεκτρικού σήματος που έρχεται από τον ακουστικό πομποδέκτη και καταχωρεί την προκύπτουσα πληροφορία σε ψηφιακά αρχεία *.SGY. Τα αρχεία αυτά παρέχουν τα εξής κύρια επίπεδα πληροφορίας: 1) την ακουστική ανακλαστικότητα (σε db με ύψος πληροφορίας 32 Bits) του κάθε ακουστικού παλμού, συναρτήσει του βάθους από την επιφάνεια της θάλασσας, και 2) τις γεωγραφικές συντεταγμένες του κάθε παλμού από το GPS.

4.3.1.2 Ηχοβολιστής Πλευρικής Σάρωσης

Η συλλογή των δεδομένων ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης πριν από το 2006 έγινε σε αναλογική καταγραφή. Τα αναλογικά δεδομένα στη συνέχεια επεξεργάστηκαν με ψηφιακό σαρωτή εικόνων και τα ψηφιακά αρχεία γεωαναφέρθηκαν σύμφωνα με τα σημεία προσδιορισμού θέσης (fix points) που είχαν ληφθεί κατά τη διάρκεια της συλλογής ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους. Η κατασκευή μωσαϊκών πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS.

Στα δεδομένα που συλλέχθηκαν μετά από το 2006 χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή καταγραφή. Η επεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων του Ηχοβολιστή Πλευρικής Σάρωσης περιλαμβάνει: 1) τη διόρθωση των ηχογραφιών και 2) τη κατασκευή μωσαϊκών από τις ηχογραφίες. Στα πλαίσια της διόρθωσης των ηχογραφιών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό “ISIS Sonar της Triton Imaging Inc.” και ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Εφαρμογή χρονομεταβλητής ενίσχυσης του ακουστικού σήματος (TVG: Time Varied Gain). Πρέπει να σημειωθεί πως ο Η.Π.Σ. τύπου E.G.&G 272TD παρέχει αυτόματα χρονομεταβλητή ενίσχυση και η παραπάνω χρησιμοποιήθηκε για την περαιτέρω βελτιστοποίηση των ηχογραφιών. Περιοχές του πυθμένα με υψηλή ανακλαστικότητα αποτυπώνονται με ανοιχτόχρωμους τόνους καταγραφής ενώ περιοχές του πυθμένα με χαμηλή ανακλαστικότητα με σκοτεινόχρωμους τόνους καταγραφής.
- Ζωνοδιαβατό φίλτρο (bandwidth FFT filter) διατάσεων 3x3 για την αφαίρεση θορύβου και άλλων τυχαίων ακουστικών σφαλμάτων.

- Εντοπισμός του πυθμένα (bottom tracking) με την μέθοδο Amplitude και όπου χρειάστηκε, λόγω μεγάλης διαταραχής της υδάτινης στήλης, χειροκίνητος εντοπισμός. Το στάδιο αυτό είναι απαραίτητο για την ορθή χωρική αναφορά των ηχογραφιών, κάθετα στην πορεία της τορπίλης (Slant Range Correction).
- Διόρθωση του εύρους της ζώνης σάρωσης (slant range correction) για την αφαίρεση της υδάτινης στήλης από την ηχογραφία και μετατροπή της χρονικής κλίμακας σε χωρική (ms εκπομπής-επιστροφής του ακουστικού παλμού → πλάτος του πυθμένα εκατέρωθεν της τορπίλης). Η διόρθωση γίνεται θεωρώντας την ταχύτητα του ήχου στο νερό ίση με 1500 m/sec.

Η δημιουργία των μωσαϊκών πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό “DelphMap” της “Triton Elics”. Η αξιοπιστία της γεωαναφοράς διαπιστώθηκε από την επιτυχή επικάλυψη όμοιων στόχων που είχαν αποτυπωθεί από διαδοχικές πορείες του ερευνητικού σκάφους, στη ζώνη επικάλυψής τους. Τα μωσαϊκά αποθηκεύτηκαν ως αρχεία γεωαναφερομένων εικόνων (GEO-TIFF image file) υψηλής ανάλυσης ώστε να εισαχθούν σε λογισμικό γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών για την παράθεσή τους με τα υπόλοιπα διαθέσιμα χωρικά δεδομένα (ακτογραμμές, βυθομετρία κ.α).

4.3.2 Βάση Δεδομένων

Όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, τόσο κατά τη γεωφυσική διασκόπηση, όσο και κατά τη γεωχημική διασκόπηση στο θαλάσσιο και στο χερσαίο περιβάλλον εισήχθηκαν σε μία βάση δεδομένων και επεξεργάστηκαν με γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (G.I.S.) σε περιβάλλον ArcInfo, από όπου προέκυψαν και οι χάρτες που παρουσιάζονται στην διατριβή.

4.4 Εργαστηριακές αναλύσεις

Για την εύρεση της σύνθεσης των ρευστών που διαφεύγουν από τον πυθμένα και της ισοτοπικής τους σύνθεσης με απώτερο στόχο την ταυτοποίηση της προέλευσης τους συλλέχθηκαν, με τη χρήση αυτοδυτών, δείγματα ρευστού σε γυάλινες φιάλες μεγέθους 200cm³ οι οποίες έκλεισαν αεροστεγώς κατά τη δειγματοληψία. Τα δείγματα στάλθηκαν για ανάλυση στο εργαστήριο Isotech Labs Inc. (Illinois, United States). Όλα τα δείγματα αναλύθηκαν για C₁, C₂, C₂H₄, C₃, iC₄, nC₄, iC₅, nC₅, C₆+, He, H₂, Ar, O₂, CO₂, N₂, CO, H₂S και δ¹³C₁, δDC₁.

Η ανάλυση της σύστασης των ρευστών έγινε με αέριο χρωματογράφο τύπου *Carle AGC 100–400* με ανιχνευτές Ιονισμού Φλόγας (Flame Ionization Detector, FID) και Θερμικής Αγωγιμότητας (Thermal Conductivity Detector, TCD). Το όριο ανιχνευσιμότητας είναι 40

ppmv για τα Ar, O₂, CO₂, N₂, 150 ppmv για το H₂S, 150 ppmv για το He και 10 ppmv για τους υδρογονάνθρακες, με ακρίβεια 2% και 10% στο όριο ανιχνευσιμότητας.

Η ισοτοπική ανάλυση του άνθρακα και του υδρογόνου πραγματοποιήθηκε με φασματογράφο μάζας τύπου *Finnigan Delta Plus XL* διπλής εισόδου (dual inlet) με ακρίβεια $\pm 0.1\%$ για το $\delta^{13}\text{C}_1$ και 2% για το $\delta\text{DC}_1\text{H}$.

Η φασματομετρία μάζας λόγου ισοτόπων (IRMS) είναι μια ειδίκευση της φασματομετρίας μάζας, στην οποία οι φασματομετρικές μέθοδοι μάζας χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν τη σχετική αφθονία των ισοτόπων σε ένα δεδομένο δείγμα, δηλαδή καθορίζεται μόνο η σχετική διαφορά στο λόγο του βαρέως ισοτόπου προς το πιο ελαφρύ ισότοπο του δείγματος, σε σχέση με το δείγμα αναφοράς. Αυτή η διαφορά συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα δ και ορίζεται ως εξής:

$$\delta = (R_{\text{sample}} - R_{\text{reference}} / R_{\text{reference}})$$

όπου τα R, στην περίπτωση του αέριων υδρογονανθράκων, είναι οι λόγοι των ισοτοπικών συγκεντρώσεων $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ και D/H. Στη μέθοδο IRMS διπλής εισόδου, το καθαρό αέριο που προκύπτει από το δείγμα εναλλάσσεται γρήγορα με ένα πρότυπο αέριο (γνωστής ισοτοπικής σύνθεσης), μέσω ενός συστήματος των βαλβίδων, έτσι ώστε οι μετρήσεις να γίνονται με σύγκριση των δύο αερίων. Ο διαχωρισμός των αερίων πραγματοποιείται με αέριο χρωματογράφο και στη συνέχεια ο άνθρακας που βρίσκεται στο μεθάνιο μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα μετά από καύση, και το υδρογόνο σε νερό. Το υδρογόνο του νερού που προκύπτει μετατρέπεται σε αέριο υδρογόνο με αναγωγή με τη χρήση ουρανίου στους 600°C. Στη συνέχεια τα καθαρά αέρια οδηγούνται στο φασματογράφο μάζας για ανάλυση.

Για τη μέτρηση των ισοτόπων οι αναλογίες ισοτόπων άνθρακα μετρήθηκαν σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα για το CO₂, που είναι απολιθωμένο ρύγχος βελεμνίτη (βρέθηκε στο γεωλογικό σχηματισμό PeeDee, ένας ασβεστόλιθος που διαμορφώθηκε στην κρητιδική περίοδο στη νότια Καρολίνα, ΗΠΑ) με ισοτοπικό λόγο $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ της τάξεως του 0.0112372. Οι αναλογίες των ισοτόπων του υδρογόνου υπολογίστηκαν σύμφωνα με ένα πρότυπο αναφοράς, που ονομάζεται εν συντομία SMOW και προκύπτει από τα αρχικά των λέξεων Standard Mean Ocean Water. Πρόκειται για ένα υποθετικό νερό, με ισοτοπικούς λόγους οξυγόνου και υδρογόνου ίσους με τους μέσους ισοτοπικούς λόγους του ωκεάνιου νερού. Η αναλογία D:H στο SMOW είναι $(\text{D}/\text{H}) = (155.95 \pm 0.08) \cdot 10^{-6}$. Επειδή, η διαφορά μεταξύ της αναφοράς και των δειγμάτων είναι συχνά πολύ μικρή, οι αναλογίες των ισοτόπων άνθρακα εκφράζονται ως μέρη ανά χίλια σε σχέση με το πρότυπο. Η σχέση των ισοτόπων άνθρακα και υδρογόνου των αέριων υδρογονανθράκων δίνεται στο κεφάλαιο 2.1.2.3.

Παράρτημα Ι. Χρονικό των ερευνών

ΠΙ-1. Πατραϊκός κόλπος

ΠΙ-1.1. Γεωφυσική Διασκόπηση

2 Ιούλιος-Αύγουστος 1993: Στόχος της πρώτης φάσης της έρευνας στην παράκτια ζώνη της Πάτρας ήταν η αποτύπωση του πυθμένα για την κατασκευή του Νέου Λιμένα Πατρών. Το σκάφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Βασίλειος Γ. και ο προσδιορισμός της θέσης του επιτεύχθηκε με GPS τύπου Magnavox MX200 με ακρίβεια περίπου 50m. Χρησιμοποιήθηκαν τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz με εννέα πομποδέκτες, το μήκος παλμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.1ms και το εύρος καταγραφής 0.1sec. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 50.5km πορειών παράλληλα προς την ακτή (εικόνα ΠΙ.1). Επίσης χρησιμοποιήθηκε τομογράφος υποδομής πυθμένα Sparker, με εύρος καταγραφής 0.2sec και φίλτρα HP:1000Hz, LP:3000Hz.. Πραγματοποιήθηκαν 4 πορείες παράλληλες με την ακτή συνολικού μήκους 12.2km (εικόνα ΠΙ.2). Παράλληλα με το τομογράφο υποδομής πυθμένα 3.5kHz χρησιμοποιήθηκε ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης με συχνότητα 100kHz και εύρος καταγραφής 200m (εικόνα ΠΙ.1).

Εικόνα ΠΙ.1. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz και Η.Π.Σ. στον Πατραϊκό κόλπο τον Ιούλιο – Αύγουστο 1993.

²Τα δεδομένα δεν συλλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αλλά χρησιμοποιήθηκαν μετά από νέα επεξεργασία τους.

Εικόνα ΠΙ.2. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. Sparker στον Πατραϊκό κόλπο τον Ιούλιο 1993.

²Αύγουστος 1993: Στόχος της πρώτης έρευνας στην παράκτια ζώνη της Πάτρας ήταν η αποτύπωση του πυθμένα για την κατασκευή όδευση του αγωγού του βιολογικού καθαρισμού Πατρών. Το σκάφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Βασίλειος Γ. και ο προσδιορισμός της θέσης του επιτεύχθηκε με GPS τύπου Magnavox MX200 με ακρίβεια περίπου 50m. Χρησιμοποιήθηκαν τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz με εννέα πομποδέκτες, το μήκος παλμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.1ms και το εύρος καταγραφής 0.1sec. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 27.2km πορειών παράλληλα και κάθετα προς την ακτή (εικόνα ΠΙ.3). Παράλληλα με το τομογράφο υποδομής πυθμένα χρησιμοποιήθηκε ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης με συχνότητα 100kHz και εύρος καταγραφής 200m(εικόνα ΠΙ.3).

Εικόνα ΠΙ.3. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz και Η.Π.Σ. στον Πατραϊκό κόλπο τον Αύγουστο 1993.

2Ιούνιος 1997 και Μάιος 1999: Στόχος των ερευνών ήταν η βυθομετρική αποτύπωση της περιοχής του Νέου Λιμένα Πατρών. Το σκάφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ΑΚΤΙ Ι ο προσδιορισμός της θέσης του επιτεύχθηκε με DGPS Trimble με ακρίβεια $\pm 2m$. Χρησιμοποιήθηκε υδρογραφικό μονοδεσμικό βυθόμετρο και πραγματοποιήθηκαν 186km χιλιόμετρα πορειών και απωτυπώθηκε με μεγάλη λεπτομέρεια περιοχή έκτασης 1.25km².

Εικόνα ΠΙ.4. Χάρτης όπου φαίνονται τα βυθομετρικά σημεία από τα ψηφιακά δεδομένα του βυθομέτρου στον Πατραϊκό κόλπο για τις περιόδους 1997 και 1999.

Ιούνιος 2002: Στόχος των ερευνών ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της κατασκευής του Νέου Λιμένα Πατρών στο πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου. Το σκάφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Ζωή και ο προσδιορισμός της θέσης του επιτεύχθηκε με DGPS Trimble με ακρίβεια $\pm 2\text{m}$. Χρησιμοποιήθηκε τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz με τέσσερις πομποδέκτες, το μήκος παλμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.1ms και το εύρος καταγραφής 0.1sec. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 33.6km πορειών κάθετα στην ακτή.

Εικόνα ΠΙ.5. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz στον Πατραϊκό κόλπο τον Αύγουστο 2002.

Ιούλιος 2007: Στόχος των ερευνών ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της κατασκευής του Νέου Λιμένα Πατρών στο πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου. Το σκάφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Ειρήνη και ο προσδιορισμός της θέσης του επιτεύχθηκε με GPS Magellan NAV 6500 με ακρίβεια $\pm 10\text{m}$. Χρησιμοποιήθηκε τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz με τέσσερις πομποδέκτες, το μήκος παλμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.1ms με ψηφιακή καταγραφή. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 20.6km πορειών παράλληλα και κάθετα στην ακτή.

Εικόνα ΠΙ.6. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz στον Πατραϊκό κόλπο τον Ιούλιο 2007.

Ιούνιος 2008: Στόχος της έρευνας ήταν η διερεύνηση της ενεργοποίησης του πεδίου μετά από τον ισχυρό σεισμό της 6^{ης} Ιουνίου 2008. Το που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Ειρήνη και ο προσδιορισμό της θέσης του επιτεύχθηκε με GPS Hemisphere V100 με ακρίβεια $\pm 2.5\text{m}$. Χρησιμοποιήθηκε ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης με ψηφιακή μονάδα καταγραφής. Η συχνότητα που επιλέχτηκε ήταν 100kHz και το εύρος καταγραφής 100m. Πραγματοποιήθηκαν χιλιόμετρα πορειών παράλληλων προς την ακτή και η ίδια έρευνα επαναλήφθηκε 3 φορές ακόμα για την εύρεση της χρονικής μεταβολής του φαινομένου (εικόνα ΠΙ.7).

Μάιος - Αυγουστος 2009: Στόχος των ερευνών ήταν η διερεύνηση της συνέχισης ή όχι του φαινομένου που καταγράφηκε ένα χρόνο πριν και γι αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν ακριβώς οι ίδιες παράμετροι με την έρευνα του 2008 και υλοποιήθηκαν οι ίδιες πορείες πλευσης (εικόνα ΠΙ.7).

Εικόνα ΠΙ.7. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Η.Π.Σ. στον Πατραϊκό κόλπο τον Ιούνιο 2008, Μάιο και Αύγουστο 2009.

ΠΙ-1.2. Γεωχημική Διασκόπηση

Η γεωχημική διασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στον Πατραϊκό μπορεί να διακριθεί στην υποθαλάσσια γεωχημική διασκόπηση και σε αυτή στο παράκτιο τμήμα.

ΠΙ-1.2.1 Υποθαλάσσιο τμήμα

Μάρτιος 2002 – Οκτώβριος 2003: Σε αυτό το χρονικό διάστημα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε κατακόρυφα προφίλ σε 14 επιλεγμένες θέσεις (εικόνα ΠΙ.8) με σκοπό τη διερεύνηση τυχόν διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα στην υδάτινη στήλη. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε οχτώ περιόδους και η κάθε περίοδος περιελάμβανε 1 έως 3 ημερήσιους πλόες. Συγκεκριμένα μετρήσεις έγιναν στις 22-25/05/2002, 19/05/2002, 4-5/09/2002, 2/10/2002, 24-25/11/2002, 8-9/06/2003, 31/7-1/08/2003, 4-5/10/2003. Χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρας μεθανίου σε συνδυασμό με μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων της υδάτινης στήλης.

Εικόνα ΠΙ.8. Οι θέσεις μετρήσεων γεωχημικών παραμέτρων στον Πατραϊκό κόλπο

ΠΙ-1.2.2 Παράκτιο τμήμα

Ιούλιος 2005: Σκοπός της έρευνας ήταν η διερεύνηση διαφυγών μεθανίου από το έδαφος στην παράκτια ζώνη που βρίσκεται το πεδίο κρατήρων και κατά μήκος του ρήγματος της Αγίας Τριάδας (εικόνα ΠΙ.9.). Χρησιμοποιήθηκε φορητός αέριος χρωματογράφος και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ροής μεθανίου σε 21 θέσεις. Επίσης σε μία θέση, όπου διαπιστώθηκε πολύ μεγάλη ροή μεθανίου προς την ατμόσφαιρα σε μία γεώτρηση συλλέχθηκαν δύο δείγματα για χημική ανάλυση (1 αερίου και 1 νερού).

Ιούλιος 2007: Επαναλήφθηκε η ίδια γεωχημική διασκόπηση με αυτή του 2005 αλλά χρησιμοποιήθηκε φορητός αισθητήρας μεθανίου και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ροής μεθανίου σε 21 θέσεις (εικόνα ΠΙ9).

Εικόνα ΠΙ.9. Οι θέσεις μετρήσεων ροής μεθανίου και δειγματοληψίας στην παράκτια ζώνη του πεδίου.

ΠΙ-1.3. Οπτική Παρακολούθηση

Οκτώβριος 2003: Πραγματοποιήθηκαν 2 καταδύσεις με το ROV σε βάθος 42 μέτρα στον σύνθετο κρατήρα PP4, όπου θα στη συνέχεια ποντίστηκε το υποθαλάσσιο παρατηρητήριο.

ΠΙ-1.4. Τηλεμετρική παρακολούθηση –

Υποβρύχιο Παρατηρητήριο

ΠΙ-1.4.1. Σχεδιασμός και λειτουργία

Ο σταθμός είναι βασισμένος σε ένα ελαφρύ κυκλικό τρίποδο αλουμινίου. Τα πόδια είναι μεγάλου μεγέθους για να αποτρέπουν την βύθιση στο ιζημα. Το βάρος του πλαισίου είναι 195kg στον αέρα και 110kg στο νερό, η συνολική διάμετρός του είναι 1485 χιλιοστά και το ύψος του 1565 χιλιοστά. Το πλαίσιο GMM σχεδιάστηκε για ένα μέγιστο βάθος 1000 μέτρων και με αυτονομία σε ηλεκτρική ενέργεια 10 περίπου μήνες.

Όλοι οι αισθητήρες που εγκαθίστανται σε GMM ρυθμίζονται από μία κεντρική μονάδα βασισμένη σε έναν μικροεπεξεργαστή 32-bit που τροφοδοτείται από τάση 12 vdc. Η κατανάλωση ισχύος είναι μεταξύ 80 mA (σε αναμονή) σε 150 mA (σε λειτουργία) με τη

μέγιστη κατανάλωση του 550mA. Το GMM έχει επίσης έναν πίνακα θέσης για να ελέγχει την τάση, το ρεύμα, τη θερμοκρασία, την πίεση, την επιτάχυνση και αισθητήρα υγρασίας σε περίπτωση εισόδου νερού.

Η ηλεκτρονική κεντρική μονάδα εκτελεί τις παρακάτω λειτουργίες:

- Ανάκτηση των δεδομένων όλους τους αισθητήρες
- Προετοιμασία και η συνεχής αναπροσαρμογή των ωριαίων μηνυμάτων στοιχείων, και διαβίβαση τους κατόπιν αιτήσεως
- Διαχείριση αισθητήρων (ενεργοποίηση/απενεργοποίηση των μεμονωμένων αισθητήρων σύμφωνα με την εντολή από το χειριστή)
- Επεξεργασία των στοιχείων μεθανίου για ανίχνευση περιστατικών γεγονότων (ξαφνικές αλλαγές της συγκέντρωσης μεθανίου) διαχείριση των εντολών (π.χ., αίτημα στοιχείων, επανασχηματισμός συστημάτων, καινούριο ξεκίνημα) υποστήριξη των στοιχείων στην εσωτερική μνήμη.

Στα πλαίσια του προγράμματος ASSEM, το GMM διαμορφώθηκε και τοποθετήθηκαν τα παρακάτω:

- 3 αισθητήρες μεθανίου CH₄ METS (methane sensors) κατασκευασμένα από την CAPSUM. Ο κάθε αισθητήρας καταγράφει την τιμή του μεθανίου στο συγκεκριμένο βάθος και την θερμοκρασία του αισθητήρα κάθε δευτερόλεπτο. Τοποθετήθηκαν τρεις αισθητήρες λόγω της αβέβαιης μακροπρόθεσμης σταθερότητας στο χρόνο αυτού του τύπου αισθητήρα.
- 1 αισθητήρας υδρόθειου H₂S από την εταιρεία AMT. Μετράει κάθε 10 λεπτά για 30 δευτερόλεπτα.
- 1 Sea Bird SBE 37-SI MicroCAT CTD (Conductivity Temperature Density). Μετράει τη θερμοκρασία, την αγωγιμότητα και την πίεση του θαλασσινού νερού και στη συνέχεια υπολογίστηκαν η πυκνότητα και η αλατότητα. Οι μετρήσεις καταγράφονται κάθε 10 λεπτά.
- 1 κυλινδρικό δοχείο (Battery Vessel) που περιέχει τη πηγή τροφοδοσίας του υποθαλάσσιου σταθμού GMM με ηλεκτρική τάση 12Vdc και χωρητικότητα 960Ah.
- 1 μικρότερο κυλινδρικό δοχείο (vessel of Data Acquisition and

Control System (DACS)). Αποτελεί τον αποθηκευτικό χώρο των μετρήσεων και διαθέτει 512 Mb Compact Flash Mass Memory.

Αντίθετα από το CTD, που σχεδιάζεται για τον λειτουργία μακράς περιόδου, οι αισθητήρες CH_4 είναι εμπορικά διαθέσιμες εκδόσεις για βραχυπρόθεσμα εφαρμογές και η μακροπρόθεσμη απόδοσή τους δεν είχε εξεταστεί στο παρελθόν. Για αυτόν τον λόγο οι τρεις αισθητήρες μεθανίου τοποθετήθηκαν στη σειρά (διαμόρφωση τύπων "περίστροφων") με έναν κύριο και δύο συνοδευτικούς αισθητήρες χρήσιμους να αντικαταστήσουν τον κύριο σε περίπτωση κακής λειτουργίας. Η διαμόρφωση "περίστροφων" επιτρέπει να έχει δύο αισθητήρες METS που λειτουργούν παράλληλα και να συγκρίνει τα στοιχεία επίσης.

Οι μετρήσεις από τους παραπάνω αισθητήρες καταγράφονται στην μνήμη του GMM (στο DACS vessel) και προεπεξεργάζονται για να δημιουργηθούν περιοδικές μετρήσεις δεδομένων (PMM, Periodic Measurements Message) όπου κάθε μια ώρα στέλνονται στον ASSEM-server μέσω του σταθμού ακτής.

Επίσης κάθε μια ώρα στέλνονται στον ASSEM-server περιοδικά μηνύματα (PTM, Periodic Technical Message) που περιέχουν διαγνωστικές πληροφορίες για την κατάσταση της μνήμης του GMM (πόσα ελεύθερα bytes διαθέτει), την κατάσταση των αισθητήρων και τον τρόπο λειτουργίας του GMM.

Τέλος στον ASSEM-server κάθε μια ώρα στέλνονται προειδοποιητικά μηνύματα κινδύνου (GAM, Geohazard Alarm Message). Το GAM λειτουργεί ως εξής: για την αναγνώριση σημαντικών μεταβολών στις μετρήσεις του μεθανίου τίθεται σε εφαρμογή ένας αλγόριθμος. Ο αλγόριθμος επεξεργάζεται 10λεπτά από δείγματα μετρήσεων, συγκρίνει την λόγο αύξησης μεταξύ δύο συνεχόμενων τιμών συγκέντρωσης μεθανίου και με καθορισμένο, διαμορφωμένο από τον χρήστη, όριο Th (εκφρασμένο ως μεταβολή της συγκέντρωσης προς το χρόνο, π.χ. $\mu\text{mol/l} \cdot \text{min}$). Εάν ο λόγος αύξησης είναι μεγαλύτερος από το όριο για 5 συνεχόμενους χρόνους μέσα σε 10 λεπτά, τότε το GAM ενεργοποιείται και ένα μήνυμα στέλνεται στον ASSEM-server, ενώ ταυτόχρονα ένα αρχείο GAM καταγράφεται στη μνήμη του GMM. Το μήνυμα περιέχει τον αρχικό χρόνο του γεγονότος και την τιμή του λόγου αύξησης της

μέτρησης. Κάθε 10 λεπτά, το μέγιστο μήνυμα προειδοποίησης που μπορεί να στείλει το GMM είναι ένα, ακόμα και στην περίπτωση που έχουν συμβεί παραπάνω από ένα γεγονότα.

Το GMM συνδέθηκε με έναν σταθμό ακτής μέσω ενός υποβρύχιου καλωδίου. Ο σταθμός ακτής αποτελέστηκε από ένα μεταλλικό κιβώτιο που περιείχε μια ηλεκτρονική μονάδα (SEU, Shore Electronic Unit) που διασυνδέθηκε στη μια πλευρά με το καλώδιο από το GMM και στην άλλη πλευρά με το τηλεφωνικό δίκτυο με γραμμή PSTN, εφαρμόζοντας το πρωτόκολλο TCP/IP, για να επικοινωνεί το SEU με τον ASSEM-server.

Συνεπώς ο χρήστης μέσω του ASSEM-server είχε τη δυνατότητα κάθε στιγμή να ελέγχει τη λειτουργία του GMM και να μεταφορτώνει τα δεδομένα στο εργαστήριο. Ο πίνακας δεδομένων έχει τη μορφή του πίνακα ΠΙ.1

Πίνακας ΠΙ.1. Τυπικό παράδειγμα δεδομένων GMM από τον ASSEM-server.

date	time	ch4 nmol/l	T ch4 °C	T ctd °C	cond S/m	press dbar	H2S ug/l
17/5/2004	0.00	0,000	17,82	17,06	4,92	40,13	103
17/5/2004	0.10	0,000	17,84	17,07	4,92	40,15	104
17/5/2004	0.20	0,000	17,86	17,07	4,92	40,16	103
17/5/2004	0.30	0,000	17,90	17,10	4,92	40,18	105
17/5/2004	0.40	0,000	17,84	17,07	4,92	40,16	105
17/5/2004	0.50	0,000	17,83	17,08	4,92	40,18	105
17/5/2004	1.00	0,000	17,83	17,08	4,92	40,18	108
17/5/2004	1.10	0,000	17,80	17,08	4,92	40,16	105
17/5/2004	1.20	0,010	17,81	17,08	4,92	40,15	109
17/5/2004	1.30	0,003	17,87	17,09	4,92	40,16	107
17/5/2004	1.40	0,000	17,88	17,12	4,92	40,17	104

ΠΙ-1.4.2. Εγκατάσταση του υποθαλάσσιου σταθμού GMM και κατασκευή του σταθμού ακτής

Στην παράκτια ζώνη (ακτή Δυμαίων) σε θέση που απέχει από τον κρατήρα P4 500m και με δυνατότητα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος από την κολώνα της ΔΕΗ που υπάρχει στο σημείο αυτό, και παροχής τηλεφωνικής γραμμής κατασκευάστηκε ο σταθμός ακτής του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου. Διαμορφώθηκε το δάπεδο ώστε να είναι οριζόντιο και στερεώνεται το μεταλλικό κουτί που είναι στηριγμένο σε δύο σιδερένιους πασσάλους. Στη συνέχεια έγιναν οι κατάλληλες ηλεκτρικές και τηλεφωνικές εγκαταστάσεις. Το

μεταλλικό κουτί βάφτηκε με λευκό χρώμα για αποφυγή αύξησης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του. Τοποθετήθηκε το τύμπανο με το καλώδιο εντός των ορίων του τσιμεντένιου δαπέδου και ο χώρος περιφράχθηκε με συρματόπλεγμα. Οι παραπάνω εργασίες ξεινήσαν στις 14 Απριλίου του 2004 και τελείωσαν στις 20 του ίδιου μήνα.

Στις 23 Απριλίου έγινε η τοποθέτηση του υποθαλάσσιου σταθμού GMM στο κρατήρα P4, στο Πατραϊκό κόλπο καθώς και η σύνδεσή του με το σταθμό ακτής. (εικόνες ΠΙ.10, ΠΙ.11). Το σκάφος «Βασίλειος», με το GMM και με τη βοήθεια GPS έπλευσε πάνω από τον κρατήρα. Ένα μικρότερο σκάφος χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του καλωδίου από την ακτή προς τη θέση πόντισης. Η ανάπτυξη του καλωδίου έγινε με αργό ρυθμό ώστε να μην τεντωθεί και σπάσει το καλώδιο και υποστηρίχθηκε με πλωτήρες για να επιπλέει και να μην σύρεται το καλώδιο στο πυθμένα μέχρι να φτάσει στο άλλο σκάφος. Συνδέθηκε το καλώδιο με το GMM, έγιναν οι τελευταίες ρυθμίσεις και έλεγχοι στα όργανα του τελευταίου συνδεδεμένο πλέον με το καλώδιο και έχοντας επικοινωνία με το σταθμό ακτής. Με την πολύτιμη καθοδήγηση τριών δυτών, η τοποθέτηση του GMM στο κρατήρα διεξάχθηκε με ακρίβεια ενώ ταυτόχρονα αφαιρέθηκαν οι πλωτήρες από το καλώδιο ώστε αυτό να βυθιστεί στον πυθμένα. Επίσης τοποθετήθηκε φωτοσημαντήρας για την ασφάλεια του παρατηρητηρίου και της ναυσιπλοίας.

Εικόνα ΠΙ.10. Χάρτης όπου φαίνονται οι θέσεις πόντισης του υποβρύχιου παρατηρητηρίου και η θέση προσεγγιαλώσεως του καλωδίου σύνδεσης.

Εικόνα ΠΙ.11. Σειρά σχεδιαγραμμάτων που αναπαριστούν την μέθοδο πόντιση του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου και του καλωδίου σύνδεσής του με το σταθμό ακτής.

Στις 30 Ιουλίου 2004 λόγω της διακοπής επικοινωνίας με το υποβρύχιο παρατηρητήριο στις 27 Ιουλίου πραγματοποιήθηκε οπτική επόπτευση και βιντεοσκόπηση με αυτοδύτη του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου και του καλωδίου σύνδεσής ώστε να διαπιστωθεί η κατάσταση του και εάν η διακοπή επικοινωνίας οφειλόταν σε κόψιμο του καλωδίου. Ο υποθαλάσσιος σταθμός ανελκύθηκε στις 27 Ιουλίου για να διαπιστωθεί το πρόβλημα. Η διακοπή επικοινωνίας οφειλόταν σε πρόβλημα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων της κεντρικής μονάδας λόγω της διάβρωσης που υπέστησαν οι αισθητήρες μεθανίου. Στη συνέχεια καθαρίστηκε,

αντικαταστάθηκαν δύο αισθητήρες μεθανίου. Η δεύτερη πόντιση του σταθμού πραγματοποιήθηκε στις 27 Αυγούστου, χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία πόντισης και η τελική ανέλκυση του έγινε στις 14 Ιανουαρίου του επόμενου έτους.

ΠΙ-2. Δυτικός Κορινθιακός Κόλπος – Όρμος Ελαιώνα

ΠΙ-2.1. Γεωφυσική Διασκόπηση

Αύγουστος 2001: Στόχος της πρώτης έρευνας στον Όρμο του Ελαιώνα ήταν η αποτύπωση του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών που έχει αρχικά εντοπιστεί από τον Soter, 1999. Το σκάφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Άγιος Νικόλαος στο οποίο τοποθετήθηκε τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5kHz με τέσσερις πομποδέκτες, το μήκος παλμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.1ms και το εύρος καταγραφής 0.1sec. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 12.3km πορειών κάθετα και παράλληλα στην ακτή (εικόνα ΠΙ.11). Επίσης χρησιμοποιήθηκε ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης EG&G260, με αναλογική καταγραφή. Επιλέχθηκε εύρος σάρωσης 2X100m και συχνότητα 100kHz. Πραγματοποιήθηκαν 4 πορείες παράλληλες στην ακτή συνολικού μήκους 5.4km (εικόνα ΠΙ.12). Η ναυσιπλοΐα και ο προσδιορισμό θέσης έγιναν με GPS Magellan NAV 6500.

Ιούνιος 2006: Στόχος της παρούσας έρευνας ήταν η ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης με ψηφιακή καταγραφή. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με το σκάφος Ειρήνη και υποστηρίχθηκε από GPS Magellan NAV 100. Επιλέχθηκε εύρος σάρωσης 2X100m και συχνότητα 100kHz. Πραγματοποιήθηκαν 6 πορείες παράλληλες και 2 κάθετες στην ακτή συνολικού μήκους 15.2km (εικόνα ΠΙ.13) .

Εικόνα ΠΙ.12. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz και Η.Π.Σ. στον Όρμο του Ελαιώνα τον Αύγουστο 2001.

Εικόνα ΠΙ.13. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Η.Π.Σ. στον Όρμο του Ελαιώνα τον Ιούνιο 2006.

ΠΙ-2.2. Γεωχημική Διασκόπηση

Σεπτέμβριος 2002, Αύγουστος 2003: Σε αυτό το χρονικό διάστημα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε κατακόρυφα προφίλ σε 4 επιλεγμένες θέσεις (εικόνα ΠΙ.14) με σκοπό τη διερεύνηση τυχόν διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα στην υδάτινη στήλη. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 4 ημερήσιους πλόες. Συγκεκριμένα μετρήσεις έγιναν στις 9/9/2002, 12/09/2002, 20/09/2002, 25/8/2003. Χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρας μεθανίου σε συνδυασμό με μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων της υδάτινης στήλης με τη χρήση του συστήματος μέτρησης ποιότητας θαλασσινού νερού YSI XL600. Επίσης για την καλύτερη προσέγγιση των αισθητήρων στο κέντρο των κρατήρων τοποθετήθηκαν είτε στο ROV είτε χρησιμοποιήθηκε αυτοδύτης.

Εικόνα ΠΙ.14. Χάρτης όπου φαίνονται οι θέσεις μετρήσεων γεωχημικών και φυσικών παραμέτρων στον Όρμο του Ελαιώνα.

ΠΙ-2.3. Οπτική Παρατήρηση

Σεπτέμβριος 2002: Πραγματοποιήθηκαν 3 καταδύσεις με το ROV σε δύο επιλεγμένους κρατήρες διαφυγής ρευστών συνολικής διάρκειας 5 ωρών.

Ιούνιος - Ιούλιος 2007: Πραγματοποιήθηκαν πολλές καταδύσεις σε 6 κρατήρες διαφυγής ρευστών αυτοδύτη με σκοπό τη λεπτομερή τους φωτογράφιση.

ΠΙ-3. Κόλπος Κατάκολου

ΠΙ-3.1. Γεωφυσική Διασκόπηση

Ιούλιος 2005: Στόχος της παρούσας έρευνας ήταν η καταγραφή των επιφανειακών ιζημάτων και η διαπίστωση άμεσων ή έμμεσων αποδείξεων διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα. του κόλπου του Κατάκολου. Χρησιμοποιήθηκε το σκάφος 'Αναστάσιος-Μαριάντζελα' στο οποίο τοποθετήθηκε τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5kHz με τέσσερις πομποδέκτες και αναλογική καταγραφή. Το μήκος παλμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.1ms και το εύρος καταγραφής 0.1sec. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 59.5km πορειών κάθετα και παράλληλα στην ακτή (εικόνα ΠΙ.15).

Εικόνα ΠΙ.15. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με Τ.Υ.Π. 3.5kHz και οι θέσεις μετρήσεων METS στον κόλπο του Κατακόλου.

Ιούλιος 2006: Στόχος της έρευνας ήταν η απωτύπωση του πυθμένα και η διερεύνηση διαφυγών ρευστών στην υδάτινη στήλη. Χρησιμοποιήθηκε το σκάφος 'Αναστάσιος-Μαριάντζελα' στο οποίο τοποθετήθηκε ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης με ψηφιακή καταγραφή. Επιλέχθηκε εύρος σάρωσης 2X100m και συχνότητα

100kHz. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 15.5 km πορειών (εικόνα ΠΙ.16) και καλύφθηκε μία περιοχή 0.8 km².

Εικόνα ΠΙ.16. Χάρτης όπου φαίνονται οι πορείες που υλοποιήθηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στον κόλπο του Κατακόλου.

ΠΙ-3.2. Γεωχημική Διασκόπηση

Η γεωχημική διασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στον κόλπο του Κατακόλου μπορεί να διακριθεί στην υποθαλάσσια γεωχημική διασκόπηση και στη χερσαία γεωχημική διασκόπηση.

ΠΙ-3.2.1. Υποθαλάσσιο τμήμα

Απρίλιος 2004: Πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία νερού και φυσαλίδων αερίου στην περιοχή του λιμένα για την χημική ανάλυση των ρευστών που διαφεύγουν από τον πυθμένα, με τη βοήθεια αυτοδότη. Τα δείγματα αποθηκεύθηκαν αεροστεγώς σε γυάλινα μπουκαλάκια και στάλθηκαν για ανάλυση στο εργαστήριο (εικόνα ΠΙ.17).

Εικόνα ΠΙ.17. Χάρτης όπου φαίνονται οι θέσεις δειγματοληψίας και φωτογράφισης στον κόλπο του Κατακόλου

Ιούλιος 2005: Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με αισθητήρα μεθανίου σε τέσσερις θέσεις νότια του λιμένα Κατάκολου (εικόνα ΠΙ.14). Εντός του λιμένα η συγκέντρωση του διαλυμένου μεθανίου ήταν πολύ μεγάλη και ο αισθητήρας μεθανίου βγήκε από τα όρια μετρησιμότητας.

ΠΙ-3.2.2. Παράκτιο τμήμα

Ιούλιος 2004: Σκοπός της έρευνας ήταν η διερεύνηση διαφυγών αερίων α) στην περιοχή του λιμένα Κατάκολου και β) στην περιοχή του φάρου Κατακόλου. Χρησιμοποιήθηκε φορητός αέριος χρωματογράφος και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ροής μεθανίου σε 9 και 9 θέσεις αντίστοιχα (εικόνα ΠΙ.18). Επίσης συλλέχθηκαν δείγματα αερίου χρησιμοποιώντας κατάλληλο θάλαμο και χωνί και τα δείγματα αποθηκεύθηκαν αεροστεγώς σε γυάλινα μπουκαλάκια και στάλθηκαν για ανάλυση στο εργαστήριο.

Εικόνα ΠΙ.18. Χάρτης όπου φαίνονται οι θέσεις μετρήσεων ροής μεθανίου και δειγματοληψίας στη χερσόνησο του Κατάκολου.

ΠΙ-3.3. Οπτική Παρατήρηση

Κατά τη διάρκεια των καταδύσεων για τη δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε και φωτογράφιση των διαφυγών ρευστών από τον αυτοδύτη (εικόνα ΠΙ.17).

Κεφάλαιο 4^ο

Πατραϊκός Κόλπος

5 ΠΑΤΡΑΪΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ

5.1 Το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου

Η σύνθεση των βυθομετρικών δεδομένων που προέκυψαν από τις γεωφυσικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν οδήγησαν στην κατασκευή ενός λεπτομερούς βυθομετρικού χάρτη στον οποίο αποτυπώνεται ένα πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών στο Νοτιοανατολικό τμήμα του Πατραϊκού κόλπου, στην παράκτια ζώνη της Πάτρας (εικόνα 5.1) (Christodoulou et al., 2003; Paratheodorou et al., 2007). Στο μωσαϊκό ηχογραφιών της Εικόνας 5.2. αποτυπώνεται το πεδίου κρατήρων με βάση την ανακλαστικότητα του πυθμένα. Το πεδίο καλύπτει μία έκταση 2km^2 μεταξύ των ισοβαθών 10 και 50 μέτρων στο νότιο τμήμα της πόλης της Πάτρας στην ευρύτερη περιοχή κατασκευής του Νέου Λιμένα Πατρών. Στα βόρεια περιορίζεται από την υποθαλάσσια προέκταση του ρήγματος της Αγίας Τριάδας ενώ στα Νότια επεκτείνεται έως τις εκβολές του Γλαύκου ποταμού. Αποτελείται από συνολικά 92 κρατήρες οι οποίοι καλύπτουν έκταση 0.4 km^2 , δηλαδή το 20% περίπου του πυθμένα (εικόνα 5.3).

Εικόνα 5.1. Βυθομετρικός χάρτης της παράκτιας ζώνης της Πάτρας όπου φαίνεται το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου. Στον ένθετο χάρτη του Πατραϊκού κόλπου φαίνεται η θέση του πεδίου κρατήρων.

Εικόνα 5.2. Μωσαϊκό ηχογραφιών όπου αποτυπώνεται το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατράϊκού κόλπου.

Εικόνα 5.3. Βυθομετρικός χάρτης της περιοχής όπου φαίνεται η θέση των κρατήρων διαφυγής ρευστών και ηχογραφίες στις οποίες αποτυπώνονται κοινοί (β), αρχικοί (γ) και σύνθετοι (δ) κρατήρες, (ε) ιστόγραμμα συμμετοχής μορφολογικών κλάσεων στο σύνολο των κρατήρων διαφυγής ρευστών.

5.1.1 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Οι κρατήρες σύμφωνα με τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά μπορούν να διακριθούν σε τρεις κύριες μορφολογικές κλάσεις (πίνακας 5.1) (εικόνες 5.3 και 5.4):

- Αρχικοί ή Μοναδιαίοι κρατήρες:: έχουν διάμετρο από 10 έως 40 μέτρα και το σχετικό βάθος τους κυμαίνεται από 1 έως 5 μέτρα. Είναι μικροί κρατήρες και μπορούν να χαρακτηριστούν ότι βρίσκονται σε ένα πρώιμο στάδιο ανάπτυξης.
- Κοινοί κρατήρες:: είναι κυκλικοί ή ελλειψοειδείς σε κάτοψη, έχουν διάμετρο που κυμαίνεται από 30 έως 150 μέτρα και το σχετικό βάθος τους φτάνει τα 20 μέτρα. Οι κρατήρες αυτοί μπορούν να χαρακτηριστούν ότι βρίσκονται σε ένα ώριμο στάδιο ανάπτυξης.
- Σύνθετοι κρατήρες:: έχουν ακανόνιστο σχήμα σε κάτοψη, το μέγεθος τους είναι μεγάλο και φτάνει σε περίμετρο τα 900 μέτρα και το σχετικό βάθος τους φτάνει έως τα 22 μέτρα. Είναι κρατήρες που προέκυψαν από τη συνένωση γειτονικών κοινών κρατήρων.

Η γεωγραφική κατανομή των κρατήρων δείχνει ότι το πεδίο μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κύριους τομείς. Ο βόρειος τομέας περιλαμβάνει 60 κρατήρες σε μία περιοχή 1 km², ενώ ο νότιος τομέας περιλαμβάνει 32 κρατήρες επίσης σε μία περιοχή 1 km², με αποτέλεσμα ο βόρειος τομέας να χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πυκνότητα κρατήρων σε σχέση με το νότιο. Εκτός από το διαχωρισμό των τομέων λόγω πυκνότητας, ο ίδιος διαχωρισμός προκύπτει σύμφωνα με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κρατήρων. Ο βόρειος τομέας περιλαμβάνει όλες τις μορφολογικές κλάσεις ενώ ο νότιος τομέας περιλαμβάνει κυρίως σύνθετους κρατήρες, οι οποίοι με λίγους κοινούς και μοναδιαίους σχηματίζουν τοπικά συστάδες κρατήρων. Στο βόρειο τομέα του πεδίου επίσης παρατηρούνται δύο γραμμικές διατάξεις κρατήρων στο χώρο, μία βόρεια διεύθυνσης ΔΝΔ-ΑΒΑ που οριοθετεί και το βόρειο άκρο του πεδίου και μία νοτιότερα, διεύθυνσης ΔΒΔ-ΑΝΑ, η οποία αποτελεί το νότιο άκρο του βόρειου τομέα (εικόνες 5.1, 5.2 και 5.3). Στον πίνακα 5.1 δίνονται τα κύρια μορφολογικά χαρακτηριστικά των κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου (εικόνα 5.4) και στις εικόνες 5.5, 5.6, 5.7 και 5.8 τα ιστογράμματα των μορφολογικών χαρακτηριστικών.

Πίνακας 5.1. Τα κύρια μορφομετρικά χαρακτηριστικά των κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου.

Κωδικός	X (UTM)	Y (UTM)	Περίμετρος (m)	Εμβαδόν (m ²)	Σχ.Βάθος (m)	Βάθος (m)	Διάμετρος (m)	Μορφολογικός Χαρακτηρισμός
PP1	562566	4230777	401	10776	16	38	140	Σύνθετος
PP2	562301	4230677	265	4885	10	42	-	Σύνθετος
PP3	561914	4230119	739	27159	13	48	-	Σύνθετος
PP4	562108	4229604	898	38637	22	42	-	Σύνθετος
PP5	562463	4231083	326	7712	12	46	131	Κοινός
PP6	562718	4230641	320	6398	7	22	-	Σύνθετος
PP7	562266	4230858	700	17289	15	50	-	Σύνθετος
PP8	562462	4231430	721	24046	14	49	-	Σύνθετος
PP9	562878	4231665	350	6780	14	39	127	Σύνθετος
PP10	562773	4231651	185	2650	12	41	57	Κοινός
PP11	562283	4230000	270	4882	6	32	-	Σύνθετος
PP12	562733	4231588	245	4285	9	41	84	Σύνθετος
PP13	562650	4231470	382	7790	9	43	-	Σύνθετος
PP14	562634	4231306	227	3693	8	38	68	Κοινός
PP15	562588	4230842	140	1486	7	32	40	Κοινός
PP16	562148	4230405	626	17954	11	42	-	Σύνθετος
PP17	562797	4231187	323	7414	16	36	-	Σύνθετος
PP18	562865	4231233	143	1547	7	27	45	Κοινός
PP19	562647	4231653	231	3407	12	42	62	Κοινός
PP20	562856	4231558	145	1617	5	30	40	Κοινός
PP21	562897	4231430	205	3251	9	29	65	Κοινός
PP22	562915	4231620	155	1829	5	30	50	Κοινός
PP23	562975	4231671	156	1842	4	22	51	Κοινός
PP24	562523	4231574	263	5055	14	49	-	Σύνθετος
PP25	562483	4231631	110	804	5	41	33	Κοινός
PP26	562698	4231534	80	468	1	32	12	Αρχικός
PP27	562815	4231450	73	388	2	27	15	Αρχικός
PP28	562825	4231408	60	189	1	26	10	Αρχικός
PP29	562771	4231445	45	146	1	29	9	Αρχικός
PP30	562779	4231390	186	2383	4	32	-	Σύνθετος
PP31	562729	4231334	142	1446	3	31	50	Κοινός
PP32	562752	4231422	45	130	1	29	10	Αρχικός
PP33	562754	4231495	149	1614	3	32	43	Κοινός
PP34	562723	4231406	65	295	1	31	18	Αρχικός
PP35	562563	4231222	147	1529	4	35	48	Κοινός
PP36	562709	4231219	180	2120	8	36	-	Σύνθετος
PP37	562655	4231089	196	2748	7	34	62	Κοινός
PP38	562571	4231013	308	5919	7	37	-	Σύνθετος
PP39	562286	4230777	90	595	6	40	28	Κοινός
PP40	562338	4231090	205	3087	11	48	6-	Κοινός
PP41	562362	4231180	220	3595	11	49	77	Κοινός
PP42	562244	4231294	243	4520	11	52	75	Κοινός
PP43	562322	4231378	165	1789	7	48	53	Κοινός
PP44	562410	4231239	342	6992	13	53	-	Σύνθετος
PP45	562294	4231330	150	1707	6	48	53	Κοινός
PP46	562273	4231372	106	818	4	48	50	Κοινός
PP47	562199	4231373	268	4162	5	48	-	Σύνθετος
PP48	562141	4231453	416	1260	5	48	-	Σύνθετος
PP49	562296	4231477	178	2364	2	42	57	Κοινός
PP50	562019	4231438	171	2131	3	47	43	Κοινός
PP51	562016	4231527	295	6239	5	49	81	Κοινός
PP52	561933	4231650	202	3087	2	46	62	Κοινός
PP53	562386	4231619	290	5920	4	41	-	Σύνθετος
PP54	562296	4231586	100	730	3	41	35	Κοινός
PP55	562157	4231210	131	1265	2	44	47	Κοινός

Κωδικός	X (UTM)	Y (UTM)	Περίμετρος (m)	Εμβαδόν (m ²)	Σχ.Βάθος (m)	Βάθος (m)	Διάμετρος (m)	Μορφολογικός Χαρακτηρισμός
PP56	562669	4230967	154	1798	4	28	48	Κοινός
PP57	562698	4230917	195	2864	8	29	60	Κοινός
PP58	562699	4230822	198	2960	8	27	60	Κοινός
PP59	562617	4230656	195	2407	8	28	70	Κοινός
PP60	562484	4230749	132	1515	4	31	36	Κοινός
PP61	562200	4230751	246	4463	7	43	75	Κοινός
PP62	562241	4230716	104	723	6	41	31	Κοινός
PP63	562454	4230839	269	5269	11	42	-	Σύνθετος
PP64	562325	4230730	176	2127	8	41	-	Σύνθετος
PP65	562323	4230769	60	255	1	33	12	Αρχικός
PP66	562621	4231576	67	327	1	33	18	Αρχικός
PP67	562191	4230531	205	2901	6	39	60	Κοινός
PP68	562431	4230456	281	5486	12	35	-	Σύνθετος
PP69	562362	4230477	161	1907	8	34	48	Κοινός
PP70	562393	4230599	133	1060	1	29	-	Αρχικός
PP71	562218	4230277	247	4654	7	37	-	Σύνθετος
PP72	562321	4230373	290	5598	12	40	-	Σύνθετος
PP73	562549	4230439	134	1339	3	21	47	Αρχικός
PP74	562484	4230141	189	2500	5	22	62	Κοινός
PP75	562339	4230175	190	2365	13	37	-	Σύνθετος
PP76	561650	4230192	285	1407	5	44	45	Κοινός
PP77	562195	4229956	295	6249	7	32	45	Κοινός
PP78	562266	4229902	202	2863	4	26	65	Κοινός
PP79	562389	4230020	226	3174	4	24	70	Κοινός
PP80	561981	4230563	117	1000	1	37	12	Αρχικός
PP81	562093	4230690	192	2710	1	38	15	Αρχικός
PP82	562018	4230461	262	5156	5	40	65	Αρχικός
PP83	562502	4230258	265	5297	5	25	64	Κοινός
PP84	562633	4231239	40	115	1	31	8	Αρχικός
PP85	562301	4230447	195	2693	7	30	63	Κοινός
PP86	562281	4230149	417	11378	16	41	-	Σύνθετος
PP87	562408	4230196	390	6020	10	31	-	Σύνθετος
PP88	562431	4230326	334	5452	11	33	-	Σύνθετος
PP89	562350	4230441	114	997	7	35	30	Κοινός
PP90	562415	4230907	424	9421	16	46	-	Σύνθετος
PP91	562585	4231404	103	801	5	38	30	Κοινός
PP92	562359	4230846	266	5105	12	43	-	Σύνθετος

Εικόνα 5.4. Χάρτης όπου φαίνεται ο μορφολογικός διαχωρισμός των κρατήρων διαφυγής ρευστών και το σχετικό τους βάθος.

Εικόνα 5.5. Ιστόγραμμα συχνότητας βάθους κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 5.6. Ιστόγραμμα συχνότητας σχετικού βάθους κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 5.7. Ιστόγραμμα συχνότητας μεγέθους επιφάνειας (εμβαδόν) κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 5.8. Ιστόγραμμα συχνότητας περιμέτρου κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Το ιστόγραμμα συχνότητας των βαθών των κρατήρων προσεγγίζει την κανονική κατανομή ενώ τα υπόλοιπα είναι έντονα λοξομένα εξαιτίας της παρουσίας των σύνθετων κρατήρων. Ο μεγαλύτερος αριθμός των κρατήρων του πεδίου αναπτύσσεται μεταξύ των βαθών των 25 και 50 μέτρων (εικόνα 5.9). Σχεδόν εβδομήντα (70) κρατήρες παρουσιάζουν σχετικό βάθος μικρότερο των 10 μέτρων (εικόνα 5.6), ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό των κρατήρων παρουσιάζει έκταση μικρότερη των 8000 τετρ. μέτρων (εικόνα 5.7). Άνω του 50% των κρατήρων έχει περίμετρο μεταξύ των 100 και 300 μέτρων.

Η διεύθυνση του μέγιστου άξονα των ελλειψοειδών κρατήρων έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς είναι δυνατόν να δηλώνει την κατευθυντικότητα της διεργασίας που ελέγχει το σχηματισμό των κρατήρων. Η στατιστική ανάλυση των διευθύνσεων των μεγίστων αξόνων των

ελλειψοειδών κρατήρων έδειξε για τους κοινούς κρατήρες δύο κυρίαρχες διευθύνσεις ανάπτυξης κρατήρων, μία BBA-NNΔ που είναι παράλληλη με τις ισοβαθείς και μία ABA-ΔNΔ που είναι κάθετη στις ισοβαθείς (εικόνα 5.9). Οι σύνθετοι κρατήρες παρουσιάζουν μία κυρίαρχη διεύθυνση ανάπτυξης ABA-ΔNΔ και μία δεύτερη λιγότερο συχνή, διεύθυνση ANA-ΔBΔ. Αυτό δείχνει ότι η συνένωση των κοινών και μοναδιαίων κρατήρων ώστε να προκύψουν οι σύνθετοι πραγματοποιείται κυρίως κατά μήκος μιας διεύθυνσης ABA-ΔNΔ και κατά δεύτερο λόγο σε διεύθυνση ANA-ΔBΔ (εικόνα 5.10).

Η συνολική ανάλυση των διευθύνσεων των μεγίστων αξόνων των κρατήρων διαφυγής ρευστών έδειξε ότι κυριαρχούν τρεις διευθύνσεις, ΔBΔ-ANA, BBA-NNΔ και ABA-ΔNΔ (εικόνα 5.11). Οι μεγαλύτεροι σε διάμετρο κρατήρες διαφυγής ρευστών έχουν διεύθυνση μεγίστου άξονα από ΔBΔ-ANA έως BBA-NNΔ και ABA-ΔNΔ. Συνεπώς φαίνεται ότι οι κρατήρες σε αρχικά στάδια ωριμότητας έχουν διευθύνσεις παράλληλες με τις ισοβαθείς ενώ όσο ωριμάζουν (μεγαλώνουν και συνενώνονται) έχουν διευθύνσεις κάθετες στις ισοβαθείς..

Εικόνα 5.9. Ροδόγραμμα διευθύνσεων μεγίστων αξόνων κοινών κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 5.10. Ροδόγραμμα διευθύνσεων μεγίστων αξόνων σύνθετων κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 5.11. Ροδόγραμμα διευθύνσεων μεγίστων αξόνων κρατήρων διαφυγής ρευστών και η σχέση τους με τη διάμετρο του άξονα.

Σύμφωνα με τους Boer et al., 1998, το ελλειψοειδές σχήμα των κρατήρων είναι αποτέλεσμα της συνεχής διαφυγής ρευστών η οποία προκαλεί την αιώρηση των κόκκων, σε συνδυασμό με ισχυρά πυθμαία ρεύματα τα οποία μεταφέρουν τους κόκκους και δεν επιτρέπουν την καθίζηση τους στο κεντρικό τμήμα του κρατήρα. Σε αυτή τη περίπτωση οι μέγιστοι άξονες των ελλείψεων των κρατήρων αναπαριστούν τη διεύθυνση των πυθμαίων ρευμάτων. Στον Πατραϊκό κόλπο τα πυθμαία ρεύματα είναι ασθενή και έχουν διεύθυνση BBA-NNΔ (Παπαθεοδώρου και Κοντόπουλος, 1998), δηλαδή είναι περίπου παράλληλα με τις ισοβαθείς. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με τις δύο γραμμικές διευθετήσεις των κρατήρων διαφυγής ρευστών στο βόρειο τομέα του πεδίου οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το ελλειψοειδές σχήμα των κρατήρων συνδέεται μάλλον με την παρουσία πιθανών ρηγμάτων διεύθυνσης ΔΝΔ-ΑΒΑ και ΔΒΔ-ΑΝΑ (βλέπε κεφ. 5.1.2.4.) παρά με τη δράση πυθμαίων ρευμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση τα ρευστά διαφεύγουν κατά μήκος αυτών των ρηγμάτων που συνιστούν ζώνες μειωμένης συνοχής των συγχρόνων ιζημάτων του κόλπου. Η σχέση μεταξύ κρατήρων και ρηγμάτων έχει άλλωστε καταγραφεί σε πολλές περιοχές (Hovland, 1983; Acosta et al., 2001; Barrie and Hill, 2004).

Ένα μέρος του πεδίου στο βόρειο τομέα έχει σήμερα δεχθεί την επίδραση της κατασκευής του νέου λιμένα Πατρών με αποτέλεσμα 15 κρατήρες να έχουν καλυφθεί με αδρανή υλικά (εικόνες 5.12, 5.13).

Εικόνα 5.12. Μωσαϊκό ηχογραφιών μετά (2008) και πριν (1993) την κάλυψη μέρους του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών για την κατασκευή του νέου λιμένα Πατρών.

Εικόνα 5.13. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η κάλυψη ενός κρατήρα διαφυγής ρευστών (ΘΚΔΡ) για την κατασκευή του κυματοθραύστη του νέου λιμένα Πατρών.

5.1.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

5.1.2.1 Σεισμοστρωματογραφία

Η μελέτη των σεισμικών τομογραφιών έδειξε την ύπαρξη μίας ακουστικά διάφανης σεισμικής ακολουθίας με λίγες και ασθενείς εσωτερικές ανακλάσεις, η οποία υπέρκειται μίας επιφάνειας με έντονη ανακλαστικότητα που δεν επιτρέπει την περαιτέρω διείσδυση των ακουστικών κυμάτων του τομογράφου υποδομής πυθμένα 3.5kHz (εικόνα 5.14). Αυτή η επιφάνεια αποδίδεται στο όριο Πλειστοκαίνου/Ολοκαίνου (Ferentinos et al, 1985; Chronis et al, 1991; Papatheodorou et al., 1993; Hasiotis et al, 1996). Αυτή η επιφάνεια υψηλής ανακλαστικότητας μπορεί να οφείλεται στην μεγάλη αλλαγή των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των ιζημάτων ή/και στην παρουσία αέριων υδρογονανθράκων στα ιζήματα έτσι ώστε αυτός ο ορίζοντας να μπορεί να θεωρηθεί μία επιφάνεια συγκέντρωσης αερίων καθώς αυτά δεν μπορούν να μεταναστεύσουν προς τα πάνω.

Πέντε ρηχές γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν εντός της περιοχής μελέτης για την κατασκευή του νέου λιμένα Πατρών έδειξαν ότι η Ολοκαινική ακολουθία αποτελείται από πηλούς με τοπικές παρενστρώσεις από αμμώχους πηλούς, ενώ το όριο Πλειστοκαίνου/Ολοκαίνου χαρακτηρίζεται από αλλαγές στις γεωτεχνικές ιδιότητες των ιζημάτων (δείκτης υδαρότητας από >100% σε 85%, SPT από 2 σε 5). Σε μία από τις πέντε γεωτρήσεις, κάτω από την Ολοκαινική ακολουθία (πάχος 20m) εντοπίστηκε ένα στρώμα αμμοχάλικου. Αυτή η απότομη αλλαγή των γεωτεχνικών ιδιοτήτων σε συνδυασμό με την ύπαρξη ενδείξεων παρουσίας αέριας φάσης στα ρευστά των πόρων των ιζημάτων από τις σεισμικές τομογραφίες οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η παραπάνω επιφάνεια αποτελεί ένα οριζόντια συγκέντρωσης αερίων υδρογονανθράκων.

Εικόνα 5.14. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η επιφανειακή ακουστικά διάφανη ακολουθία και η επιφάνεια έντονης ανακλαστικότητας.

5.1.2.2 Ενδείξεις παρουσίας αερίων στις σεισμικές τομογραφίες

Η μελέτη των σεισμικών τομογραφιών έδειξε των ύπαρξη στην περιοχή διάφορων ‘ανώμαλων’ ακουστικών χαρακτήρων, οι οποίοι αποτελούν άμεσες και έμμεσες αποδείξεις για την παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα ιζήματα. Οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι ακουστικοί χαρακτήρες είναι οι σεισμοκονιασμένες καταγραφές (Acoustic turbid zone – ATZ), οι έντονες ανακλάσεις (enhanced reflectors – ER), οι θύλακες αερίων (gas pockets – GP), και οι αναβολώσεις του πυθμένα (seabed doming – D). (εικόνες 5.15 και 5.16).

Εικόνα 5.15. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται σεισμοκονιασμένη καταγραφή (ATZ) και έντονες ανακλάσεις (ER).

Εικόνα 5.16. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται αναθόλωση πυθμένα (D) και θύλακας αερίου (GP) κάτω από την αναθόλωση.

Η σεισμοκονιασμένη καταγραφή εμφανίζεται σε περιοχές όπου η ηχητική ενέργεια διαχέεται προς διάφορες διευθύνσεις καθώς προσπίπτει στα αέρια των πόρων των ιζημάτων (Judd and Hovland, 1992). Οι σεισμοκονιασμένες ζώνες καταγραφήκαν στην επιφάνεια Ολοκαίνου/ Πλειστοκίνου όσο και στην ανώτερη ακουστικά διάφανη σεισμική ακολουθία στοιχείο που δηλώνει την κατακόρυφη προς τα επάνω μετανάστευση των αερίων (εικόνα 5.17).

Εικόνα 5.17. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η παρουσία έντονων ανακλάσεων (ER) στην ανώτερη επιφανειακή ενότητα (AE) και σεισμοκονιασμένη καταγραφή (ATZ) που ξεκινάει από την επιφάνεια Ολοκαίνου/Πλειστοκίνου και καταλήγει στην έντονη ανάκλαση εντός της επιφανειακής ενότητας.

Οι υψηλής ανακλαστικότητας (έντονες) ανακλάσεις (ER) αποδίδονται στην ύπαρξη αέριων υδρογονανθράκων. Αυτού του τύπου οι ανακλάσεις έχουν περιορισμένη πλευρική ανάπτυξη καθώς τα αέρια έχουν εγκλωβιστεί τοπικά στους αντίστοιχους ορίζοντες αυξάνοντας μόνο τοπικά το εύρος των ανακλάσεων και αφήνοντας ανεπηρέαστο το εύρος τους στο υπόλοιπο της παρουσίας τους. Οι έντονες ανακλάσεις εμφανίζονται στην ανώτερη Ολοκαινική ακολουθία, και δηλώνουν επίσης την κατακόρυφη προς τα επάνω μετανάστευση των αερίων και την

παγίδευση τους μέσα στα Ολοκαινικά ιζήματα (εικόνα 5.17). Οι θύλακες αερίων (GP) εμφανίζονται και αυτοί στην ανώτερη ενότητα και αποτελούν θύλακες συγκέντρωσης αερίων.

Οι αναθολώσεις του πυθμένα σε συνδυασμό με την εσωτερική ιζηματογενή αναθόλωση παρατηρούνται σε πολλά τμήματα του πεδίου και η δημιουργία της αποδίδεται στη υψηλή πίεση των αερίων τα οποία πιέζουν προς τα επάνω τα υπερκείμενα ιζήματα. Αναθολώσεις πυθμένα εμφανίζονται σε πολλά μέρη παγκοσμίως ενώ σύμφωνα με τη θεωρία εξέλιξης των κρατήρων αποτελούν το αρχικό στάδιο δημιουργίας κρατήρα διαφυγής ρευστών, συνεπώς υποδηλώνουν περιοχές όπου μπορεί στο μέλλον να σχηματιστεί ένας κρατήρας.

5.1.2.3 Κρατήρες διαφυγής ρευστών στις σεισμικές τομογραφίες

Στις σεισμικές τομογραφίες του τομογράφου υποδομής πυθμένα 3.5kHz οι κρατήρες διαφυγής ρευστών παρουσιάζουν ακουστικούς χαρακτήρες οι οποίοι είναι ενδεικτικοί για το μηχανισμό σχηματισμού τους και τη δραστηριότητα τους (εικόνα 5.18). Σεισμικές τομογραφίες έδειξαν ότι οι κοινοί κρατήρες έχουν σχήμα U ή V και διακόπτουν απότομα τις ασθενείς εσωτερικές ανακλάσεις της ανώτερης σεισμολογικής ενότητας (εικόνα 5.19). Ορισμένοι από αυτούς έχουν επίπεδο πυθμένα και μοιάζουν με κόλουρο κώνο (εικόνα 5.20). Σε πολλές περιπτώσεις οι κρατήρες καταγράφηκαν με πλευρικές ανακλάσεις που αλληλοκαλύπτονται δημιουργώντας συγκλινικές δομές ή δομές ‘παπιγιόν’ (bow-tie structures) (εικόνα 5.21). Οι δομές παπιγιόν οφείλονται στα πολύ απότομα πρανή των κρατήρων. Δεδομένα από μονοδεσμικό βυθόμετρο έδειξαν ότι τα πρανή σε αυτούς τους κρατήρες παρουσιάζουν μέγιστη κλίση έως 70° (εικόνα 5.22).

Εικόνα 5.18 Τρισδιάστητη αποικόνηση σεισμικών τομογραφιών στην οποία φαίνεται τμήμα του πεδίου κρατήρων.

Εικόνα 5.19. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 5.20. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών με επίπεδο πυθμένα.

Εικόνα 5.21. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών με τοιχώματα μεγάλης κλίσης.

Ο πυθμένας των κρατήρων συνήθως φτάνει στην επιφάνεια Πλειστοκαίνου/Ολοκαίνου, των μικρότερων όμως κρατήρων βρίσκεται 5 έως 10 μέτρα πάνω από αυτή την επιφάνεια. Κανένας κρατήρας δεν διαπερνά την διεπιφάνεια Πλειστοκαίνου/Ολοκαίνου.

Πολλοί κρατήρες χαρακτηρίζονται από την παρουσία σεισμοκονιασμένης ζώνης κάτω από τον πυθμένα τους (εικόνα 5.20). Σύμφωνα με αυτό συμπεραίνεται ότι τα ιζήματα κάτω από τον πυθμένα των κρατήρων περιέχουν αέριο και ότι υπάρχει μία συνεχής τροφοδοσία αερίου από την διεπιφάνεια Πλειστοκαίνου/Ολοκαίνου προς τον πυθμένα του κρατήρα.

Εικόνα 5.22. Χάρτης ισοκλίσεων στην περιοχή του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Σε μερικούς κρατήρες παρατηρείται μία ζώνη με διάφανο ακουστικό χαρακτήρα κάτω από τον πυθμένα τους η οποία εκτείνεται ακόμη και στα τοιχώματά τους (εικόνα 4.20). Η παρουσία αυτής της ακουστικά διαφανούς ζώνης πιθανώς να δηλώνει τις πιο κάτω διεργασίες:

α) η διαφυγή των ρευστών δεν περιορίζεται μόνο από τον πυθμένα του κρατήρα αλλά πραγματοποιείται από ολόκληρη την επιφάνεια του κρατήρα των τοιχωμάτων

συμπεριλαμβανομένων, β) η διαφυγή των ρευστών είναι τόσο ισχυρή ώστε αναμοχλεύει και καταστρέφει τη δομή των ιζημάτων και γ) τα ιζήματα που βρίσκονται κάτω από τον κρατήρα και αποτελούν τη δίοδο διαφυγής είναι σήμερα ελεύθερα αερίου καθώς το αέριο έχει πλέον διαφύγει από αυτά.

Τα πρηνή ορισμένων σύνθετων αλλά και κοινών κρατήρων φαίνεται να καταρρέουν όπως δηλώνει η παρουσία βαρυτικών μετακινήσεων μαζών (εικόνα 5.23). Περιστροφικές ολισθήσεις επηρεάζουν τα πρηνή των κρατήρων και αποκολλημένα τεμάχια ιζημάτων φαίνεται να καλύπτουν τον πυθμένα ορισμένων κρατήρων. Η παρουσία ιζημάτων που καλύπτουν των πυθμένα μπορεί προσωρινά να προκαλεί φράξιμο των διόδων διαφυγής των ρευστών. Σύμφωνα με του Hasiotis et al., 1996 οι βαρυτικές μετακινήσεις μαζών εντός των ορίων των κρατήρων μπορεί να οδηγούν είτε στην δημιουργία καινούργιων διόδων διαφυγής ρευστών, είτε σε πιο παροξυσμικές διαφυγές.

Εικόνα 5.23. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών με τα πρηνές του να έχει καταρρεύσει (BM: Βαρυτική Μετακίνηση).

Η συστηματική μελέτη του πεδίου ρευστών με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης έδειξε την μεταβολή της ανακλαστικότητας του πυθμένα ενός τουλάχιστον κρατήρα σε διάστημα μόλις ενός έτους. Συγκεκριμένα, η αποτύπωση του κρατήρα PP4 σε περίοδο αυξημένης δραστηριότητας (λόγω του σεισμού 6.4R της 8ης/6/2008) και σε περίοδο ηρεμίας μετά από ένα έτος έδειξε ότι η ανακλαστικότητα του πυθμένα του κρατήρα έχει σημαντικά μεταβληθεί ενώ επιπλέον πιθανολογούνται μικρές μεταβολές στην μορφολογία του (εικόνα 5.24). Το στοιχείο αυτό βεβαιώνει την ενεργότητα του πεδίου ρευστών του Πατραϊκού κόλπου. Παρόμοιες μεταβολές της μορφολογίας κρατήρων έχουν διαπιστωθεί στον όρμο Belfast στον κόλπο του Maine στην ανατολική ακτή των ΗΠΑ (Gontz et al., 2001).

Εικόνα 5.24. Ηχογραφίες που συλλέχθηκαν με διαφορά ενός έτους με ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά συλλογής (πορεία σκάφους, ταχύτητα, ύψος πτήσης, ενίσχυση σήματος), στην οποία φαίνεται η μεταβολή της ανακλαστικότητας του πυθμένα του σύνθετου κρατήρα PP4.

5.1.2.4 Ρήγματα

Η ανάλυση των σεισμικών τομογραφιών 3.5 kHz έδειξε την παρουσία ενεργών ρηγμάτων στην περιοχή του πεδίου κρατήρων. Σημειώνεται ότι ο εντοπισμός ρηγμάτων με τομογράφους 3.5 kHz δεν είναι η απολύτως ενδεδειγμένη μέθοδος καθώς απαιτείται η καταγραφή των γεωλογικών σχηματισμών βαθύτερα της διεισδυτικότητας του τομογράφου. Η αναγνώριση όμως συγκεκριμένων κριτηρίων στις τομογραφίες 3.5kHz ενδεικτικών της παρουσίας ρηγμάτων επιτρέπει τον εντοπισμό τους με αυξημένο βαθμό αξιοπιστίας.

Στο βόρειο τομέα του πεδίου, εντοπίζεται μια ομάδα κρατήρων διατεταγμένων γραμμικά η οποία βρίσκεται κατά μήκος της οροφής ενός πρσανούς με βυθομετρική διαφορά 4 έως 10 μέτρα. Αυτή η «αλυσίδα» κρατήρων έχει διεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ, μήκος περίπου 1 χιλιόμετρο και αποτελείται από 7 κρατήρες (εικόνα 5.25.). Το δυτικό τμήμα της αλυσίδας αποτελείται από αρχικούς κρατήρες (μικρούς και ρηχούς) ενώ το ανατολικό τμήμα της (κοντά στην ακτή) αποτελείται από κοινούς κρατήρες με διάμετρο από 50 έως 100 μέτρα και σχετικό βάθος περίπου 10 μέτρα και ένα σύνθετο ελλειπτικού σχήματος κρατήρα με το μέγιστο άξονα του να έχει την ίδια διεύθυνση με αυτή της αλυσίδας. Αυτή η αλυσίδα των κρατήρων αποτελεί συγχρόνως το βόρειο όριο του πεδίου του Πατραϊκού κόλπου καθώς δεν εντοπίστηκε κανένα ίχνος κρατήρα βορειότερα αυτής.

Σεισμικές τομογραφίες από τομογράφο υποδομής πυθμένα 3.5kHz κάθετες σε αυτό το πρανές κατέγραψαν το ίχνος ενός κανονικού ρήγματος διεύθυνσης ΔΝΔ-ΑΒΑ, με βύθιση προς

το νότο, το οποίο προκαλεί βαθυμετρική διαφορά έως 5 μέτρα (εικόνα 5.26). Το άλμα του κανονικού αυτού ρήγματος που μετρήθηκε από τη μετατόπιση που προκαλεί στην επιφάνεια Ολοκαίνου/Πλειστοκαίνου είναι περίπου 15 μέτρα. Η πάχυνση των στρωμάτων στην οροφή του ρήγματος σε συνδυασμό με την προοδευτική μείωση της κατακόρυφης μετατόπισης του ρήγματος προς την επιφάνεια, συνηγορούν υπέρ της συνιζηματογενούς δράσης του ρήγματος. (εικόνα 5.26). Η οροφή του ρήγματος χαρακτηρίζεται από την παρουσία κρατήρων διαφυγής ρευστών ενώ αντίθετα στον πόδα του ρήγματος δεν καταγράφηκαν κρατήρες (εικόνα 5.26). Το ΔΝΔ-ΑΒΑ διεύθυνσης κανονικό ρήγμα είναι η υποθαλάσσια συνέχεια του ρήγματος της Αγίας Τριάδας που διατρέχει το νότιο τμήμα της πόλης της Πάτρας (Κατριβέσης, 2005) (εικόνα 5.27).

Εικόνα 5.25. Μωσαϊκό ηχογραφιών στο οποίο έχουν τοποθετηθεί οι ρηξιγενείς δομές που εντοπιστήκαν στην περιοχή του πεδίου (P. AT: ρήγμα Αγίας Τριάδας).

Εικόνα 5.26. Σεισμικές τομογραφίες 3.5kHz στις οποίες φαίνεται το ρήγμα της Αγ. Τριάδας και ο σχηματισμός κρατήρων διαφυγής ρευστών στην οροφή του ρήγματος (P.AT.: ρήγμα Αγ. Τριάδας).

Εικόνα 5.27. Τεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του πεδίου κρατήρων (P.AT.: ρήγμα Αγ. Τριάδας, RPTF: ρήγμα μετασχηματισμού Ρίο-Πάτρας).

Ένα χιλιόμετρο νοτιότερα του ρήγματος της Αγία Τριάδας και του βόρειου ορίου του πεδίου, 6 κρατήρες βρίσκονται σε γραμμική διεύθυνση σχηματίζοντας μία αλυσίδα σε διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ, σχεδόν παράλληλη με την προηγούμενη (εικόνα 5.25). Σεισμικές τομογραφίες τομογράφου υποδομής πυθμένα 3.5kHz κάθετες στη διεύθυνση της αλυσίδας κρατήρων έδειξαν ότι αυτή βρίσκεται στο ίχνος ενός κανονικού ρήγματος που κλείνει προς το βορρά (εικόνα 5.28). Το άλμα του κανονικού αυτού ρήγματος μειώνεται από τη δύση προς την ανατολή και δεν επηρεάζει τα ιζήματα κοντά στην ακτή. Το άλμα που μετρήθηκε από τη μετατόπιση που προκαλεί στην επιφάνεια Ολοκαίνου/Πλειστοκαίνου δυτικότερα του πεδίου είναι περίπου 12 μέτρα. Το ρήγμα αυτό χαρακτηρίζεται ως αντιθετικό του ρήγματος της Αγίας Τριάδας, ενώ δεν φαίνεται να συνεχίζεται προς τη χέρσο.

Εικόνα 5.28. Σεισμικές τομογραφίες 3.5kHz στις οποίες φαίνεται το αντιθετικό ρήγμα και ο σχηματισμός κρατήρων διαφυγής ρευστών (P: ρήγμα).

Σεισμικές τομογραφίες 3.5kHz στο νότιο τομέα του πεδίου κάθετες στην ακτή έδειξαν την ύπαρξη μικρών κανονικών ρηγματών παράλληλων προς την ακτή και τις ισοβαθείς διεύθυνσης BBA-NNΔ (εικόνα 4.26). Το άλμα αυτών των ρηγματών είναι μικρό, ενώ στην επιφανειακή τους έκφραση σχηματίζονται κρατήρες διαφυγής ρευστών (εικόνες 5.29, 5.30). Η θέση των παράλληλων ρηγματών προς την ακτή συμπίπτει με την πιθανή υποθαλάσσια συνέχεια του ρήγματος μετατόπισης Ρίου – Πάτρας (εικόνα 5.27) (Flotte et al., 2005). Τα κανονικά ρήγματα είναι πιθανόν να σχηματίζονται στην ρηματογενή ζώνη του ρήγματος μετατόπισης, σε επιφάνειες ασυνέχειας.

Εικόνα 5.29. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz κάθετη στην ακτή, στην οποία φαίνεται κανονικό ρήγμα και ο σχηματισμός κρατήρων διαφυγής ρευστών στο ίχνος του ρήγματος (P: ρήγμα).

Εικόνα 5.30. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz κάθετη στην ακτή, στην οποία φαίνεται κανονικό ρήγμα και ο σχηματισμός κρατήρων διαφυγής ρευστών στο ίχνος του ρήγματος (P: ρήγμα).

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω πολλοί κρατήρες διαφυγής ρευστών στο πεδίο του Πατραϊκού κόλπου σχηματίζονται κατά μήκος του ίχνους ρηξιγενών δομών, σχηματίζοντας ομάδες γραμμικής διευθέτησης («αλυσίδες» κρατήρων). Είναι γνωστό (Judd and Hovland, 2007) ότι τα ρευστά χρησιμοποιούν τις επιφάνειες ρηγματών ως διόδους για να ανέλθουν προς την επιφάνεια του πυθμένα. Τα ρήγματα στην περιοχή του πεδίου τέμνουν την επιφάνεια Ολοκαίνου/Πλειστοκαίνου, η οποία αποτελεί ένα οριζόντια συγκέντρωσης ρευστών. Τα ρευστά χρησιμοποιούν την επιφάνεια του ρήγματος ως μονοπάτι ανόδου, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται κρατήρες διαφυγής ρευστών στο ίχνος των ρηγματών.

Επιπλέον συνιζηματογενή ρήγματα καταγράφηκαν δυτικότερα του πεδίου (εικόνα 5.27). Τα ρήγματα αυτά επηρεάζουν την Τεταρτογενή ακολουθία δημιουργώντας περιστραμμένα τεμάχια (rotated blocks) (εικόνα 5.31). Σε κάθε περιστραμμένο τέμαχος, τα αέρια φαίνεται να μεταναστεύουν κατά μήκος της επιφάνειας Ολοκαίνου/Πλειστοκαίνου, σε μια προσπάθεια να προσεγγίσουν το τοπογραφικό υψηλό κάθε τεμάχους. Επίσης θύλακες αερίων σχηματίζονται καθώς τα Πλειστοκαινικά πορώδη ιζήματα μέσω των οποίων μεταναστεύει, έρχονται σε επαφή με τα λιγότερο πορώδη Ολοκαινικά ιζήματα λόγω της μετατόπισης του ρήγματος.

Εικόνα 5.31. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνονται τα περιστραμμένα τεμάχια (P: ρήγμα).

5.2 Η δραστηριότητα του πεδίου

Η δραστηριότητα στο χώρο και στο χρόνο ενός ενεργού πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών είναι ένα επιστημονικό ερώτημα που “εν πολλοίς” παραμένει αναπάντητο (Hovland et al., 2002). Για ένα διάστημα μιας δεκαπενταετίας, το πεδίο κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου μελετήθηκε με διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις (επιτόπιες μετρήσεις και μακροχρόνια παρακολούθηση) και διαφορετικές μεθόδους (γεωφυσικές και γεωχημικές) με στόχο την αξιόπιστη καταγραφή της δραστηριότητάς του. Στα πλαίσια αυτού του υποκεφαλαίου παρουσιάζονται οι ερευνητικές περίοδοι σύμφωνα με τη χρονολογική σειρά τους:

- (α) **Ερευνητική περίοδος 1993:** Ενεργοποίηση λόγω του σεισμού 5.4R της 14/7/1993,
- (β) **Ερευνητική περίοδος 2002-2003:** Επιτόπιες μετρήσεις διαλυμένου CH₄,
- (γ) **Ερευνητική περίοδος 2004:** Υποθαλάσσιο Παρατηρητήριο μακράς διάρκειας,
- (δ) **Ερευνητική περίοδος 2008-2009:** Ηχοβολιστική παρακολούθηση λόγω της ενεργοποίησης από το σεισμό 6.4R της 8ης/6/2008.

5.2.1 Ερευνητική περίοδος 1993: ενεργοποίηση λόγω του σεισμού 5.4R της 14/7/1993

Την 14^η Ιουλίου 1993 και ώρα 15.32, καταγράφηκε ένας ισχυρός σεισμός με μέγεθος 5.4R, με επίκεντρο 10 χιλιόμετρα νότια της Πάτρας και με εστιακό βάθος 4.5 χιλιόμετρα (Tselentis et al., 1994). Ο σεισμός αυτός, οποίος ήταν από τους μεγαλύτερους που έχουν συμβεί τον 20^ο αιώνα στην περιοχή, φαίνεται ότι ενεργοποίησε τους κρατήρες (Hasiotis et al., 1996). Τα επίκεντρα των σεισμών της μετασεισμικής ακολουθίας παρουσιάζουν μία επέκταση προς τα βορειοδυτικά που δείχνουν ότι μετά τον κύριο σεισμό ενεργοποιήθηκαν μικρότερα ρήγματα στην περιοχή του Πατραϊκού κόλπου (Tselentis et al., 1998) και ίσως αυτά που επηρεάζουν το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών. Επίσης επιφανειακές σεισμικές διαρρήξεις εντοπίστηκαν κατά μήκος του ρήγματος της Αγίας Τριάδας, ενώ και οι σημαντικότερες βλάβες στις κατασκευές περιορίστηκαν σε μία στενή ζώνη εκατέρωθεν του ρήγματος (Κατριβέσης, 2003).

Ένας σταθμός καταγραφής θερμοκρασίας/αλατότητας, ο οποίος είχε τοποθετηθεί στην περιοχή του πεδίου, σε βάθος 35 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας και περίπου 10 μέτρα πάνω από τον πυθμένα (εικόνα 5.32α), έδειξε ότι η θερμοκρασία αυξήθηκε απότομα τρεις φορές πριν το σεισμό (εικόνα 5.32β).

- Το πρώτο γεγονός αύξησης της θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκε 20 ώρες πριν το σεισμό, είχε χρονική διάρκεια 1 ώρα και 20 λεπτά και η θερμοκρασία αυξήθηκε από 16.8°C σε 19.3°C.

- Το δεύτερο γεγονός έλαβε χώρα περίπου 8 ώρες πριν από το σεισμό, είχε χρονική διάρκεια 5 ώρες και 25 λεπτά και η θερμοκρασία αυξήθηκε από 16.8°C σε 23°C.
- Το τρίτο γεγονός ξεκίνησε 5 ώρες πριν από το σεισμό, η θερμοκρασία αυξήθηκε από 17°C σε 22°C και ο σεισμός και η θερμοκρασία επανήλθε σε φυσιολογικές τιμές ακριβώς πριν από το σεισμικό γεγονός.

Την περίοδο καταγραφής της θερμοκρασίας πριν από το σεισμό οι καιρικές συνθήκες ήταν καλές, δεν πραγματοποιήθηκε κάποια καταιγίδα και οι άνεμοι που έπνεαν στην περιοχή δεν ξεπερνούσαν τα 4 Μποφόρ.

Εικόνα 5.32. α) Η θέση του σταθμού μετρήσεων και β) χρονοσειρά της θερμοκρασίας για το διάστημα 13 – 17 Ιουλίου 1993, στο οποίο σημειώνεται η χρονική στιγμή του σεισμού.

Στις ηχογραφίες που συλλέχθηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης 10 ημέρες μετά το κύριο σεισμό καταγράφηκαν υψηλής ανακλαστικότητας ανακλάσεις (με μορφή νέφους) ακριβώς επάνω από ορισμένους κρατήρες (εικόνα 5.33α). Αυτά τα νέφη υψηλής ανακλαστικότητας αποδόθηκαν σε φυσαλίδες αερίων στην υδάτινη στήλη ή/και σε αιωρούμενο ίζημα το οποίο τέθηκε σε επαναιώρηση εξαιτίας της διαφυγής των φυσαλίδων (Hasiotis et al., 1996). Τα πιο πυκνά νέφη ανακλάσεων εντοπίστηκαν στο βόρειο τομέα του πεδίου και κυρίως κατά μήκος της βόρειας αλυσίδας κρατήρων διαφυγής ρευστών που σχετίζονται με το ρήγμα της Αγίας Τριάδας. Επίσης σε σεισμικές τομογραφίες 3.5kHz που συλλέχθηκαν ταυτόχρονα εντοπίστηκαν ανακλάσεις στην υδάτινη στήλη πάνω από τους ίδιους κρατήρες διαφυγής ρευστών με μορφή ανεστραμμένου V (εικόνα 5.34). Οι ανακλάσεις αυτής της μορφής στην υδάτινη στήλη αποδίδονται σε διαφυγές ρευστών (Judd and Hovland, 2007).

Θαλάσσια γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του πεδίου 40 ημέρες μετά από τον κύριο σεισμό έδειξε ότι η δραστηριότητα των κρατήρων διαφυγής ρευστών είχε σταματήσει καθώς δεν εμφανίστηκαν υψηλής ανακλαστικότητας νέφη πάνω από τους κρατήρες

στις ηχογραφίες (εικόνα 5.33β), καθώς επίσης και ανακλάσεις μορφής ανεστραμμένου V στην υδάτινη στήλη στις σεισμικές τομογραφίες 3.5kHz.

Εικόνα 5.33. Μωσαϊκά ηχογραφιών με δεδομένα που συλλέχθηκαν (α) λίγες ημέρες μετά από το σεισμό 5.4R της 14ης Ιουλίου 1993 και (β) ένα μήνα αργότερα. Με λευκά βέλη σημειώνονται οι θέσεις διαφυγών που εντοπίστηκαν κατά την πρώτη έρευνα. Στις ίδιες θέσεις δεν φαίνονται διαφυγές κατά τη δεύτερη έρευνα.

Εικόνα 5.34. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται διαφυγή ρευστού πάνω από ένα κρατήρα που βρίσκεται στην επιφανειακή έκφραση του ρήγματος της Αγίας Τριάδας.

5.2.2 Ερευνητική περίοδος 2002-2003: Επιτόπιες μετρήσεις διαλυμένου CH₄

Από το Μάρτιο 2002 έως τον Οκτώβριο 2003 πραγματοποιήθηκαν σε εννέα περιόδους μετρήσεις διαλυμένου μεθανίου και φυσικοχημικών παραμέτρων (θερμοκρασία, αλατότητα, διαλυμένο οξυγόνο, pH) στο θαλασσινό νερό σε δεκαπέντε κρατήρες διαφυγής ρευστών και σε μία απομακρυσμένη θέση από το πεδίο για μετρήσεις αναφοράς (εικόνες 4.17, ΠΙ.8) (Christodoulou et al., 2003). Οι μετρήσεις του διαλυμένου μεθανίου στην υδάτινη στήλη έγιναν με τον πρωτότυπο αισθητήρα METS (Garcia and Masson, 2004). Οι θέσεις επιλέχθηκαν σύμφωνα με το μέγεθος του κρατήρα διαφυγής ρευστών και τη θέση του. Στις τρεις πρώτες περιόδους πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε όλες τις θέσεις, ενώ στις επόμενες οι μετρήσεις επικεντρώθηκαν σε αυτές τις θέσεις που είχαν παρατηρηθεί οι μεγαλύτερες μεταβολές της συγκέντρωσης του διαλυμένου μεθανίου. Στον πίνακα 5.2 δίνονται συνοπτικά οι μετρήσεις διαλυμένου μεθανίου, θερμοκρασίας και αλατότητας στο επιφανειακό και στο πυθμαίο στρώμα του θαλασσινού νερού σε όλες τις περιόδους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι απολυτές τιμές διαλυμένου μεθανίου αντιμετωπίστηκαν με σκεπτικισμό καθώς η αξιοπιστία του αισθητήρα μεθανίου είναι ακόμη υπό κρίση καθώς είναι ένα πρωτότυπο σύστημα μέτρησης του μεθανίου. Για αυτό το λόγο η ανάλυση των δεδομένων δεν βασίστηκε στις απόλυτες τιμές των συγκεντρώσεων αλλά στις μεταβολές τους τόσο κατά την ίδια περίοδο μετρήσεων (CH₄/MCH₄) όσο και μεταξύ πυθμαίου και επιφανειακού στρώματος (CH₄_{πυθμένας}/CH₄_{επιφάνεια}).

Πίνακας 5.2. Μετρήσεις Μεθανίου, Θερμοκρασίας και Αλατότητας στον Πατραϊκό κόλπο.

Θέση	Ημερομηνία	Βάθος μέτρησης	CH ₄ (μmol/l)	Θερμοκρασία (°C)	Αλατότητα (ppt)
PM1	22-Mar-02	2	0.192	16.14	38.56
		32	0.737	14.91	38.65
PM2	22-Mar-02	5	0.118	15.39	38.83
		31	0.384	14.79	38.68
PM3	22-Mar-02	2	0.083	16.11	38.51
		45	1.117	14.4	38.72
PM4	22-Mar-02	2	0.072	16.5	38.46
		34	0.650	14.59	38.67
REF	24-Mar-02	2	0.002	15.65	38.59
		45	0.002	14.73	38.75

Θέση	Ημερομηνία	Βάθος μέτρησης	CH4 (μmol/l)	Θερμοκρασία (°C)	Αλατότητα (ppt)
PM5	24-Mar-02	2	0.002	15.48	38.74
		27	0.111	15.39	38.62
PM1	24-Mar-02	2	0.007	15.51	38.64
		36	0.085	15.46	38.61
PM6	24-Mar-02	2	0.004	15.58	38.64
		15	0.041	15.53	38.62
PM4	24-Mar-02	3	0.004	15.6	38.68
		33	0.954	15.22	38.62
PM8	25-Mar-02	2	0.003	15.25	38.64
		28	0.011	14.5	38.7
PM7	25-Mar-02	2	0.001	15.36	38.65
		42	0.020	14.47	38.72
PM2	25-Mar-02	2	0.009	15.46	38.69
		38	0.443	14.5	38.7
PM4	25-Mar-02	2	0.040	15.44	38.71
		35	0.085	14.71	38.69
PM3	25-Mar-02	2	0.003	15.4	38.65
		47	1.586	14.48	38.72
PM1	25-Mar-02	2	0.002	15.46	38.63
		31	0.165	14.54	38.72
PM3	19-May-02	5	0.002	21.2	38.55
		48	0.096	15.1	38.69
PM4	19-May-02	5	0.004	21.36	38.56
		35	0.099	15.8	38.65
PM2	19-May-02	5	0.006	21.48	38.55
		37	0.066	15.65	38.63
PM1	19-May-02	0	0.010	21.46	38.54
		28	0.036	15.98	38.58
PM6	19-May-02	5	0.022	21.55	38.59
		20	0.062	16.45	38.3
PM4	4-Sep-02	5	0.029	23.36	38.44
		33	0.507	17.9	38.38
PM3	4-Sep-02	5	0.058	23.58	38.36
		46	0.151	19.57	38.47
PM2	4-Sep-02	5	0.038	24.1	38.39
		37	0.056	21.57	38.31
PM1	4-Sep-02	5	0.034	24.27	38.36
		36	0.042	23.35	38.52
PM7	4-Sep-02	5	0.031	24.38	38.5
		38	0.048	22.8	38.51
PM4	4-Sep-02	5	0.026	24.12	38.49
		39	0.453	17.86	38.42
PM9	5-Sep-02	5	0.090	24.32	38.44
		26	0.094	23.14	38.53
PM10	5-Sep-02	5	0.093	23.26	38.53
		26	0.077	23.09	38.54
PM12	5-Sep-02	5	0.053	24.44	38.45
		36	0.067	22.67	38.54
PM13	5-Sep-02	5	0.047	24.59	38.4
		34	0.067	22.9	38.55
PM14	5-Sep-02	5	0.031	24.94	38.21
		35	0.084	23.31	38.54
PM15	5-Sep-02	5	0.041	24.88	38.22
		13	0.042	24.15	38.33
PM4	5-Sep-02	5	0.028	25.15	38.51
		34	0.787	18.85	38.64
PM4	2-Oct-02	5	0.099	23.81	38.59
		35	0.319	20.32	38.64
PM4	24-Nov-02	5	0.107	19.29	38.25
		35	0.109	19	38.29
PM1	25-Nov-02	5	0.281	18.82	38.16
		33	0.271	18.6	38.32
PM2	25-Nov-02	5	0.277	19.01	38.18
		38	0.266	18.71	38.36
PM16	25-Nov-02	5	0.230	18.94	38.28
		42	1.014	19.04	38.27
REF	21-Mar-03	5	0.574	13.86	37.62
		40	0.608	12.55	38.43
PM4	21-Mar-03	5	0.633	13.98	37.71
		32	0.694	12.76	38.37
PM4	7-Jun-03	5	0.514	23.19	38.66

Θέση	Ημερομηνία	Βάθος μέτρησης	CH ₄ (μmol/l)	Θερμοκρασία (°C)	Αλατότητα (ppt)
		35	0.609	16.55	38.59
PM16	8-Jun-03	5	0.189	23.11	38.68
		40	0.357	14.89	38.65
PM4	8-Jun-03	5	0.276	23.46	38.65
		34	0.344	16.25	38.57
PM4	8-Jun-03	5	0.223	24.55	38.7
		38	0.285	16.24	38.59
PM4	9-Jun-03	5	0.185	23.82	38.65
		39	0.294	16.05	38.6
PM3	9-Jun-03	5	0.245	23.58	38.61
		40	0.276	14.82	38.65
PM4	31-Jul-03	5	0.429	26.57	38.54
		37	1.476	18.61	38.57
REF	31-Jul-03	5	0.198	26.71	38.73
		40	0.533	18.63	38.69
PM3	31-Jul-03	5	0.278	26.87	38.79
		44	0.559	16.71	38.55
PM16	31-Jul-03	5	0.283	26.93	38.69
		41	0.596	17.82	38.52
PM4	1-Aug-03	5	0.184	26.58	38.54
		40	1.239	18.61	38.57
PM3	1-Aug-03	5	0.138	26.87	38.79
		46	0.473	16.81	38.55
PM4	4-Oct-03	5	0.279	24.9	38.51
		39	0.555	23.01	38.42
PM3	4-Oct-03	5	0.328	24.89	38.49
		40	0.350	22.35	38.43
PM4	5-Oct-03	5	0.135	24.83	38.51
		36	0.265	23.04	38.41
PM3	5-Oct-03	5	0.168	25.32	38.49
		40	0.167	22.51	38.42

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις διαλυμένου μεθανίου παρατηρήθηκαν κυρίως στη θέση PM4 που αντιστοιχεί στον σύνθετο κρατήρα PP4 (Πίνακας 5.1) και κατά δεύτερο λόγο στις θέσεις PM3, που αντιστοιχεί στον σύνθετο κρατήρα, PP3 (Πίνακας 5.1) και PM16, που αντιστοιχεί στον κρατήρα PP16. Οι τρεις αυτοί κρατήρες βρίσκονται στο νοτιότερο τμήμα του νότιου τομέα του πεδίου. Οι πιο μεγάλες συγκεντρώσεις διαλυμένου μεθανίου βρέθηκαν τον Μάρτιο 2002, το Σεπτέμβριο και Οκτώβριο 2002, Μάρτιο, Ιούλιο και Οκτώβριο 2003 για τη θέση PM4, Μάρτιο 2002 και Ιούλιο 2003 για τη θέση PM3 και Νοέμβριο 2002, Ιούνιο και Ιούλιο 2003 για τη θέση PM16. Η μεγαλύτερη δραστηριότητα των κρατήρων διαφυγής ρευστών που βρίσκονται στο νότιο τμήμα του πεδίου, και ιδιαιτέρως του κρατήρα PP4, διαπιστώνεται επίσης από τους λόγους συγκέντρωσης μεθανίου σε κάθε θέση προς τη μέση συγκέντρωση κάθε περιόδου μετρήσεων (πίνακας 5.3) (εικόνες 5.35 και 5.36).

Πίνακας 5.3. Λόγοι συγκεντρώσεων διαλυμένου μεθανίου μεταξύ μέτρησης και μέσης τιμής κάθε περιόδου μετρήσεων.

Θέση	Ημερομηνία	CH ₄ /MCH ₄ (πυθμαίο)	CH ₄ /MCH ₄ (επιφάνεια)	Θέση	Ημερομηνία	CH ₄ /MCH ₄ (πυθμαίο)	CH ₄ /MCH ₄ (επιφάνεια)
PM1	3/22/2002	1.73	5.31	PM12	9/5/2002	0.35	1.15
PM2	3/22/2002	0.90	3.27	PM13	9/5/2002	0.35	1.02
PM3	3/22/2002	2.62	2.30	PM14	9/5/2002	0.44	0.67
PM4	3/22/2002	1.53	1.99	PM15	9/5/2002	0.22	0.89
REF	3/24/2002	0.00	0.06	PM4	9/5/2002	4.13	0.61
PM5	3/24/2002	0.26	0.06	PM4	10/2/2002	1.00	0.00

Θέση	Ημερομηνία	CH ₄ /MCH ₄ (πυθμαίο)	CH ₄ /MCH ₄ (επιφάνεια)	Θέση	Ημερομηνία	CH ₄ /MCH ₄ (πυθμαίο)	CH ₄ /MCH ₄ (επιφάνεια)
PM1	3/24/2002	0.20	0.19	PM4	11/24/2002	0.26	0.48
PM6	3/24/2002	0.10	0.11	PM1	11/25/2002	0.65	1.26
PM4	3/24/2002	2.24	0.11	PM2	11/25/2002	0.64	1.24
PM8	3/25/2002	0.02	0.08	PM16	11/25/2002	2.44	1.03
PM7	3/25/2002	0.05	0.03	REF	3/21/2003	0.93	0.95
PM2	3/25/2002	1.04	0.25	PM4	3/21/2003	1.07	1.05
PM4	3/25/2002	0.20	1.11	PM4	6/7/2003	1.69	1.89
PM3	3/25/2002	3.72	0.08	PM16	6/8/2003	0.99	0.69
PM1	3/25/2002	0.39	0.06	PM4	6/8/2003	0.95	1.01
PM3	5/19/2002	1.34	0.23	PM4	6/8/2003	0.79	0.82
PM4	5/19/2002	1.38	0.45	PM4	6/9/2003	0.81	0.68
PM2	5/19/2002	0.92	0.68	PM3	6/9/2003	0.76	0.90
PM1	5/19/2002	0.50	1.14	PM4	7/31/2003	1.81	1.70
PM6	5/19/2002	0.86	2.50	REF	7/31/2003	0.66	0.79
PM4	9/4/2002	2.66	0.63	PM3	7/31/2003	0.69	1.10
PM3	9/4/2002	0.79	1.26	PM16	7/31/2003	0.73	1.12
PM2	9/4/2002	0.29	0.82	PM4	8/1/2003	1.53	0.73
PM1	9/4/2002	0.22	0.74	PM3	8/1/2003	0.58	0.55
PM7	9/4/2002	0.25	0.67	PM4	10/4/2003	1.66	1.23
PM4	9/4/2002	2.38	0.56	PM3	10/4/2003	1.05	1.44
PM9	9/5/2002	0.49	1.95	PM4	10/5/2003	0.79	0.59
PM10	9/5/2002	0.40	2.02	PM3	10/5/2003	0.50	0.74

Εικόνα 5.35. Τρισδιάστατο διάγραμμα όπου έχουν τοποθετηθεί οι λόγοι συγκέντρωσης διαλυμένου μεθανίου για κάθε θέση μετρήσεων προς τη μέση συγκέντρωση (CH₄/MCH₄) κατά την περίοδο δειγματοληψίας για το επιφανειακό στρώμα νερού (άξονας Z), ανά θέση δειγματοληψίας (άξονας X)

και ανά περίοδο δειγματοληψίας (άξονας Υ). Η γαλάζια γραμμοσκιασμένη επιφάνεια δηλώνει λόγο CH_4/MCH_4 ίσο με τη μονάδα.

Εικόνα 5.36. Τρισδιάστατο διάγραμμα όπου έχουν τοποθετηθεί οι λόγοι συγκέντρωσης διαλυμένου μεθανίου για κάθε θέση μετρήσεων προς τη μέση συγκέντρωση (CH_4/MCH_4) κατά την περίοδο δειγματοληψίας για το πυθμαίο στρώμα νερού (άξονας Ζ), ανά θέση δειγματοληψίας (άξονας Χ) και ανά περίοδο δειγματοληψίας (άξονας Υ). Η γαλάζια γραμμοσκιασμένη επιφάνεια δηλώνει λόγο CH_4/MCH_4 ίσο με τη μονάδα.

Η υψηλότερη συγκέντρωση διαλυμένου μεθανίου για όλη την περίοδο των μετρήσεων καταγράφηκε την 31^η Ιουλίου 2003 κοντά στον πυθμένα του κρατήρα PP4, ήταν $1.476 \mu\text{mol/l}$, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση στην επιφάνεια της θάλασσας ήταν $0.429 \mu\text{mol/l}$. Μία μόλις ημέρα πριν, την 30^η Ιουλίου 2003, καταγράφηκε ένας ισχυρός σεισμός με μέγεθος 4.7 της κλίμακας Richter και με επίκεντρο 60km ανατολικά του πεδίου, στον Κορινθιακό κόλπο. Πιθανώς οι υψηλότερες καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις μεθανίου να σχετίζονται με αυτή τη σεισμική δραστηριότητα.

Ένα ιδιαίτερο φαινόμενο παρατηρήθηκε κατά την περίοδο μετρήσεων του Σεπτεμβρίου 2002 στη θέση PM4. Κοντά στον πυθμένα, όπου παρατηρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις μεθανίου, η θερμοκρασία ήταν χαμηλότερη από αυτή σε άλλες θέσεις μετρήσεων (σε άλλους κρατήρες) στο ίδιο ή και σε μεγαλύτερο βάθος νερού. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στις τρεις επαναληπτικές μετρήσεις της κατακόρυφης κατανομής θερμοκρασίας και μεθανίου που πραγματοποιήθηκαν κατά το διήμερο των μετρήσεων. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις

μεθανίου σε συνδυασμό με τις μειωμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανώς να οφείλονται σε διαφυγή ρευστών από τον πυθμένα χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Από τη σχέση μεταξύ συγκέντρωσης διαλυμένου μεθανίου κοντά στον πυθμένα με αυτή κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας (πίνακας 5.4) φαίνεται ότι ο κρατήρας διαφυγής ρευστών PP4 παρουσιάζει περιόδους όπου προσφέρει μεθάνιο προς την υδάτινη στήλη και περιόδους όπου δεν υπάρχει ροή (εικόνα 5.37). Επίσης δεν φαίνεται το φαινόμενο να είναι εποχικό.

Πίνακας 5.4. Λόγοι συγκεντρώσεων διαλυμένου μεθανίου στο πυθμαίο προς το επιφανειακό στρώμα στη θέση PM4

Ημερομηνία	CH ₄ πυθμένας/ CH ₄ επιφάνεια	Ημερομηνία	CH ₄ πυθμένας/ CH ₄ επιφάνεια
22-Mar-02	9.06	21-Mar-03	1.10
24-Mar-02	238.50	7-Jun-03	1.18
25-Mar-02	2.13	8-Jun-03	1.25
19-May-02	24.75	8-Jun-03	1.28
4-Sep-02	17.48	9-Jun-03	1.59
4-Sep-02	17.42	31-Jul-03	3.42
5-Sep-02	28.11	1-Aug-03	6.73
2-Oct-02	3.22	4-Oct-03	1.99
24-Nov-02	1.02	5-Oct-03	1.96

Εικόνα 5.37. Τρισδιάστο διάγραμμα όπου φαίνεται η σχέση των λόγων συγκεντρώσεων διαλυμένου μεθανίου στο πυθμαίο προς το επιφανειακό στρώμα στη θέση PM4 με το χρόνο.

Οι κρατήρες διαφυγής ρευστών που ενεργοποιήθηκαν μετά από το σεισμό του 1993 (Hasiotis et al., 1996) έδειξαν τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις διαλυμένου μεθανίου στο πεδίο κατά τη διάρκεια όλων των περιόδων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε αυτές τις θέσεις.

5.2.3 Ερευνητική περίοδος 2004: Υποθαλάσσιο Παρατηρητήριο μακράς διάρκειας

Ο υποθαλάσσιος σταθμός παρακολούθησης –GMM- ποντίσθηκε σε βάθος 42 μέτρων, στον πυθμένα του σύνθετου κρατήρα PP4 (εικόνα 5.38), ο οποίος βρίσκεται στο νοτιότερο άκρο του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου. Η θέση πόντισης του σταθμού επιλέχθηκε σύμφωνα με τα πιο κάτω κριτήρια:

- Ο σύνθετος κρατήρας διαφυγής ρευστών PP4 παρουσίαζε τις μεγαλύτερες τιμές διαλυμένου μεθανίου και κατ'επέκταση τη μεγαλύτερη δραστηριότητα, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων μικρής περιόδου δηλαδή κατά την Ερευνητική περίοδο 2002-2003 (επιτόπιες μετρήσεις διαλυμένου CH₄).
- Η απόσταση του από την ακτή δεν είναι μεγάλη (400 μέτρα), ώστε να είναι δυνατή η πόντιση του καλωδίου σύνδεσης.
- Ο κρατήρας βρίσκεται μακριά από την περιοχή κατασκευής του Νέου Λιμένα Πατρών, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από τις εργασίες κατασκευής, καθώς επίσης και η ασφάλεια του σταθμού.
- Στο πλησιέστερο σημείο της ακτής ήταν δυνατό να εγκατασταθεί ο χερσαίος σταθμός, σε περιοχή που παραχωρήθηκε από το Δήμο Πατρέων, ενώ επίσης ήταν εύκολη η μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος και τηλεφωνικής γραμμής.

Εικόνα 5.38. (α) Βυθομετρικός χάρτης όπου φαίνεται η θέση πόντισης του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου, (β) μωσαϊκό ηχογραφιών στο οποίο αποτυπώνεται ο κρατήρας PP4 και (γ) σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία απεικονίζεται ο κρατήρας.

Η πρώτη πόντιση του σταθμού πραγματοποιήθηκε στις 23 Απριλίου 2004 και ανελκύθηκε στις 26 Ιουλίου 2004 καθώς καταστράφηκαν λόγω διάβρωσης οι αισθητήρες μεθανίου. Μετά την αντικατάσταση των αισθητήρων μεθανίου ο σταθμός επαναποντίστηκε στις 29 Σεπτεμβρίου 2004 και τελικά ανελκύθηκε στις 14 Ιανουαρίου 2005. Η λειτουργία του υποθαλάσσιου σταθμού παρακολούθησης διήρκεσε συνολικά 201 ημέρες (94 ημέρες κατά την πρώτη περίοδο και 107 ημέρες κατά τη δεύτερη περίοδο) και αποτελεί τη μεγαλύτερη σε χρονική διάρκεια παρακολούθηση κρητήρα διαφυγής ρευστών με αισθητήρες μεθανίου, υδρόθειου, θερμοκρασίας και πίεσης που έχει ποτέ πραγματοποιηθεί (Marinero et al., 2006; 2007). Στον πίνακα 5.5 δίνονται τα στατιστικά στοιχεία των δύο περιόδων μετρήσεων.

Πίνακας 5.5. Στατιστικά στοιχεία για τις περιόδους λειτουργίας του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου

Φάση Α'	Περίοδος Λειτουργίας			Φάση Β'	Περίοδος Λειτουργίας			ΣΥΝ
Αισθητήρας	Από	Έως	Σύνολο μετρήσεων	Αισθητήρας	Από	Έως	Σύνολο μετρήσεων	
Θερμοκρασία	23/04/2004	26/07/2004	13588	Θερμοκρασία	29/09/2004	14/01/2005	15398	28986
Πίεση	23/04/2004	26/07/2004	13588	Πίεση	29/09/2004	14/01/2005	15398	28986
Αγωγιμότητα	23/04/2004	26/07/2004	13588	Αγωγιμότητα	29/09/2004	14/01/2005	15398	28986
Διαλυμένο Μεθάνιο	23/04/2004	20/07/2004	12742	Διαλυμένο Μεθάνιο	29/09/2004	27/11/2004	8494	21236
Διαλυμένο Υδρόθειο	23/04/2004	26/07/2004	13588	Διαλυμένο Υδρόθειο				13588

Οι αισθητήρες μεθανίου και υδρόθειου παρουσίασαν σημαντική 'ολίσθηση τάσεως' (voltage drift) με το χρόνο. Αυτή η ολίσθηση τάσεως είναι μία τυπική συμπεριφορά σε λειτουργία μακράς περιόδου τόσο για αισθητήρες διπλού ηλεκτροδίου (αισθητήρας υδρόθειου) όσο και για αισθητήρες ημιαγωγών (αισθητήρες μεθανίου) (Marinero et al., 2004). Λόγω της καταστροφής των αισθητήρων μετά το πέρας των δύο περιόδων λειτουργίας δεν ήταν δυνατή η επαναβαθμονόμηση των αισθητήρων ώστε τα αφαιρεθεί αυτή η ολίσθηση τάσεως. Ο σχεδιασμός του σταθμού όμως έγινε έτσι ώστε να λειτουργούν ταυτόχρονα δύο αισθητήρες μεθανίου για να ελέγχεται η ποιότητα των αποτελεσμάτων καθώς οι συγκεκριμένοι αισθητήρες δεν είχαν ποτέ χρησιμοποιηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η κυματομορφή των σημάτων των δύο αισθητήρων έδειχνε πάντα τα ίδια χαρακτηριστικά (εικόνα 5.39), κάτι που αποδεικνύει ότι οι αισθητήρες αντιδρούσαν παρόμοια στις αλλαγές των συγκεντρώσεων. Σύμφωνα με αυτά οι απόλυτες μετρήσεις των διαλυμένων αερίων μπορεί να παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές αλλά οι σχετικές μεταβολές των συγκεντρώσεων διαλυμένων αερίων (αυξήσεις και μειώσεις) ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Εικόνα 5.39. Διάγραμμα τάσεως εξόδου για δύο αισθητήρες που λειτούργησαν ταυτόχρονα.

Επιπρόσθετα για τα δεδομένα από την 1^η Ιουλίου έως 20^η Ιουλίου, της πρώτης περιόδου μετρήσεων, λόγω της ύπαρξης τριών αισθητήρων μεθανίου, οι οποίοι δεν είχαν τον ίδιο χρόνο λειτουργίας (ο τρίτος αισθητήρας τέθηκε σε λειτουργία την 1^η Ιουλίου) έγινε μία προσπάθεια για τη αφαίρεση της ολισθήσης τάσεως των αισθητήρων με αποτέλεσμα τη βελτίωση των απόλυτων τιμών. Τα δεδομένα των αισθητήρων μεθανίου όμως της δεύτερης φάσης μετρήσεων, ήταν αδύνατο να εξομαλυνθούν λόγω της ολοκληρωτικής καταστροφής των αισθητήρων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται μόνο ως τάση εξόδου του αισθητήρα, και όχι ως συγκέντρωση μεθανίου.

5.2.3.1 Φυσικές παράμετροι

5.2.3.1.1 Θερμοκρασία

Η χρονοσειρά θερμοκρασίας τόσο από τις μετρήσεις του θερμομέτρου του CTD όσο και από τους αισθητήρες μεθανίου παρουσιάζει τις ίδιες τάσεις. Οι θερμοκρασίες των αισθητήρων μεθανίου ήταν 1-2°C υψηλότερες από αυτές του CTD ενώ επιπλέον υπήρχε μία μικρή χρονική υστέρηση, όπως ήταν αναμενόμενο από τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων. Γι αυτό το λόγο οι μετρήσεις θερμοκρασίας που παρουσιάζονται είναι αυτές του CTD.

Η θερμοκρασία κατά την πρώτη φάση (Απρίλιος – Ιούλιος) παρουσιάζει μία γενική τάση ανόδου από τους 14.3 °C στους 18.7°C (εικόνα 5.40), η οποία οφείλεται στην εποχική αύξηση της θερμοκρασίας στην παράκτια ζώνη της Πάτρας (Φερεντίνος κ.α., 2005). Επιπλέον καταγράφηκαν αντίθετα με τη γενική τάση αύξησης, 46 απότομες πτώσεις της θερμοκρασίας έως 1.7°C με χρονική διάρκεια έως 60 λεπτά (εικόνα 5.41). Ο ρυθμός πτώσης της θερμοκρασίας ($\Delta T/\Delta t$) κατά τη διάρκεια αυτών των απότομων μεταβολών έφτασε τους 0.16°C/min.

Εικόνα 5.40. Διάγραμμα θερμοκρασίας με το χρόνο για την πρώτη φάση λειτουργίας του σταθμού.

Εικόνα 5.41. Διάγραμμα θερμοκρασίας με το χρόνο στις 18 Μαΐου 2004 όπου φαίνεται μεγάλη και απότομη πτώση της θερμοκρασίας.

Στη δεύτερη περίοδο λειτουργίας η θερμοκρασία παρουσιάζει μία γενική τάση μείωσης από 23.8°C στους 16.2°C (εικόνα 5.42), η οποία οφείλεται στην εποχική μείωση της θερμοκρασίας (Φερεντίνος κ.α., 2005), ενώ καταγράφηκαν 17 απότομες πτώσεις της θερμοκρασίας.

Εικόνα 5.42. Διάγραμμα θερμοκρασίας με το χρόνο για τη δεύτερη φάση λειτουργίας του σταθμού.

5.2.3.1.2 Πίεση

Η πίεση και στις δύο περιόδους λειτουργίας του σταθμού παρουσιάζει περιοδικές μεταβολές με το χρόνο (εικόνα 5.43 και 5.44). Το μέγιστο εύρος της ημερήσιας μεταβολής της πίεσης είναι 0.2 dbar, το οποίο αντιστοιχεί σε μέγιστη ημερήσια μεταβολή του βάθους κατά 20cm, το οποίο είναι το μέγιστο εύρος παλίρροιας στον Πατραϊκό κόλπο (Αχιλλεόπουλος, 1990). Στα δεδομένα της πίεσης έγινε φασματική ανάλυση και προσδιορίστηκαν τα φάσματα fourier (fast fourier transform), από τα οποία προέκυψε ότι η πίεση εξαρτάται από τις κύριες συνιστώσες της παλίρροιας (εικόνα 5.45α και β). Αξιοσημείωτες μεταβολές στη γενική τάση της πίεσης παρουσιάστηκαν το δεκαήμερο 8-18 Μαΐου όπου καταγράφηκε αυξημένη πίεση. Η γενική πτώση της πίεσης που παρατηρήθηκε κατά τη δεύτερη περίοδο των μετρήσεων και κυρίως μετά τις 20 Νοεμβρίου 2004, δεν μπορεί να δικαιολογηθεί από ωκεανογραφικούς παράγοντες καθώς είναι πολύ μεγάλη (0.7dB αποδίδονται σε πτώση της στάθμης της θάλασσας περίπου 70cm) και συνεπώς αποδίδονται σε ‘ολίσθηση’ (drift) του αισθητήρα πίεσης του οργάνου.

Εικόνα 5.43. Διάγραμμα πίεσης με το χρόνο για την πρώτη φάση λειτουργίας του σταθμού.

Εικόνα 5.44. Διάγραμμα πίεσης με το χρόνο για τη δεύτερη φάση λειτουργίας του σταθμού.

Εικόνα 5.45. Φάσματα fourier για την πίεση για την πρώτη (α) και τη δεύτερη (β) περίοδο. Σημειώνονται οι συχνότητες που συμπίπτουν με τις κύριες συνιστώσες της παλίρροιας, K₁: σεληνιακή ημερήσια, O₁: κύρια σεληνιακή ημερήσια, M₂: κύρια σεληνιακή ημί-ημερήσια και S₂: κύρια ηλιακή ημί-ημερήσια.

Κατά τη διάρκεια των δύο περιόδων μετρήσεων παρατηρήθηκαν απότομες πτώσεις της πίεσης για μικρό χρονικό διάστημα (10-20 λεπτά). Οι πτώσεις αυτές της πίεσης συνοδεύονται με απότομες πτώσεις θερμοκρασίας και συγκεκριμένα κάθε πτώση θερμοκρασίας με ρυθμό $\Delta T/\Delta t > 0.01^\circ\text{C}/10 \text{ min}$ συνοδεύεται με πτώση της πίεσης (εικόνα 5.46).

Εικόνα 5.46. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης με το χρόνο ($\Delta T/\Delta t > 0.01^\circ\text{C}/10 \text{ min}$) όπου φαίνεται η σύνδεση μεταξύ απότομων πτώσεων της θερμοκρασίας και της πίεσης.

Η αλατότητα κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου παρουσιάζει ένα εύρος από 38.56 έως 38.82 psu ακολουθώντας μία γενική τάση αύξησης ενώ απότομες μεταβολές της αλατότητας

σχετίζονται με τις απότομες μεταβολές στη θερμοκρασία, συνήθως με τις απότομες πτώσεις της θερμοκρασίας να συνοδεύονται από απότομες ανόδους της αλατότητας (εικόνα 5.47). Η πυκνότητα παρουσιάζει εύρος τιμών από 1028 έως 1029.45 kgf/m³ και επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας (εικόνα 5.47). Κατά τη δεύτερη περίοδο η αλατότητα παρουσιάζει μία τάση μείωσης από 38.85 σε 38.8 psu. Εκτός από τη γενική τάση μείωσης παρατηρούνται απότομες μεταβολές της αλατότητας που σχετίζονται με τις μεταβολές της θερμοκρασίας, και μία περίοδος οχτώ ημερών από 28/12/2004 έως τις 3/01/2005, όπου καταγράφηκε σημαντική μείωση της αλατότητας. Η πυκνότητα παρουσιάζει μία τάση αύξησης η οποία οφείλεται στην πτώση της θερμοκρασίας. Επιπλέον η πυκνότητα επηρεάζεται από την έντονη μεταβολή της αλατότητας κατά το τέλος του 2008, την περίοδο σημαντικής μείωσης της αλατότητας (εικόνα 5.48).

Εικόνα 5.47. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης, αλατότητας και πίεσης με το χρόνο για την πρώτη φάση μετρήσεων.

Εικόνα 5.48. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης, αλατότητας και πίεσης με το χρόνο για την δεύτερη φάση μετρήσεων.

5.2.3.2 Διαλυμένο μεθάνιο και υδρόθειο

5.2.3.2.1 Μεθάνιο

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.49 δίνονται οι μετρήσεις διαλυμένου μεθανίου για την πρώτη περίοδο. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.50 δίνονται οι τάσεις εξόδου του αισθητήρα μεθανίου (1/Voltage) για τη δεύτερη περίοδο μετρήσεων, καθώς ο υπολογισμός της συγκέντρωσης μεθανίου δεν ήταν δυνατός λόγω κακής βαθμονόμησης των αισθητήρων κατά αυτή την περίοδο. Επίσης η ολοκληρωτική καταστροφή των αισθητήρων μετά την 5^η Δεκεμβρίου 2004 δεν επέτρεψε την επαναβαθμονόμηση των αισθητήρων μετά το τέλος των μετρήσεων. Η τάση εξόδου του αισθητήρα είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη συγκέντρωση διαλυμένου μεθανίου, με αποτέλεσμα οι απότομες πτώσεις της τάσης να οφείλονται σε αύξηση της συγκέντρωσης μεθανίου και συνεπώς οι απότομες αυξήσεις του λόγου 1/τάση να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενδείξεις γεγονότων διαφυγών (Etiope et al., 2009).

Εικόνα 5.49. Διάγραμμα συγκεντρώσεως διαλυμένου μεθανίου με το χρόνο για την πρώτη φάση μετρήσεων.

Εικόνα 5.50. Διάγραμμα τάσεως εξόδου ($1/V$) του αισθητήρα μεθανίου με το χρόνο για τη δεύτερη φάση μετρήσεων.

Από την ανάλυση των δεδομένων διαλυμένου μεθανίου και των μεταβολών των συγκεντρώσεων με το χρόνο φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου μετρήσεων καταγράφηκαν έντεκα (11) ακολουθίες γεγονότων διαφυγής και έξι (6) ανεξάρτητα γεγονότα διαφυγής σύντομου χρονικού διαστήματος (εικόνα 5.51, πίνακας 5.6). Οι έντεκα ακολουθίες (No. 2, 4, 5, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 16 και 17) διήρκεσαν μεγάλο χρονικό διάστημα και αποτελούνται από τουλάχιστον δύο μικρότερα γεγονότα προσθήκης μεθανίου στην υδάτινη στήλη (εικόνα 5.51). Οι έντεκα ακολουθίες γεγονότων διαφυγής και τα έξι ανεξάρτητα γεγονότα (No. 1, 3, 6, 8, 9, 10) δίνουν ένα συνολικό αριθμό εξήντα (60) γεγονότων διαφυγής (εικόνα 5.51, πίνακας 5.6). Οι περισσότερες ακολουθίες γεγονότων φαίνεται να σηματοδοτούνται με αλλαγές στη θερμοκρασία τόσο κατά την έναρξη τους όσο και κατά τη λήξη τους. Στον πίνακα 5.6 δίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των γεγονότων και η σχέση τους με αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες της υδάτινης στήλης. Οι ακολουθίες γεγονότων διαφυγής μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριους τύπους:

- **Ακολουθία Τύπου I:** χαρακτηρίζεται από σταθερές φυσικές ιδιότητες κατά την έναρξη της ενώ ανάλογα με το πώς ολοκληρώνεται διαχωρίζεται σε τρεις υποομάδες, α) απότομη πτώση της θερμοκρασίας, β) απότομη αύξηση της θερμοκρασίας και γ) σταθερή θερμοκρασία.
- **Ακολουθία Τύπου II:** χαρακτηρίζεται στην έναρξη της από απότομη πτώση της θερμοκρασίας, σύμφωνα με τη λήξη της υποδιαιρείται σε τρεις υποομάδες, α) απότομη πτώση της θερμοκρασίας, β) απότομη αύξηση της θερμοκρασίας και γ) σταθερή θερμοκρασία. Οι ακολουθίες τύπου II συμπεριλαμβάνουν τις μεγαλύτερες μεταβολές της συγκέντρωσης διαλυμένου μεθανίου.

Τα γεγονότα διαφυγών διακρίνονται σε τέσσερις Τύπους σύμφωνα με τη μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων κατά την έναρξη του γεγονότος:

- **Τύπος 1:** χαρακτηρίζεται από αύξηση του διαλυμένου μεθανίου χωρίς μεταβολή στις φυσικές ιδιότητες (εικόνα 5.52),
- **Τύπος 2:** η αύξηση του διαλυμένου μεθανίου συνοδεύεται με απότομη πτώση της θερμοκρασίας και της πίεσης. (εικόνα 5.53),
- **Τύπος 3:** η αύξηση του διαλυμένου μεθανίου συνοδεύεται με απότομη πτώση αποκλειστικά της θερμοκρασίας (εικόνα 5.54) και
- **Τύπος 4:** η αύξηση του διαλυμένου μεθανίου συνοδεύεται με απότομη αύξηση της θερμοκρασίας (εικόνα 5.55).

Εικόνα 5.51. Διάγραμμα διαλυμένου μεθανίου και θερμοκρασίας με το χρόνο όπου σημειώνονται με διαφορετικό χρώμα οι 11 ακολουθίες γεγονότων και τα 6 ανεξάρτητα γεγονότα που διακρίθηκαν.

Πίνακας 5.6. Ομαδοποίηση των γεγονότων διαφυγών σε σχέση με τις φυσικές ιδιότητες της υδάτινης στήλης.

Ακολουθία γεγονότων	Γεγονότα	Ημερομηνία	Διάρκεια (ώρες)	ΔCH_4	Έναρξη Ακολουθίας		Λήξη Ακολουθίας $\Delta\Gamma$	Τύπος ακολουθίας	Τύπος γεγονότος
					ΔT	ΔP			
1	1	05/17/04	3.00	0.05			-0.3	Iα	1
2	2	05/18/04	1.50	0.07	-2	-0.15	0.5	IIβ	2
	3	05/19/04	30.00	0.07					1
3	4	05/21/04	24.00	0.08	-0.2			IIγ	3
4	5	05/22/04	48.00	0.15	-0.2			IIγ	3
	6	05/24/04	12.00	0.1					1
	7	05/25/04	14.00	0.15					1
	8	05/25/04	1.00	0.05	-0.1				3
	9	05/25/04	3.00	0.1	-0.5	-0.02			2
5	10	05/26/04	1.50	0.05				Iβ	1
	11	05/27/04	1.50	0.08					1
	12	05/28/04	16.00	0.08					1
	13	05/28/04	8.00	0.05					1
	14	05/29/04	3.00	0.17					1
	15	05/29/04	1.00	0.05			0.3		1
6	16	06/01/04	18.00	0.05	0.1			Iγ	4
7	17	06/03/04	2.00	0.02	-0.5	-0.1		IIβ	2
	18	06/05/04	2.00	0.08	-0.2	-0.05			2
	19	06/05/04	4.00	0.08					1
	20	06/06/04	6.00	0.05					1
	21	06/06/04	6.00	0.05					1
	22	06/07/04	4.00	0.15					1
	23	06/08/04	2.00	0.2					1
	24	06/09/04	2.00	0.25					1
	25	06/09/04	12.00	0.3					1
	26	06/09/04	2.00	0.15			0.3		1

Ακολουθία γεγονότων	Γεγονότα	Ημερομηνία	Διάρκεια (ώρες)	ΔCH4	Έναρξη Ακολουθίας		Λήξη Ακολουθίας ΔΤ	Τύπος ακολουθίας	Τύπος γεγονότος
					ΔΤ	ΔΡ			
8	27	06/10/04	48.00	0.2			-0.1	Iα	4
9	28	06/13/04	3.00	0.1	-0.15			Πγ	3
10	29	06/14/04	2.00	0.1	-0.17			Πγ	3
11	30	06/15/04	48.00	0.15	-0.25	-0.04		Πα	2
	31	06/17/04	2.00	0.1	-0.5	-0.05	-0.9		2
12	32	06/18/04	12.00	0.45				Iγ	1
	33	06/20/04	13.00	0.2	0.1				4
	34	06/21/04	15.00	0.15					1
	35	06/21/04	2.00	0.1	0.02				4
13	36	06/28/04	18.00	0.17	-0.15			Πγ	3
	37	06/29/04	10.00	0.4	-0.05				3
	38	06/30/04	3.00	0.04	-0.3				3
14	39	07/01/04	3.00	0.01	-0.3			Πα	3
	40	07/02/04	1.00	0.02					1
	41	07/03/04	4.00	0.02			-0.2		1
	42	07/04/04	8.00	0.02			-0.2		1
	43	07/05/04	3.00	0.02			-0.2		1
15	44	07/05/04	8.00	0.04				Iβ	1
	45	07/07/04	3.00	0.02			0.1		1
16	46	07/09/04	4.00	0.02	-0.3		-0.3	Πγ	3
	47	07/09/04	5.00	0.01			-0.15		1
	48	07/10/04	11.00	0.01					1
17	49	07/12/04	10.00	0.02	-0.3			Πγ	3
	50	07/12/04	0.50	0.02	-0.2				3
	51	07/14/04	4.00	0.1					1
	52	07/15/04	8.00	0.15					1
	53	07/16/04	2.00	0.12					1
	54	07/16/04	2.00	0.11					1
	55	07/17/04	10.00	0.08					1
	56	07/17/04	3.00	0.05					1
	57	07/18/04	10.00	0.12					1
	58	07/18/04	1.00	0.05					1
	59	07/19/04	5.00	0.05					1
	60	07/19/04	3.00	0.25					1

Εικόνα 5.52. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης και διαλυμένου μεθανίου στο οποίο φαίνεται γεγονός διαφυγής Τύπου 1.

Εικόνα 5.53. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης και διαλυμένου μεθανίου στο οποίο φαίνεται γεγονός διαφυγής Τύπου 2.

Εικόνα 5.54. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης και διαλυμένου μεθανίου στο οποίο φαίνεται γεγονός διαφυγής Τύπου 3.

Εικόνα 5.55. Διάγραμμα θερμοκρασίας, πίεσης και διαλυμένου μεθανίου στο οποίο φαίνεται γεγονός διαφυγής Τύπου 4.

Για την ανάλυση των δεδομένων μεθανίου της δεύτερης περιόδου διακρίθηκαν δυο υποπερίοδοι. Η πρώτη από την αρχή των μετρήσεων έως τις 19/10/2004, και η δεύτερη από τις 20/10/2004 έως τις 6/12/2004, όταν και καταστράφηκαν οι αισθητήρες. Η διάκριση έγινε σύμφωνα με την ολίσθηση τάσεως που παρουσίασαν οι αισθητήρες μετά τις 19/10. Στην πρώτη υποπερίοδο (εικόνα 5.56) διακρίθηκαν 4 ακολουθίες γεγονότων και 6 ανεξάρτητα γεγονότα οι οποίες φαίνεται να ακολουθούν τη διάκριση των ακολουθιών της πρώτης περιόδου. Στη δεύτερη υποπερίοδο (εικόνα 5.57) παρατηρούνται πολύ μεγάλες μεταβολές στην τάση εξόδου του αισθητήρα οι οποίες δεν μπορούν να αποδοθούν σε μεταβολή της συγκέντρωσης μεθανίου. Κατά τη διάρκεια των μεγάλων αλλαγών που αποδίδονται σε ολίσθηση τάσεως (voltage drift) του αισθητήρα, εντοπίζονται και τέσσερα ανεξάρτητα γεγονότα μικρής χρονικής διάρκειας τα οποία πιθανόν να οφείλονται σε πραγματικές συνθήκες, καθώς ακολουθούν τα ίδια χαρακτηριστικά μεταβολών της θερμοκρασίας με την πρώτη φάση μετρήσεων. Επιπλέον καταγράφηκε μία ακολουθία γεγονότων από τις 3/11 έως τις 8/11 η οποία παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή στη τάση εξόδου του αισθητήρα, καθώς και μία ακολουθία από τις 12/11 έως τις 27/11 στην οποία παρατηρούνται συνεχείς μικρές μεταβολές της τάσης οι οποίες μπορεί να αποδοθούν σε μικρογεγονότα διαφυγών (προσθήκης διαλυμένου μεθανίου στην υδάτινη στήλη). Συνολικά στη δεύτερη περίοδο μετρήσεων καταγράφηκαν 10 γεγονότα και 6 ακολουθίες γεγονότων (δεν συμπεριλαμβάνονται τα μικρογεγονότα από 12/11-27/11) μεταβολής της τάσης εξόδου του αισθητήρα μεθανίου. Ο αριθμός των γεγονότων της δεύτερης περιόδου υπολείπεται σε σχέση με την πρώτη, αλλά αυτό πιθανόν να οφείλεται στην χειρότερη απόκριση των αισθητήρων μεθανίου της δεύτερης περιόδου στις μεταβολές της συγκέντρωσης μεθανίου στο θαλασσινό νερό.

Εικόνα 5.56. Διάγραμμα τάσης εξόδου του αισθητήρα μεθανίου (1/V) και θερμοκρασίας με το χρόνο από 29/9 έως 19/10/2004, όπου σημειώνονται 4 ακολουθίες γεγονότων και 6 ανεξάρτητα γεγονότα μεταβολής τάσεως.

Εικόνα 5.57. Διάγραμμα τάσης εξόδου του αισθητήρα μεθανίου (1/V) και θερμοκρασίας με το χρόνο από 29/9 έως 19/10/2004, όπου σημειώνονται 2 ακολουθίες γεγονότων και 4 ανεξάρτητα γεγονότα μεταβολής τάσεως.

5.2.3.2.2 Υδρόθειο

Η συγκέντρωση του διαλυμένου υδρόθειου κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου μετρήσεων χαρακτηρίζεται από μία γενική τάση αύξησης με το χρόνο (εικόνα 5.58). Σημειώνεται ότι αισθητήρας υδρόθειου είχε εγκατασταθεί μόνο κατά την πρώτη περίοδο μετρήσεων.

Η ανάλυση των δεδομένων έδειξε ότι κατά τη διάρκεια των έντονων πτώσεων της θερμοκρασίας, οι οποίες συνοδεύονται με αύξηση των συγκεντρώσεων του μεθανίου παρατηρούνται συγχρόνως αυξήσεις της συγκέντρωσης του υδρόθειου, οι οποίες είναι χρονικά περιορισμένες σε σχέση με αυτές του μεθανίου (εικόνα 5.59).

Εικόνα 5.58. Διάγραμμα συγκεντρώσεως διαλυμένου υδρόθειου με το χρόνο για την πρώτη περίοδο μετρήσεων.

Εικόνα 5.59. Διαγράμματα συγκεντρώσεως διαλυμένου μεθανίου, υδρόθειου, θερμοκρασίας και πίεσης με το χρόνο στα οποία φαίνονται πως οι απότομες πτώσεις θερμοκρασίας και πίεσης συνοδεύονται από αυξήσεις στη συγκέντρωση μεθανίου και υδρόθειου.

5.2.3.3 Συσχέτιση με σεισμολογικά δεδομένα

Τις περιόδους λειτουργίας του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου στην ευρύτερη περιοχή συνέβησαν πλήθος μικρά σεισμικά γεγονότα ($M < 4$, εκτός από 1 γεγονός), άλλα δεν συνέβησαν μεγάλοι σεισμοί, τόσο κατά την πρώτη περίοδο λειτουργίας (εικόνα 5.60α), όσο και κατά τη δεύτερη (εικόνα 5.60β). Η σύγκριση των δεδομένων του παρατηρητηρίου με τα σεισμολογικά δεδομένα πραγματοποιήθηκε για σεισμούς $> 3R$ που συνέβησαν σε ακτίνα 30km από τη θέση πόντισης.

Εικόνα 5.60. Σεισμικά επίκεντρα των σεισμών που συνέβησαν (α) κατά την πρώτη και (β) κατά τη δεύτερη περίοδο λειτουργίας.

Κατά το διάστημα 23/04-28/07/2004 συνέβησαν 15 σεισμικά γεγονότα με μέγεθος $M > 3R$. Από αυτά τα γεγονότα το μεγαλύτερο συνέβη στις 28/04 με μέγεθος $M = 4.1R$ και η απόσταση της εστιακής περιοχής με τη θέση του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου ήταν 15km. Στα δεδομένα από το υποβρύχιο παρατηρητήριο δεν καταγράφηκε καμία μεταβολή στις τιμές των μεταβλητών. Από τα υπόλοιπα 14 γεγονότα, σε 5 φαίνεται να υπάρχει μία μικρή συσχέτιση καθώς μετά από το σεισμικό γεγονός παρατηρήθηκε μεταβολή στη συγκέντρωση του διαλυμένου μεθανίου. Μεταβολές στη συγκέντρωση του μεθανίου παρατηρήθηκαν μετά από τα σεισμικά γεγονότα την 1^η Ιουνίου ($M = 3.2R$) (εικόνα 5.61α), 3^η Ιουνίου ($M = 3.0R$) (εικόνα 5.61β), την 20^η και 21^η Ιουνίου (δύο γεγονότα μέσα σε 2:30 ώρες με $M = 3.0R$) (εικόνα 5.62α) και πιθανώς την 7^η και 8^η Ιουνίου (δύο γεγονότα με $M = 3.2, 2.8R$) (εικόνα 5.62β).

Κατά τη δεύτερη περίοδο 29/09/2004-17/01/2005 συνέβησαν 5 μικρά σεισμικά γεγονότα στο διάστημα 15/10 – 17/10/2004 ($M = 2.9-3.2R$) πλησίον ($< 30km$) του υποβρύχιου παρατηρητηρίου, χωρίς όμως να παρατηρηθεί κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή στην τάση εξόδου του αισθητήρα μεθανίου.

Εικόνα 5.61. Συσχέτιση μεταβολής διαλυμένου μεθανίου μετά από τα σεισμικά γεγονότα στις (α) 01/06/2004 και (β) 03/06/2004.

Εικόνα 5.62. Συσχέτιση μεταβολής διαλυμένου μεθανίου μετά από τις ακολουθίες σεισμικών γεγονότων στις (α) 21/06/2004 και (β) 06/06/2004.

5.2.4 Ερευννητική περίοδος 2008-2009: Ηχοβολιστική παρακολούθηση λόγω της ενεργοποίησης από το σεισμό 6.4R της 8ης/6/2008

Στις 8 Ιουνίου 2008 (12:25 GMT), ένας μεγάλος σεισμός με μέγεθος $M_W = 6.4R$ συνέβη στη Βορειοδυτική Πελοπόννησο. Το επίκεντρο του σεισμού ήταν στην ευρύτερη περιοχή της Ανδραβίδας (Ηλεία) με ένα εστιακό βάθος περίπου 25 km (Kalogeras et al., 2008). Μετά τον κύριο σεισμό ένα πλήθος από μετασεισμούς προκλήθηκε στην ευρύτερη περιοχή (εικόνα 5.63). Ο σεισμός προκλήθηκε από ένα τυφλό ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης και προκάλεσε ένα πολύπλοκο σύστημα επιφανειακών διαρρηξέων (Koukouvelas et al., 2009). Στην περιοχή του Νέου Λιμένα Πατρών ο σεισμός προκάλεσε μικρές διακλάσεις και μετατοπίσεις (με εύρος μικρότερο από 30mm στον υπό κατασκευή κυματοθραύστη (Margaris et al., 2008). Θαλάσσιες γεωφυσικές έρευνες εκτελέστηκαν μετά το σεισμό με σκοπό να διερευνηθεί αν η σεισμική δραστηριότητα προκάλεσε ενεργοποίηση του πεδίου των κρατήρων διαφυγής ρευστών. Κατά τη διάρκεια των ερευνών το μεγαλύτερο πρόβλημα ήταν οι ωκεανογραφικές συνθήκες (ισχυρός κυματισμός) και οι εργασίες κατασκευής του Νέου Λιμένα που

προκαλούσαν μεγάλη διατάραξη στον πυθμένα με αποτέλεσμα την παρουσία αιωρούμενου υλικού στην υδάτινη στήλη. Σύμφωνα με αυτά υπήρχε μόνο ένα μικρό χρονικό παράθυρο νωρίς το πρωί, όπου η υδάτινη στήλη ήταν ανεπηρέαστη, ώστε να εντοπισθούν ηχητικές ανακλάσεις σε αυτή.

Εικόνα 5.63. Χάρτης της Βορειο-ανατολικής Πελοποννήσου όπου σημειώνονται τα επίκεντρα του κυρίως σεισμού και των μετασεισμών.

Κατά τη διάρκεια του πρώτου πλόα (10/6/2008) δεν έγινε δυνατός ο εντοπισμός διαφυγών στην υδάτινη στήλη λόγω του έντονου κυματισμού. Στον δεύτερο πλόα (11/6/2008) εντοπίστηκαν 15 θέσεις διαφυγών ρευστών οι οποίες συνδέονται με αντίστοιχους κρατήρες (εικόνες 5.64 και 5.65). Οι διαφυγές των ρευστών καταγράφηκαν ως στηλοειδείς έντονες ανακλάσεις (gas flares - Klaucke et al., 2005) στην υδάτινη στήλη. Αυτές οι στηλοειδείς ανακλάσεις παρουσιάζουν μικρό εύρος, εκτείνονται σε όλη την υδάτινη στήλη και συνήθως εκκινούν από συγκεκριμένο σημείο του πυθμένα των κρατήρων. Η μορφή, η ανακλαστικότητα, το σημείο εκκίνησης και η συνέχειά τους από τον πυθμένα προς την επιφάνεια της θάλασσας, είναι στοιχεία που δηλώνουν ότι αυτές οι ακουστικές ανωμαλίες οφείλονται σε διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα των κρατήρων. Οι θέσεις των διαφυγών δεν φαίνεται να περιορίζονται σε κάποιο συγκεκριμένο τμήμα του πεδίου, αλλά κυριαρχούν στο νότιο τομέα (εικόνα 5.65) (Χριστοδούλου κα, 2009; Christodoulou et al., 2009).

Εικόνα 5.64. Διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα όπως φαίνονται σε αδιόρθωτες καταγραφές του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στις 11 Ιουνίου 2008.

Παρόμοιες ακουστικές ανωμαλίες έχουν καταγραφεί τόσο στο πεδίο του Πατραϊκού κόλπου μετά το σεισμό της 14ης/7/1993 (Hasiotis, et al., 1996), όσο και σε άλλες περιοχές όπως στη Θάλασσα του Μαρμαρά (Kuşçu et al., 2005; Geli et al., 2008) και στην Καλιφόρνια (Field and Jennings, 1987) μετά από σεισμικά γεγονότα, ενώ έχουν περιγραφεί και σε βαθειά περιβάλλοντα (Klaucke et al., 2005).

Αν και το πεδίο του Πατραϊκού κόλπου δεν είχε διασκοπηθεί γεωφυσικά λίγο πριν το σεισμό της 8ης/6/2008, οι στηλοειδείς ανακλάσεις πρέπει να αποδοθούν, χωρίς αμφιβολία, στην ενεργοποίηση του πεδίου από τον συγκεκριμένο σεισμό και όχι σε μια «συνήθη» και συνεχή διαφυγή ρευστών. Τομογραφίες 3.5 kHz που συλλέχθηκαν περίπου 11 μήνες (7/2007) πριν το σεισμό δεν δείχνουν καμία παρουσία διαφυγών ισχυροποιώντας την πιο πάνω άποψη (εικόνες 5.67, 5.68).

Η σαφής αποτύπωση των στηλοειδών διαφυγών των ρευστών με τον ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης οδήγησε στην απόφαση της μετασεισμικής ηχοβολιστικής παρακολούθησης του πεδίου. Η ηχοβολιστική παρακολούθηση του πεδίου περιελάμβανε συστηματική καταγραφή του πεδίου κατά μήκος καθορισμένων πορειών, σε χρονικό διάστημα τεσσάρων, δέκα ημερών, έντεκα και δεκατεσσάρων μηνών μετά το σεισμό.

Για τον ασφαλέστερο εντοπισμό των ηχητικών ανακλάσεων στην υδάτινη στήλη πραγματοποιήθηκε περαιτέρω επεξεργασία των ηχογραφιών με ισχυρή ενίσχυση του σήματος (gain). Αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας είναι ο σχηματισμός «ηχογραφικών τομών» στις

οποίες απεικονίζονται ενισχυμένες αποκλειστικά οι ανακλάσεις στην υδάτινη στήλη (εικόνα 5.66). Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να θεωρηθεί ανάλογο με τις καταγραφές βυθομέτρου. Σε αυτές τις «ηχογραφικές τομές» διακρίθηκαν δύο τύποι ηχητικών ανακλάσεων:

- Στηλοειδείς (χωρικά περιορισμένες) ανακλάσεις με διάστικτο ακουστικό χαρακτήρα οι οποίες εκκινούν από τον πυθμένα και ανέρχονται στην υδάτινη στήλη (εικόνα 5.66),
- «Διάχυτες» ανακλάσεις μεγάλης γεωγραφικής έκτασης και χωρίς σαφή εσωτερικό ακουστικό χαρακτήρα (χαοτικές), οι οποίες εντοπίστηκαν κυρίως στο βόρειο τμήμα του πεδίου, στην περιοχή κατασκευής του Νέου Λιμένα (εικόνα 5.66).

Οι στηλοειδείς ηχητικές ανακλάσεις θεωρήθηκαν ότι αντιπροσωπεύουν διαφυγές ρευστών από τους κρατήρες ενώ οι «διάχυτες» εκτεταμένες ανακλάσεις αποδόθηκαν στην παρουσία αιωρούμενου υλικού στην υδάτινη στήλη, λόγω των εργασιών κατασκευής του Νέου Λιμένα Πατρών.

Η ηχοβολιστική παρακολούθηση των ενεργοποιημένων κρατήρων λόγω του σεισμού της 8/6/2008 έδειξε:

- Την 12^η/6/2008 (4^η ημέρα μετά το σεισμό) εντοπίστηκαν διαφυγές ρευστών στις 11 από τις 15 θέσεις που είχαν εντοπιστεί την 11^η/8/2008, Οι διαφυγές παρουσίαζαν μικρότερη ένταση σε σχέση με αυτές της προηγούμενης ημέρας, με βάση μια ποιοτική εκτίμηση των ακουστικών ιχνών των διαφυγών (εικόνα 5.65).
- Μετά από δεκαπέντε ημέρες (24/6/2008) επαναλήφθηκε το ίδιο πρόγραμμα πορειών και κατά τη διάρκεια του πλόα εντοπίστηκαν ενδείξεις διαφυγών ρευστών μόνο σε 4 θέσεις (εικόνα 5.65).
- Το ίδιο δίκτυο πορειών εκτελέστηκε 11 και 14 μήνες (10/5/2009 και 3/8/2009) μετά από το σεισμό. Σε αυτές τις περιόδους δεν εντοπίστηκαν ανακλάσεις μέσα στην υδάτινη στήλη με τέτοια μορφή ώστε να υποδηλώνουν ότι οι διαφυγές ρευστών που εντοπίστηκαν μετά το σεισμό συνεχίζουν να είναι ενεργές (εικόνες 4.69).
- Η σύγκριση των «ηχογραφικών τομών» του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης έδειξε τη μείωση του αριθμού των διαφυγών αλλά και τη μείωση της έντασης των συγκεκριμένων διαφυγών με το χρόνο (εικόνες 4.65, 4.67, 4.68)
- Οι διαφυγές παρουσιάζουν εκτεταμένη γεωγραφική διασπορά και δεν περιορίζονται σε συγκεκριμένο τμήμα του πεδίου όπως είχε συμβεί μετά το σεισμό της 14ης/7/1993.

Εικόνα 5.65. Μωσαϊκό ηχογραφιών από το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών στο οποίο έχουν τοποθετηθεί οι θέσεις διαφυγών που εντοπίστηκαν μετά από τους τρεις ωκεανογραφικούς πλόες.

Εικόνα 5.66. Αδιόρθωτη καταγραφή ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης («ηχογραφική τομή») με μεγάλη ενίσχυση σήματος όπου φαίνονται οι δύο τύποι ανακλάσεων στην υδάτινη στήλη.

Εικόνα 5.67. (α) Αδιόρθωτες καταγραφές ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης («ηχογραφικές τομές») κατά μήκος μίας πορείας σε διαφορετικές χρονικές περιόδους όπου σημειώνονται οι διαφυγές ρευστών και (β) σεισμική τομογραφία 3.5kHz κατά μήκος τμήματος της ίδιας πορείας η οποία καταγράφηκε ένα έτος πριν την εκδήλωση του σεισμού και στην οποία δεν υπάρχουν ενδείξεις διαφυγών ρευστών στην υδάτινη στήλη.

Εικόνα 5.68. (α) Αδιόρθωτες καταγραφές ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης («ηχογραφικές τομές») κατά μήκος μίας πορείας σε διαφορετικές χρονικές περιόδους όπου σημειώνονται οι διαφυγές ρευστών και (β) σεισμική τομογραφία 3.5kHz κατά μήκος τμήματος της ίδιας πορείας η οποία καταγράφηκε ένα έτος πριν την εκδήλωση του σεισμού και στην οποία δεν υπάρχουν ενδείξεις διαφυγών ρευστών στην υδάτινη στήλη.

Εικόνα 5.69. Αδιόρθωτες καταγραφές ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης τρεις ημέρες (α,γ) και ένα χρόνο (β,δ) μετά από τον κύριο σεισμό. Οι διαφυγές ρευστών που εντοπίζονται στις πρώτες (α, γ) δεν φαίνεται να υπάρχουν στις δεύτερες (β, δ).

Μετρήσεις διαλυμένου μεθανίου πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις επιλεγμένες θέσεις κατά τη διάρκεια του ερευνητικού πλόα στις 12/06/08 (εικόνα 5.70) (4 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό). Οι θέσεις επιλέχθηκαν σύμφωνα με το παλαιό δίκτυο μετρήσεων (Ερευνητική περίοδος: 2002-2003) αλλά και σύμφωνα με τη θέση των διαφυγών στις ηχογραφίες. Σε όλες τους σταθμούς οι τιμές του μεθανίου βρέθηκαν υψηλές και κυμαίνονται από 0,308 έως 0,490 ($\mu\text{mol/l}$). Οι μέσες τιμές συγκέντρωσης του μεθανίου για τους τέσσερις σταθμούς δείχνουν μια ασθενή τάση μείωσης των συγκεντρώσεων από το νότιο προς το κεντρικό τμήμα του πεδίου κρατήρων (πίνακας 5.7). Ο έντονος κυματισμός που επικρατούσε κατά την περίοδο των μετρήσεων φαίνεται να διαταράζει σημαντικά την υδάτινη στήλη με αποτέλεσμα το μεθάνιο να διαχέεται σε όλη την περιοχή των κρατήρων προκαλώντας αυξημένες συγκεντρώσεις στην ευρύτερη περιοχή του πεδίου.

Η θερμοκρασία του νερού στις θέσεις μετρήσεων, όπως φάνηκε από τις μετρήσεις θερμοκρασίας του διαλυμένου αερίου από τον αισθητήρα METS, ακολουθεί σε όλες τις θέσεις την κατανομή της θερμοκρασίας της ευρύτερης περιοχής του πεδίου κρατήρων για την αντίστοιχη εποχική περίοδο (εικόνα 5.71) (Φερντίνος κ.α., 2005). Η ελαφρά αυξημένη τιμή θερμοκρασίας κατά 0.5°C οφείλεται στον αισθητήρα διαλυμένου μεθανίου (βλ. κεφ. 4.5.3.1.1).

Εικόνα 5.70. Χάρτης του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου όπου σημειώνονται οι θέσεις μετρήσεων με αισθητήρα μεθανίου METS την 12^η/6/2008.

Πίνακας 5.7. Συγκεντρώσεις και μέσες συγκεντρώσεις ($\mu\text{mol/l}$) διαλυμένου μεθανίου, και θερμοκρασία νερού στην περιοχή του πεδίου κρατήρων.

	Θέση Μετρήσεων	Βάθος	CH_4 ($\mu\text{mol/l}$)		Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{T}$)		Θέση Μετρήσεων	Βάθος	CH_4 ($\mu\text{mol/l}$)		Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{T}$)
1	(PM4) 38° 12. 733 21° 42. 572	10m	0.398	0.460	20.6	3	(PM5) 38° 13. 537 21° 42. 824	5m	0.363	0.388	21.3
		20m		0.383	16.9			10m		0.385	17.5
		30m		0.375	16.4			14m		0.316	17.0
		35m		0.374	16.1						
2	(PM11) 38° 12. 960 21° 42. 753	10m	0.4	0.307	21.0	4	38° 15. 040 21° 42. 489 (Σταθμός αναφοράς)	10m	0.335	0.381	21.5
		20m		0.403	16.5			20m		0.315	16.5
		24m		0.490	16.4			30m		0.308	16.2

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις μεθανίου (0.363-0.400 $\mu\text{mol/l}$) που μετρήθηκαν λίγες μέρες μετά το σεισμό σε συγκεκριμένες θέσεις του πεδίου συνηγορούν στην άποψη ότι οι στηλοειδείς ανακλάσεις οφείλονται σε διαφυγές ρευστών. Επίσης η κατανομή της θερμοκρασίας με το βάθος δείχνει ότι κατά την περίοδο των μετρήσεων δεν υπήρχε διαφυγή θερμότερων ρευστών από τον πυθμένα, όπως είχε καταγραφεί πριν από το σεισμό της 14^{ης} Ιουλίου 1993.

Εικόνα 5.71. Κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας στην ευρύτερη περιοχή του πεδίου κρατήρων στις 11/6/2003 (Φερεντίνος κ.α., 2005) και οι μετρήσεις θερμοκρασίας από τον αισθητήρα διαλυμένου μεθανίου στις 12/06/2008 στη θέση PM4.

5.3 Οπτικές Παρατηρήσεις

Στον κρατήρα PP4 πραγματοποιήθηκαν καταδύσεις με το ROV στις 2/10/2002 με σκοπό την οπτική επιβεβαίωση διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα του κρατήρα διαφυγής ρευστών. Επίσης αναζητήθηκαν άλλες έμμεσες ενδείξεις διαφυγών ρευστών όπως χημικοσυνθετικές βιοκοινωνίες (βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα) ή παρουσία αυθιγενών μεθανογενών ανθρακικών ορυκτών. Η οπτική παρατήρηση έδειξε ότι ο πυθμένας του σύνθετου κρατήρα PP4 παρουσιάζει ένα μονότονο ομογενή χαρακτήρα από ιλύ (εικόνα 5.72α). Ο πυθμένας παρουσιάζει μικρές λοφώδεις εξάρσεις και μικρές τρύπες (εικόνα 5.72β) τα οποία πιθανόν να οφείλονται σε βιοαναμόχλευση, αν και δεν βρέθηκαν ενδείξεις μακροπανίδας. Επίσης στην υδάτινη στήλη δεν βρέθηκαν ενδείξεις διαφυγών ρευστών, ενώ παράλληλα με την κατάδυση του ROV πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις διαλυμένου μεθανίου (εικόνα 5.72γ) με τιμή κοντά στον πυθμένα 0.319 $\mu\text{mol/l}$. Την ίδια ημέρα δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε άλλες θέσεις ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση αλλά η σχέση συγκέντρωσης μεθανίου στο πυθμαίο στρώμα σε σχέση με το επιφανειακό (πίνακας 5.5) έδειξε μία μικρή τάση προσφοράς μεθανίου από τον πυθμένα. Η απουσία ορατών διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα σε συνδυασμό με τη μικρή προσφορά μεθανίου στην υδάτινη στήλη από τον πυθμένα κατά την περίοδο της κατάδυσης επιβεβαιώνει το γεγονός ότι μικροδιαφυγές ρευστών από τον πυθμένα συμβαίνουν σε περιόδους ηρεμίας ενώ μακροδιαφυγές συμβαίνουν μετά από σεισμικά γεγονότα.

Εικόνα 5.72. Φωτογραφίες από τον κρατήρα διαφυγής ρευστών PP4, στις οποίες φαίνεται (α) ομογενής πυθμένας με ιλύ, (β) μικρές λοφώδεις εξάρσεις με οπές στον πυθμένα και (γ) ο αισθητήρας μεθανίου κοντά στον πυθμένα του κρατήρα (σημ. η ημερομηνία στις φωτογραφίες δεν είναι πραγματική λόγω προβλήματος του ROV).

5.4 Ιζηματολογικά κριτήρια

Σε 16 πυρήνες ιζήματος (μέγιστο μήκος 160cm) που συλλέχθηκαν από το βόρειο τομέα του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών (εικόνα 5.73) πραγματοποιήθηκαν ιζηματολογικές και γεωχημικές αναλύσεις σε επιλεγμένα δείγματα (Ravasopoulos, 2000). Από το σύνολο των πυρήνων οι 6 συλλέχθηκαν από τον πυθμένα κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 5.73. Βυθομετρικός χάρτης του βόρειου τομέα του πεδίου στον οποίο σημειώνονται οι θέσεις και η κοκκομετρική κατάταξη των δειγμάτων των πυρήνων ιζήματος.

Η κατανομή των κοκκομετρικών κλάσεων στα επιφανειακά δείγματα έδειξε ότι τα δείγματα από πυρήνες που συλλέχθηκαν κοντά στην ακτή είναι πιο αδρόκοικα σε σχέση με αυτά από τους πιο απομακρυσμένους από την ακτή (εικόνα 5.74). Εξαιρέση αποτελεί το επιφανειακό δείγμα από τον πυρήνα C24, ο οποίος συλλέχθηκε από τον πυθμένα του κρατήρα διαφυγής ρευστών PP24, το οποίο έχει σχετικά υψηλό ποσοστό άμμου (15.7%). Επίσης το επιφανειακό δείγμα από τον πυρήνα C14, ο οποίος συλλέχθηκε από τον πυθμένα του κρατήρα PP9, παρουσιάζει πολύ χαμηλά ποσοστά αργίλου, 5.5%, όταν ο μέσος όρος της αργίλου στα επιφανειακά δείγματα των πυρήνων είναι 18.5%.

Εικόνα 5.74. Κατανομή των κοκκομετρικών κλάσεων των επιφανειακών δειγμάτων των πυρήνων ιζήματος από το βόρειο τμήμα του πεδίου κρατήρων.

Η κατανομή των κοκκομετρικών κλάσεων των δειγμάτων από όλο το μήκος των πυρήνων έδειξε ότι τα δείγματα από πυρήνες που συλλέχθηκαν κυρίως κοντά στην ακτή είναι πιο αδρόκοικα σε σχέση με αυτά από τους πιο απομακρυσμένους από την ακτή (εικόνα 5.75). Σημαντική εξαιρέση αποτελεί ο πυρήνας C12, ο οποίος συλλέχθηκε από τον πυθμένα του κρατήρα PP5, ο οποίος έχει υψηλά ποσοστά ψηφιδών (10.5%), ο πυρήνας C24, ο οποίος συλλέχθηκε από τον πυθμένα του κρατήρα διαφυγής ρευστών PP24, και έχει υψηλό ποσοστό άμμου (12.4%), όπως φάνηκε και από τα επιφανειακά δείγματα. Σημαντική διαφοροποίηση παρουσιάζει και ο πυρήνας C14, ο οποίος συλλέχθηκε από τον πυθμένα του κρατήρα PP9, και παρουσιάζει τα χαμηλότερα ποσοστά αργίλου (25%) από όλους τους πυρήνες.

Συνεπώς η κύρια τάση των κοκκομετρικών δεδομένων στο βόρειο τμήμα του πεδίου είναι τα αδρόκοικα ιζήματα να βρίσκονται κοντά στην ακτή και τα λεπτόκοικα πιο απομακρυσμένα από την ακτή. Εξαιρέσεις αποτελούν τα δείγματα που συλλέχθηκαν από τον

πυθμένα των κρατήρων PP5, PP9 και PP24. Οι κρατήρες PP5, PP9 και PP14 ήταν από τους πιο ενεργούς κρατήρες μετά από το σεισμό 5.4R της 14^{ης} Ιουλίου 1993 όπως φάνηκε από τα μεγαλύτερου εύρους και υψηλής ανακλαστικότητας 'νέφη' που καταγράφηκαν ακριβώς πάνω από τους συγκεκριμένους κρατήρες στις ηχογραφίες του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης (εικόνα 5.33).

Εικόνα 5.75. Κατανομή των κοκκομετρικών κλάσεων του συνόλου των δειγμάτων των πυρήνων ιζήματος από το βόρειο τομέα του πεδίου κρατήρων.

Τα αποτελέσματα των γεωχημικών αναλύσεων έδειξαν μικρότερες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στα επιφανειακά ιζήματα σε σχέση με τα υποεπιφανειακά, για τα περισσότερα βαρέα μέταλλα σε όλους τους πυρήνες ιζήματος, το οποίο πιθανώς να οφείλεται στην δραστηριότητα του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών που προκαλεί απαναιώρηση των κόκκων (Ravasopoulos et al., 2002).

Η συνδυαστική ανάλυση των κοκκομετρικών και των γεωχημικών δεδομένων έδειξε ότι τα επιφανειακά ιζήματα που συλλέχθηκαν εκτός των κρατήρων χαρακτηρίζονται από την παρουσία ενός στατιστικά σημαντικού παράγοντα που συνδέει το οργανικό υλικό με τα βαρέα μέταλλα, ενός παράγοντα που απουσιάζει από τα δείγματα που συλλέχθηκαν από τον πυθμένα εντός των κρατήρων διαφυγής ρευστών (Ravasopoulos et al., 2002).

Το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου σχηματίζεται στην παρακτίτια ζώνη της Πάτρας, στην ευρύτερη περιοχή όπου έως το 1985 αποτελούσε την βιομηχανική ζώνη της πόλης, ενώ η απουσία βιολογικού καθαρισμού οδηγούσε τα αστικά λύματα στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή. Σύμφωνα με αυτά είναι αναμενόμενο η περιοχή του πεδίου να

είναι επιβαρυνμένη τόσο σε βαρέα μέταλλα όσο και σε οργανικό υλικό. Η απουσία της σύνδεσης του οργανικού υλικού με τα βαρέα μέταλλα στα ιζήματα εντός των κρατήρων διαφυγής ρευστών πιθανώς δείχνει την ενεργότητά τους..

5.5 Μετρήσεις ροής και σύσταση αερίων στην ευρύτερη περιοχή του πεδίου κρατήρων

Ο ρυθμός διαφυγής και η χημική σύσταση των ρευστών είναι δύο κρίσιμα στοιχεία που χαρακτηρίζουν κάθε περιοχή διαφυγής ρευστών. Ενώ στο χερσαίο περιβάλλον περιοχές με διαφυγές ρευστών (-κυρίως περιοχές λασπούχων ηφαιστειών-) έχουν μελετηθεί συστηματικά όσον αφορά στις δύο παραπάνω παραμέτρους, στο θαλάσσιο περιβάλλον οι αντίστοιχες έρευνες είναι περιορισμένες εξαιτίας των δυσκολιών στη δειγματοληψία των ρευστών και στη παρακολούθηση της ροής τους. Στα πλαίσια της συστηματικής μελέτης του πεδίου του Πατραϊκού κόλπου και δεδομένης της μικρής απόστασης του από την ακτή διενεργήθηκαν δειγματοληπτικές μετρήσεις διαφυγής αερίων από το έδαφος κατά μήκος της ακτής με ιδιαίτερη έμφαση στο ίχνος του ρήγματος της Αγίας Τριάδος καθώς και σε γεωτρήσεις και πηγάδια της περιοχής.

5.5.1 Προέλευση των ρευστών

Για τη χημική ανάλυση των ρευστών συλλέχθηκαν δύο δείγματα από μια πολύ παραγωγική σε αέρια, κλειστή γεώτρηση (P9) στην παράκτια ζώνη της Πάτρας, ένα δείγμα αερίου ακριβώς στο στόμιο της γεώτρησης και ένα δείγμα νερού από αυτή (εικόνα 5.73). Τα δείγματα αναλύθηκαν για τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης τους καθώς και της ισοτοπικής σύστασης του άνθρακα και υδρογόνου με αέριο χρωματογράφο και φασματογράφο μάζας, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων και της αναγωγής των αερίων σε αέρια απαλλαγμένα από τον ατμοσφαιρικό αέρα δίνονται στον πίνακα 5.8, ενώ τα αποτελέσματα για την ισοτοπική σύσταση του άνθρακα δίνονται στον πίνακα 5.9. Η χημική ανάλυση έδειξε ότι το κύριο συστατικό των δειγμάτων ρευστού είναι το μεθάνιο σε ποσοστό άνω του 80%, με πολύ μικρή παρουσία αιθανίου και ανώτερων υδρογονανθράκων.

Πίνακας 5.8. Χημική ανάλυση αερίων στα δείγματα της παράκτιας ζώνης της Πάτρας και (*)αναγωγή των τιμών σε ελεύθερη ατμοσφαιρικού αέρα βάση.

Δείγμα	H ₂ S %	He %	H ₂ %	Ar %	O ₂ %	CO ₂ %	N ₂ %	C ₁ %	C ₂ %	C ₃ %	iC ₄ %	nC ₄ %	iC ₅ %	nC ₅ %	C ₆ + %
P9 Νερό	0			0.245	0.518	6.07	11.25	81.91	0.0052	0	0	0	0	0	0
P9 Αέριο	0	0	0	0.398	7.83	1.19	32.66	57.92	0.0023	0	0	0	0	0	0.0031
P9* Νερό	-	-	-	0.228	-	6.224	9.555	83.988	0.0053	-	-	-	-	-	-
P9* Αέριο	-	-	-	0.078	-	1.9	5.54	92.478	0.0037	-	-	-	-	-	0.004

Πίνακας 5.9. Ισοτοπική ανάλυση των δειγμάτων της παράκτιας ζώνης της Πάτρας.

Δείγμα	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ (‰)	$\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ (‰)
P9 Νερό	-72.12	-201.3
P9 Αέριο	-73.93	-210.9

Η τοποθέτηση των αποτελεσμάτων της ισοτοπικής ανάλυσης στα διαγράμματα διάκρισης και προέλευσης του μεθανίου (ισοτόπων άνθρακα-υδρογόνου και 'Bernard') (Whiticar, 1999) έδειξε πως το μεθάνιο που διαφεύγει από τη γεώτρηση που βρίσκεται στην παράκτια ζώνη νότια του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών είναι μικροβιακής προελεύσεως και σχηματίστηκε σε θαλάσσιο περιβάλλον (εικόνες 5.76, 5.77).

Εικόνα 5.76. Κατάταξη των δειγμάτων της παράκτιας ζώνης της Πάτρας σύμφωνα με τα ισότοπα άνθρακα και υδρογόνου.

Εικόνα 5.77. Διάγραμμα Bernard (τροποποίηση από Whiticar, 1999) στο οποίο τοποθετήθηκαν τα αποτελέσματα χημικών και ισοτοπικών αναλύσεων των δειγμάτων της παράκτιας ζώνης της Πάτρας.

5.5.2 Ροή μεθανίου στην παράκτια ζώνη

Οι μετρήσεις ροής μεθανίου από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα εκτελέστηκαν σε δύο περιόδους, τον Ιούλιο του 2004 και τον Ιούλιο του 2006. Στον πίνακα 5.10 δίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της πρώτης περιόδου και στον πίνακα 5.11 οι μετρήσεις της δεύτερης περιόδου ενώ οι θέσεις των μετρήσεων και για τις δύο περιόδους δίνονται στο χάρτη της εικόνας 5.78. Η χωρική κατανομή της ροής του μεθανίου ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$) για τις δύο περιόδους δίνονται στους χάρτες των εικόνων 5.79 και 5.80.

Εικόνα 5.78. Χάρτης της παράκτιας ζώνης της Πάτρας όπου σημειώνονται οι θέσεις μετρήσεων ροής μεθανίου.

Πίνακας 5.10. Μετρήσεις ροής μεθανίου στην παράκτια ζώνη πλησίον του πεδίου κρατήρων διαφυγής
ρευστών τον Ιούλιο 2004.

Θέση	Γεωγραφικό Μήκος (UTM)	Γεωγραφικό Πλάτος (UTM)	Ροή CH ₄ (mg /m ² d)	Χαρακτηριστικά Θέσης
P1	564974	4236490	16	Ακτή
P2	562404	4229280	86	Ακτή – Σταθμός ακτής GMM
P2b	562413	4229298	48	Ακτή – Σταθμός ακτής GMM
P3	562517	4229412	18	Ακτή
P4	562647	4229607	60	Ακτή
P5	562651	4229646	11	Ακτή
P6	564396	4232008	9	Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας
P6b	564418	4231983	0	Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας
P6c	564364	4231969	8	Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας
P6d	564498	4232046	11	Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας
P7	563356	4231786	114	Ακτή - Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας
P8	560498	4227155	65	Ακτή
P9	560759	4227582	4150	Μακροδιαφυγή νότια του πεδίου
P9b	560759	4227582	1850	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
P9c	560759	4227582	3500	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
P9d	560759	4227582	450	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
P10	560756	4227586	290	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
P11	561285	4228196	185	Ακτή
P12	563309	4231523	112	Ακτή - Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας
P13	563166	4230924	80	Ακτή
P14	562906	4230286	120	Ακτή

Πίνακας 5.11. Μετρήσεις ροής μεθανίου στην παράκτια ζώνη πλησίον του πεδίου κρατήρων διαφυγής
ρευστών τον Ιούλιο 2006

Θέση	Γεωγραφικό Μήκος UTM	Γεωγραφικό Πλάτος UTM	Ροή CH ₄ (mg /m ² d)	Χαρακτηριστικά Θέσης
c1	563516	4233034	<100	Ακτή
c2	563528	4232860	<100	Ακτή
c3	563436	4232383	<100	Ακτή
c4	563465	4232199	<100	Ακτή
c5	563429	4231950	<100	Ακτή
c6	563419	4231843	280	Ακτή - Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας
c7	563399	4231749	<100	Ακτή
c8	563337	4231512	150	Ακτή
c9	563295	4231320	<100	Ακτή
c10	562999	4230286	<100	Ακτή
c11	562753	4229977	<100	Ακτή
c12	562642	4229500	140	Ακτή
c13	562432	4229289	220	Ακτή - Σταθμός ακτής GMM
c14	562203	4228917	150	Ακτή
c15	561575	4228523	<100	Ακτή
c16	561307	4228232	<100	Ακτή
c17	560926	4227753	120	Ακτή
c18	560548	4227288	350	Ακτή
c19	560482	4227149	140	Ακτή
c20	560282	4226855	<100	Ακτή
s1	560790	4227552	450	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s2	560771	4227530	300	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s3(P9)	560788	4227575	15500	Μακροδιαφυγή νότια του πεδίου
s3b(P9)	560791	4227577	12000	Μακροδιαφυγή νότια του πεδίου
s4	560760	4227553	3500	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s5	560819	4227618	480	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s6	560796	4227638	200	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s7	560764	4227642	<100	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s8	560723	4227635	600	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s9	560683	4227596	350	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s10	560645	4227540	200	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s11	560717	4227539	1500	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s12	560699	4227494	150	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s13	560595	4227493	<100	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
s14	560639	4227438	150	Μικροδιαφυγή νότια του πεδίου
t1	564501	4232045	<100	Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας
t2	564427	4231989	<100	Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας
t3	564364	4231969	<100	Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας
t4	564329	4231978	<100	Ίχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας

Οι μετρήσεις ροής του μεθανίου κατά τη δεύτερη περίοδο μετρήσεων (7/2006) πραγματοποιήθηκαν σε ένα πυκνότερο δίκτυο θέσεων έναντι αυτού της πρώτης, άλλα οι μετρήσεις έγιναν με μικρότερο χρόνο παραμονής του ειδικού θαλάμου πάνω στο έδαφος, με αποτέλεσμα το όριο ανιχνευσιμότητας της μεθόδου να είναι $>100 \text{ mg /m}^2 \text{ d}$.

Οι μετρήσεις ροής μεθανίου, και για τις δύο περιόδους μετρήσεων, έδειξαν πολύ μεγάλες διαφυγές ($350\text{-}15500 \text{ mg /m}^2 \text{ d}$) σε θέσεις (c18, s1, s2, s3, s4, s5, s8, s9, s11, και P9) κοντά στην ακτή, νοτίως του πεδίου κρατήρων και του κρατήρα PP4. Οι θέσεις αυτές βρίσκονται 2000-2600 μέτρα NNΔ του κρατήρα PP4 (ο οποίος είναι ο νοτιότερος του πεδίου) (πίνακες 4.10, 4.11 εικόνα 5.78). Μια από αυτές τις θέσεις (P9 για την περίοδο 2004 και s3 για την περίοδο 2006) είναι μια κλειστή γεώτρηση η οποία βρίσκεται σε απόσταση 2400 μέτρων N.NΔ από τον κρατήρα PP4 και 75 μέτρα από την ακτογραμμή (εικόνα 5.78). Οι μέγιστες τιμές ροής (3500 και $15500 \text{ mg /m}^2 \text{ d}$) και για τις δύο περιόδους μετρήσεων, μετρήθηκαν στην γεώτρηση P9(s3) ενώ αυξημένες τιμές ροής μετρήθηκαν σε πολλά σημεία στο έδαφος περιφερειακά της γεώτρησης (εικόνες 5.79, 5.80 – *ένθετοι χάρτες*). Αυξημένες τιμές ροής μεθανίου ($112\text{-}114 \text{ mg /m}^2 \text{ d}$) βρέθηκαν επίσης στην ακτή, κατά μήκος του ίχνος του ρήγματος της Αγίας Τριάδος, του οποίου η υποθαλάσσια συνέχεια αποτελεί το βόρειο όριο του πεδίου των κρατήρων. Οι μετρήσεις της δεύτερης περιόδου επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της πρώτης, καθώς οι υψηλές τιμές ροής μεθανίου εντοπίζονται στις ίδιες θέσεις.

Ο Etiope (2009) πρότεινε, μετά από στατιστική ανάλυση 563 μετρήσεων ροής μεθανίου σε ξηρά εδάφη διαφόρων περιοχών στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ, τη διάκριση των μικροδιαφυγών σε τρία επίπεδα:

- επίπεδο 1: υψηλή μικροδιαφυγή (CH_4 : $>50 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$),
- επίπεδο 2: μέση μικροδιαφυγή (CH_4 : $5\text{-}50 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) και
- επίπεδο 3: χαμηλή μικροδιαφυγή (CH_4 : $0\text{-}5 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Η διαφυγή μεθανίου στην παράκτια ζώνη της Πάτρας χαρακτηρίζεται ως:

- (α) υψηλή μικροδιαφυγή στην ευρύτερη περιοχή και περιφερειακά της γεώτρησης P9, NNA του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών,
- (β) μέση έως υψηλή μικροδιαφυγή στην πλησιέστερη θέση ακτής από τον κρατήρα PP4,
- (γ) υψηλή μικροδιαφυγή στην παράκτια περιοχή όπου εμφανίζεται το ίχνος του ρήγματος της Αγ. Τριάδας, και
- (δ) χαμηλή μικροδιαφυγή κατά μήκος του ίχνους του ρήγματος της Αγ. Τριάδας σε απόσταση 1000 μέτρων από την ακτή.

Εικόνα 5.79. Κατανομή της ροής μεθανίου σε $\text{mg}/\text{m}^2.\text{d}$ στην παράκτια ζώνη της Πάτρας σύμφωνα με τις μετρήσεις του 2004. (στον ένθετο χάρτη παρουσιάζονται οι τιμές ροής στην περιοχή της γεώτρησης P9).

Εικόνα 5.80. Κατανομή της ροής μεθανίου σε $\text{mg}/\text{m}^2.\text{d}$ στην παράκτια ζώνη της Πάτρας σύμφωνα με τις μετρήσεις του 2004. Το όριο ανιχνευσιμότητας είναι $100 \text{ mg}/\text{m}^2.\text{d}$ (στον ένθετο χάρτη παρουσιάζονται οι τιμές ροής στην περιοχή της γεώτρησης P9-s3).

Οι πολύ υψηλές τιμές ροής μεθανίου στη γεώτρηση P9-s3 μπορεί να χαρακτηρίσουν τη θέση ως μακροδιαφυγή. Το μέγεθος της ροής μεθανίου στην παράκτια ζώνη της Πάτρας μπορεί να χαρακτηριστεί μικρό σε σύγκριση με τη ροή μεθανίου σε άλλες μακροδιαφυγές από τον παγκόσμιο χώρο, όπως π.χ. σε λασπούχα ηφαίστεια, αλλά είναι αρκετά μεγάλη συγκρινόμενη με μικροδιαφυγές σε ξηρά εδάφη (Etiope, 2009).

5.5.3 Εκτίμηση συνολικής ποσότητας διαφεύγοντος μεθανίου προς την ατμόσφαιρα

5.5.3.1 Εκτίμηση ποσότητας εκλυόμενου μεθανίου από την παράκτια ζώνης της Πάτρας

Σύμφωνα με τις μετρήσεις ροής μεθανίου από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα επιχειρήθηκε μια εκτίμηση της ετήσιας προσφοράς μεθανίου (E_{CH_4}) από τις θέσεις έκλυσης μεθανίου στην παράκτια ζώνη της Πάτρας (πίνακας 5.11). Ο υπολογισμός βασίστηκε στον τύπο:

$$E_{CH_4} = A \bullet (F) \quad (5.1)$$

Όπου A: η περιοχή της διαφυγής σε m^2

και (F): η μέση ροή στην περιοχή σε $mg \, m^{-2} \, d^{-1}$

Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε σε τρεις περιοχές στις οποίες μετρήθηκε θετική ροή μεθανίου σε περισσότερες από μία θέσεις (εικόνα 5.81). Οι δύο πολύ υψηλές τιμές ροής μεθανίου (s3 και s3b) που μετρήθηκαν στην γεώτρηση P9, NNA του πεδίου, θεωρούνται ως μακροδιαφυγές και ο υπολογισμός της ροής θεωρείται σημειακός, ενώ αυτές οι τιμές δεν συμπεριλήφθησαν στον υπολογισμό της μέσης τιμής ροής της περιοχής (εξίσωση 5.1). Οι τρεις περιοχές υπολογισμού της ροής είναι: (α) η περιοχή της γεώτρησης P9 όπου μετρήθηκαν οι υψηλότερες τιμές ροής μεθανίου και η οποία διαχωρίστηκε σε δύο υποπεριοχές σύμφωνα με την τάξη μεγέθους της ροής μεθανίου, (β) η περιοχή στην ακτή όπου είχε τοποθετηθεί ο σταθμός ακτής του υποθαλάσσιου παρατηρητηρίου GMM (η πλησιέστερη θέση ακτής από τον κρατήρα PP4) και (γ) η περιοχή στην ακτή όπου εμφανίζεται το ίχνος του ρήγματος της Αγίας Τριάδας.

Πίνακας 5.12. Εκτίμηση της προσφοράς μεθανίου στην ατμόσφαιρα από την παράκτια ζώνη της Πάτρας.

	Εμβαδόν	Προσφορά CH ₄ σε t/y
Γεώτρηση P9 (2 μακροδιαφυγές)	σημειακό	0.02
Περιοχή γεώτρησης	1600 m ²	0.35
Ευρύτερη περιοχή γεώτρησης	50000 m ²	2.73
Ακτή - Τχνος ρήγματος Αγ. Τριάδας	20000 m ²	0.82
Ακτή - Σταθμός ακτής GMM	20000 m ²	0.32
Συνολική προσφορά CH₄		4.32

Εικόνα 5.81. Χάρτης της παράκτιας ζώνης της Πάτρας όπου παρουσιάζονται οι τρεις περιοχές μικροδιαφυγών στις οποίες εκτιμήθηκε η συνολική προσφορά μεθανίου προς την ατμόσφαιρα.

Η σύγκριση της ετήσιας προσφοράς μεθανίου προς την ατμόσφαιρα (**4.32t/y**) από την παράκτια ζώνη της Πάτρας με αυτές από άλλες περιοχές του παγκόσμιου χώρου (Judd, 2004; Etiope, 2009) έδειξε ότι είναι της ίδιας τάξεως μεγέθους με περιοχές όπου έχουν καταγραφεί ξηρές διαφυγές (dry seepages), αλλά είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με διαφυγές που προέρχονται από λασπούχα ηφαίστεια. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις ροής μεθανίου και οι εκτιμήσεις της ποσότητας του διαφεύγοντος μεθανίου από την παράκτια ζώνη της Πάτρας και από την περιοχή του Κατακόλου (βλ. κεφ. 7) είναι οι πρώτες και ίσως οι μοναδικές που έχουν πραγματοποιηθεί στον ελληνικό χώρο.

5.5.3.2 Εκτίμηση ποσότητας εκλυόμενου μεθανίου από το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών

Οι συστηματικές μετρήσεις ροής μεθανίου στην παράκτια ζώνη της Πάτρας, σε πολύ μικρή απόσταση από το υποθαλάσσιο πεδίο κρατήρων, δίνει τη δυνατότητα για μια εκτίμηση της συνολικής ποσότητας του μεθανίου που διαφεύγει από τους κρατήρες. Η ποσότητα του εκλυόμενου μεθανίου από το πεδίο εκτιμήθηκε τόσο σε συνθήκες συνήθους δραστηριότητας του όσο και σε ενεργοποίηση του μετά από μεγάλα σεισμικά γεγονότα.

Επιπλέον ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσπάθεια εκτίμησης της ποσότητας του διαφεύγοντος μεθανίου από την επιφάνεια της θάλασσας προς την ατμόσφαιρα καθώς ένα μέρος του εκλυόμενου μεθανίου από τους κρατήρες είτε οξειδώνεται εντός της υδάτινης στήλης είτε παραμένει σε διαλυμένη μορφή σε αυτή. Η οξείδωση του μεθανίου είναι μία διεργασία που πραγματοποιείται από μεθανότροφα μικρόβια στην οποία οξειδωτικός παράγοντας είναι το οξυγόνο (Valentine et al., 2001).

A. Εκτίμηση συνολικής ποσότητας εκλυόμενου μεθανίου μετά από σεισμικό γεγονός

Εάν τεθεί η παραδοχή ότι κάθε κρατήρας διαφυγής ρευστών αποτελεί μία δίοδο μακροδιαφυγής μεθανίου προς την υδάτινη στήλη παρόμοια με αυτή της γεώτρησης P9, η οποία βρίσκεται NNA από το πεδίο, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι κάθε κρατήρας σε περίοδο σεισμικής δραστηριότητας συμπεριφέρεται όπως η γεώτρηση και η περιοχή του πυθμένα όπου δεν υπάρχουν κρατήρες όπως η υπόλοιπη παράκτια περιοχή στην οποία δεν εντοπίστηκαν ροές μεθανίου. Μετά το σεισμό του Ιουνίου 2008 καταγράφηκαν τουλάχιστον 14 θέσεις διαφυγών ρευστών τρεις ημέρες μετά το σεισμό, 11 θέσεις 4 ημέρες μετά το σεισμό και 4 θέσεις μετά από 16 ημέρες. Οι διαφυγές αυτές φάνηκαν να εκκινούν από συγκεκριμένες σημειακές θέσεις εντός των κρατήρων όπως έδειξαν τα δεδομένα του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούν να αναπτυχθούν δύο πιθανά σενάρια για την προσφορά μεθανίου από τους κρατήρες, μετά από ένα μεγάλο σεισμικό γεγονός.

1. Οι μακροδιαφυγές είναι σημειακές από συγκεκριμένο σημείο κάθε κρατήρα χωρίς να υπάρχει διαφυγή ρευστού από την υπόλοιπη επιφάνεια του κρατήρα.
2. Πέραν των σημειακών 'μακροδιαφυγών', υπάρχει συνολική μικροδιαφυγή από όλη την επιφάνεια του κρατήρα όπως ακριβώς συμβαίνει στην περιοχή της γεώτρησης P9 όπου υπάρχει μια μακροδιαφυγή από το στόμιο της γεώτρησης και μικροδιαφυγές από το έδαφος περιφερειακά της γεώτρησης.

Για τον υπολογισμό της συνολικής ποσότητας του διαφεύγοντος μεθανίου χρησιμοποιήθηκε ως σημειακή ροή η μέγιστη σημειακή μακροδιαφυγή ($15500 \text{ mg / m}^2 \text{ d}$) που μετρήθηκε στη γεώτρηση P9 και για τον υπολογισμό της μικροδιαφυγής χρησιμοποιήθηκε η μέση ροή ($600 \text{ mg / m}^2 \text{ d}$) στην ευρύτερη περιοχή και περιφερειακά της

γνώτρωσης. Οι ροές που υπολογίστηκαν πολλαπλασιάστηκαν με το χρονικό διάστημα (σε ημέρες, d) κατά το οποίο ήταν ανιχνεύσιμες οι μακροδιαφυγές στις καταγραφές του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης (πίνακας 5.13).

Πίνακας 5.13. Εκτίμηση συνολικής ποσότητας εκλυόμενου μεθανίου μετά από το σεισμό της 8^{ης} Ιουνίου 2008 από το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Κωδικός Κρατήρα	11/6/08	12/6/08	24/6/08	Συνολική Διάρκεια Διαφυγών (d)	Συνολική Ποσότητα από μακροδιαφυγή (mg CH ₄) 1 ^ο σενάριο	Εμβαδόν κρατήρα (m ³)	Συνολική Ποσότητα από μικροδιαφυγές (mg CH ₄)	Συνολική Ποσότητα από μακρο- και μικροδιαφυγές (mg CH ₄) 2 ^ο σενάριο
PP2	1			3	46500	4885	8793000	8839500
PP4	X 3	X 2	1	23	356500	38637	370915200	371294700
PP5		1		4	62000	7712	18508800	18570800
PP7	1			3	46500	17289	31120200	31166700
PP8	1			3	46500	24046	43282800	43329300
PP11	1		1	16	248000	4882	46867200	47115200
PP25	1			3	46500	804	1447200	1493700
PP28		1		4	62000	189	453600	515600
PP37		1		4	62000	2748	6595200	6657200
PP38	1			3	46500	5919	10654200	10700700
PP63		1		4	62000	5269	12645600	12707600
PP64		1		4	62000	2127	5104800	5166800
PP67		1		4	62000	2901	6962400	7024400
PP68	1			3	46500	5486	9874800	9921300
PP69		1		4	62000	1907	4576800	4638800
PP74			1	10	155000	2500	18000000	18155000
PP75	1	1	1	16	248000	2365	22704000	22952000
PP79	1			3	46500	3174	5713200	5759700
PP86		1		4	62000	11378	27307200	27369200
Σύνολο	14	11	4		1829000			653378200

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η συνολική ποσότητα μεθανίου που διέφυγε από τον πυθμένα προς την υδάτινη στήλη μετά από το σεισμό της 8^{ης} Ιουνίου 2008 και για ένα χρονικό διάστημα 16 ημερών, ήταν από **1.83 kg** (1^ο σενάριο) έως **653,4 kg** (2^ο σενάριο). Το δεύτερο σενάριο είναι το πιο πιθανό καθώς κατά την ερευνητική περίοδο 2002-2003 (επιτόπιες μετρήσεις διαλυμένου CH₄) αλλά και κατά την ερευνητική περίοδο 2004 (Υποθαλάσσιο Παρατηρητήριο μακράς διάρκειας) οι κρατήρες διαφυγής ρευστών παρουσίαζαν συνεχείς μικροδιαφυγές μεθανίου, σε περιόδους χωρίς έντονη σεισμική δραστηριότητα. Συνεπώς είναι περισσότερο πιθανό σε μία περίοδο αυξημένης δραστηριότητας λόγω ισχυρού σεισμικού γεγονότος, η ροή του μεθανίου να μην περιορίζεται μόνο στις σημειακές μακροδιαφυγές αλλά να διαφεύγει με μικροδιαφυγές από ολόκληρη την επιφάνεια του κρατήρα.

B. Εκτίμηση συνολικής ποσότητας εκλυόμενου μεθανίου χωρίς σεισμικά γεγονότα

Σε περίοδο «συνήθους» δραστηριότητας του πεδίου κρατήρων του Πατραϊνικού κόλπου συμβαίνουν πολλές μικροδιαφυγές όπως άλλωστε καταγράφηκαν από το υποθαλάσσιο παρατηρητήριο. Εάν τεθεί η παραδοχή ότι οι μικροδιαφυγές είναι συνεχείς και η ροή του μεθανίου είναι ίση με μία μέση τιμή που μετρήθηκε στην παράκτια ζώνη της Πάτρας (τάξεως $100\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{day}$) και δεδομένης της συνολικής επιφάνειας των κρατήρων (405000m^2) τότε προκύπτει ότι η συνολική ετήσια ποσότητα του εκλυόμενου μεθανίου από τον πυθμένα της θάλασσας στην περιοχή του πεδίου είναι 14.8 t/year . Αυτή η ποσότητα του μεθανίου δεν διαφεύγει εξολοκλήρου στην ατμόσφαιρα καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί ένα μέρος του εκλυόμενου μεθανίου από τον πυθμένα του πεδίου των κρατήρων δαπανάται ή/και παραμένει στην υδάτινη στήλη.

Συνεπώς μπορεί να υποστηριχθεί ότι η συνολική ετήσια ποσότητα του εκλυόμενου μεθανίου τόσο από τον πυθμένα στην περιοχή των κρατήρων όσο και από την παράκτια ζώνης της Πάτρας εκτιμάται περίπου σε 19 t/year .

Γ. Εκτίμηση συνολικής ποσότητας διαφεύγοντος μεθανίου από την επιφάνεια της θάλασσας προς την ατμόσφαιρα

Η εκτίμηση της συνολικής ετήσιας ποσότητας του διαφεύγοντος μεθανίου από την επιφάνεια της θάλασσας, στα όρια του πεδίου των κρατήρων, προς την ατμόσφαιρα βασίστηκε αποκλειστικά στις επιτόπιες μετρήσεις του διαλυμένου μεθανίου στην υδάτινη στήλη την ερευνητική περίοδο 2002-2003. Η εκτίμηση που επιχειρήθηκε δεν προέκυψε ως ένα ποσοστό της συνολικής ποσότητας του μεθανίου που εκλύεται από το πεδίο των κρατήρων όπως αυτή εκτιμήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο αλλά στις πραγματικές συγκεντρώσεις διαλυμένου μεθανίου παρά τις σημαντικές αβεβαιότητες που σχετίζονται με ωκεανογραφικούς και μετεωρολογικούς παράγοντες. Στον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι μετρήσεις κατά το έτος 2002, καθώς θεωρούνται οι περισσότερες αξιόπιστες σε απόλυτες τιμές. Οι εργαστηριακές δοκιμές (Etiope and Marinaro, 2003) του αισθητήρα μεθανίου METS για το διάστημα των πρώτων έξι μηνών από τη κατασκευή του έδειξαν πολύ μικρή 'ολίσθηση' (drift) τάσεως εξόδου. Ο υπολογισμός βασίστηκε στην εξίσωση (πίνακας 5.14):

$$F = K_w (C_{\text{CH}_4} - C_{\text{eq}}) \quad (5.2)$$

όπου K_w ο συντελεστής μεταφοράς αερίων που υπολογίστηκε σύμφωνα

- με τις εξισώσεις (Liss and Merlivat, 1986):

$$K_w = 0.17u_{10}(600/Sc)^{2/3}, \quad u_{10} \leq 3.6\text{ms}^{-1}$$

$$K_w = (2.85u_{10} - 9.65)(600/Sc)^{1/2}, \quad 3.6 < u_{10} \leq 13\text{ms}^{-1}$$

$$K_w = (5.9u_{10} - 49.3)(600/Sc)^{1/2}, \quad u_{10} > 13\text{ms}^{-1}$$

u_{10} η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας (χρησιμοποιήθηκε η τιμή ανέμου για την ημέρα και ώρα των μετρήσεων από το σταθμό του Αράξου της ΕΜΥ)

Sc ο αριθμός Schmidt του μεθανίου στις συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και αλατότητας (υπολογίστηκε σύμφωνα με τις εξισώσεις που δίνονται από τον Wanninkof (1992)

- με την εξίσωση (Wanninkof, 1992)

$$K_w = 0.31u_{10}^2 (Sc/660)^{2/3}$$

και C_{eq} η συγκέντρωση κορεσμού του θαλασσινού νερού σε μεθάνιο όπως υπολογίστηκε για τις συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και αλατότητας σύμφωνα με τις εξισώσεις των Wiesenburg and Guinasso (1979).

Πίνακας 5.14. Υπολογισμός ροής μεθανίου από την επιφάνεια της θάλασσας προς την ατμόσφαιρα στην περιοχή του πεδίου των κρατήρων.

Θέση	Ημερομηνία μέτρησης	CH4 (nmol/l)	Ceq (nmol/l)	U ₁₀ (m/sec)	Liss and Merlivat, 1986		Wanninkof, 1992	
					Ροή CH4 (μmol/m ² day)	Ροή CH4 (μg/m ² day)	Ροή CH4 (μmol/m ² day)	Ροή CH4 (μg/m ² day)
PM1	22-Mar-02	192	1.813	2.6	21.2	339.0	118.6	1898.0
PM2	22-Mar-02	118	1.840	3.1	15.0	270.7	107.0	1712.4
PM3	22-Mar-02	83	1.815	3.6	12.5	225.2	97.2	1555.7
PM4	22-Mar-02	72	1.801	4.1	9.2	165.3	106.9	1710.7
REF	24-Mar-02	2	1.832	2.1	0.0	0.3	0.1	1.1
PM5	24-Mar-02	2	1.837	2.6	0.0	0.3	0.1	1.7
PM1	24-Mar-02	7	1.837	2.6	0.6	10.1	3.3	53.2
PM6	24-Mar-02	4	1.834	3.1	0.3	5.1	2.0	31.6
PM4	24-Mar-02	4	1.833	2.6	0.2	4.3	1.4	22.2
PM8	25-Mar-02	3	1.847	2.1	0.1	1.8	0.5	7.9
PM7	25-Mar-02	1	1.843	2.1	-	-	-	-
PM2	25-Mar-02	9	1.838	2.6	0.8	14.0	4.6	74.0
PM4	25-Mar-02	40	1.839	2.6	4.2	74.7	24.7	394.7
PM3	25-Mar-02	3	1.841	2.1	0.1	1.8	0.5	7.8
PM1	25-Mar-02	2	1.839	2.1	0.0	0.3	0.1	1.1
PM3	19-May-02	2	1.636	2.1	0.0	0.7	0.1	1.9
PM4	19-May-02	4	1.630	2.6	0.3	5.6	1.1	18.4
PM2	19-May-02	6	1.627	2.1	0.5	8.4	1.4	22.0
PM1	19-May-02	10	1.627	2.6	1.1	19.9	4.0	64.6
PM6	19-May-02	22	1.624	2.1	2.2	39.3	6.4	102.2
PM4	4-Sep-02	29	1.570	2.6	3.8	69.2	12.1	194.0
PM3	4-Sep-02	58	1.564	2.6	8.0	143.3	24.7	395.1
PM2	4-Sep-02	38	1.548	3.1	6.2	112.2	22.1	354.2
PM1	4-Sep-02	34	1.543	2.6	4.7	84.2	13.8	220.1
PM7	4-Sep-02	31	1.539	2.1	3.4	61.9	8.1	129.7
PM4	4-Sep-02	26	1.547	2.1	2.8	51.0	6.8	108.9
PM9	5-Sep-02	90	1.541	2.1	10.3	185.6	24.4	390.5
PM10	5-Sep-02	93	1.572	2.1	10.3	185.7	26.5	423.8
PM12	5-Sep-02	53	1.538	2.1	6.0	108.4	14.1	225.9
PM13	5-Sep-02	47	1.534	2.1	5.3	96.2	12.4	198.2
PM14	5-Sep-02	31	1.526	2.1	3.5	63.1	7.9	126.4

Θέση	Ημερομηνία μέτρησης	CH ₄ (nmol/l)	C _{eq} (nmol/l)	U ₁₀ (m/sec)	Liss and Merlivat, 1986		Wanninkof, 1992	
					Ροή CH ₄ (μmol/m ² day)	Ροή CH ₄ (μg/m ² day)	Ροή CH ₄ (μmol/m ² day)	Ροή CH ₄ (μg/m ² day)
PM15	5-Sep-02	41	1.527	2.1	4.7	84.3	10.6	169.8
PM4	5-Sep-02	28	1.517	2.1	3.2	57.0	7.0	112.5
PM4	2-Oct-02	99	1.555	2.1	11.2	201.3	27.5	440.4
PM4	24-Nov-02	107	1.702	2.1	10.5	189.1	36.7	587.2
PM1	25-Nov-02	281	1.720	2.6	34.0	611.6	152.6	2441.7
PM2	25-Nov-02	277	1.713	2.6	33.7	606.6	149.1	2385.0
PM16	25-Nov-02	230	1.714	2.1	22.5	405.4	80.9	1294.6
Μέση τιμή έτους						129		403

Με την προϋπόθεση ότι το μεθάνιο που διαφεύγει από την επιφάνεια της θάλασσας προς την ατμόσφαιρα περιορίζεται αποκλειστικά στην έκταση που καταλαμβάνει το πεδίο (2km²) κρατήρων και λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω μέσες τιμές ροής (129 και 403 μg/m²day) προκύπτει ότι η ετήσια διαφυγή μεθανίου προς την ατμόσφαιρα είναι:

- **0.09t** σύμφωνα με την εξίσωση των Liss and Merlivat (1986), και
- **0.35t** σύμφωνα με την εξίσωση των Wanninkof (1992).

Οι Zhang et al., 2008, χρησιμοποιώντας και τους δύο τρόπους υπολογισμού της ροής μεθανίου συμπέραναν ότι η εκτίμηση μέσω των εξισώσεων Liss and Merlivat (1986) υποεκτιμά την πραγματική ροή ενώ ο υπολογισμός σύμφωνα με την εξίσωση Wanninkof (1992) είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Ο υπολογισμός της ετήσιας ροής μεθανίου που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο υποεκτιμά την πραγματική ροή μεθανίου καθώς:

- Η ροή υπολογίστηκε μόνο για την έκταση που καταλαμβάνει το πεδίο κρατήρων. Το μεθάνιο όμως που εισέρχεται στην υδάτινη στήλη από τον πυθμένα διαχέεται στην υδάτινη στήλη σε πολύ μεγαλύτερη έκταση από αυτή που καταλαμβάνει το πεδίο, η οποία εξαρτάται από τους ωκεανογραφικούς παράγοντες της περιοχής. Για να υπολογιστεί η πραγματική ροή χρειάζονται συστηματικές μετρήσεις σε πολύ μεγαλύτερη έκταση από αυτή του πεδίου.
- Στον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε η μέση ταχύτητα ανέμου του έτους 2002 από το σταθμό του Αράξου. Ο συντελεστής K_w είναι ανάλογος του τετραγώνου της ταχύτητας ανέμου, συνεπώς σε περιόδους ισχυρών ανέμων η κίνηση του μεθανίου προς την ατμόσφαιρα θα είναι πολύ μεγάλη. Επίσης οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του διαλυμένου μεθανίου πραγματοποιήθηκαν σε ημέρες με χαμηλή ένταση ανέμου, για πρακτικούς λόγους εκτέλεσης των ωκεανογραφικών πλόνων, με αποτέλεσμα ο υπολογισμός να υποεκτιμά την πραγματική ροή. Για παράδειγμα εάν θεωρήσουμε ότι η μέση ταχύτητα ανέμου είναι 5m/sec τότε προκύπτει προσφορά μεθανίου **1t/year** σύμφωνα με τον

υπολογισμό Liss and Merlivat και **1.3t/year** σύμφωνα με τον υπολογισμό Wanninkhof, ενώ για ταχύτητα 10m/sec προκύπτει **4 t/year** και **5 t/year** αντίστοιχα.

- Σύμφωνα με τις εξισώσεις διάχυσης του μεθανίου μεταξύ υδάτινης στήλης και ατμόσφαιρας, υπολογίζεται μόνο η ροή μεθανίου σε διαλυμένη μορφή στο θαλασσινό νερό και όχι η πιθανή ροή μεθανίου που βρίσκεται με τη μορφή φυσαλίδων. Οι Kitidis et al. (2006) που υπολόγισαν τη ροή μεθανίου με εξισώσεις διάχυσης στο Rias του Vigo στην Ισπανία, βρήκαν τιμές 100 φορές μικρότερες σε σχέση με τον υπολογισμό των Garcia-Gil et al. (2002) που βασίστηκε στην εκτίμηση της πυκνότητας των φυσαλίδων με γεωφυσικές μεθόδους.

Για να πραγματοποιηθεί ασφαλής εκτίμηση της ροής μεθανίου από τον πυθμένα προς την υδάτινη στήλη και στη συνέχεια προς την ατμόσφαιρα απαιτούνται:

- Μέτρηση της ροής ρευστών από τουλάχιστον ένα κρατήρα. Η μέτρηση μπορεί να γίνει με την τοποθέτηση ειδικών πυραμιδικών κατασκευών μέτρησης ροής που τοποθετούνται στον πυθμένα (Boles et al., 2001), με ανάστροφα χωνιά (inversed funnels) και συλλογή δειγμάτων ρευστού ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (Dimitrov, 2002) ή με σύγχρονες οπτικές μεθόδους (Karpen et al., 2004).
- Συλλογή και χημική ανάλυση νερού από την γύρω περιοχή κοντά στον πυθμένα και κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας.

5.6 Επιμέρους Συμπεράσματα

Το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα του κόλπου, στην παράκτια ζώνη του νότιου τμήματος της πόλης της Πάτρας σε απόσταση μόλις 250m από την ακτή. Το πεδίο μελετήθηκε με διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις (επιτόπιες μετρήσεις και μακροχρόνια παρακολούθηση) και διαφορετικές μεθόδους (γεωφυσικές και γεωχημικές) με στόχο αρχικά την λεπτομερή αποτύπωση του και στη συνέχεια την αξιόπιστη καταγραφή της δραστηριότητάς του. Το πεδίο αποτελείται από εννήντα δύο (92) κρατήρες διαφυγής ρευστών και έχει σχηματιστεί μεταξύ των ισοβαθών 15 και 50 μέτρων, σε Ολοκαινικές ιλουύχες αποθέσεις που υπέρκεινται Πλειστοκαινικών ιζημάτων. Το βόρειο άκρο του πεδίου περιορίζεται από ένα κανονικό ρήγμα διεύθυνσης ΔΝΔ-ΑΒΑ, το οποίο αποτελεί την θαλάσσια συνέχεια του ρήγματος της Αγίας Τριάδας και στην επιφανειακή έκφραση του οποίου σχηματίζεται μία «αλυσίδα» κρατήρων. Μικρότερα συνιζηματογενή ρήγματα διεύθυνσης ΔΒΔ-ΑΝΑ και ΒΒΑ-ΝΝΔ τα οποία καταγράφηκαν εντός των ορίων του πεδίου φαίνεται να επηρεάζουν την γεωγραφική κατανομή των κρατήρων.

Το πεδίο αποτελείται από τρεις τύπους κρατήρων με βάση το διάμετρο και το σχετικό τους βάθος, κυρίως κοινούς (46) και σύνθετους (32) κρατήρες και μικρό αριθμό αρχικών (14) κρατήρων (Hovland and Judd, 1988). Μεγάλο μέρος των κοινών και σύνθετων κρατήρων παρουσιάζουν ελλειπτικό σχήμα σε κάτοψη, με το μεγάλο άξονα της έλλειψης των μεγαλύτερων κοινών κρατήρων να είναι κάθετος προς τις ισοβαθείς και να ακολουθεί διεύθυνση παράλληλη με τις ρηξιγενείς δομές που καταγράφηκαν. Παρόμοια, ο μέγιστος άξονας των σύνθετων ελλειψοειδών κρατήρων ακολουθεί τη διεύθυνση των ρηγμάτων, γεγονός το οποίο δείχνει ότι οι κρατήρες συνενώνονται κατά μήκος των ρηξιγενών δομών. Επίσης καταγράφηκαν δύο γραμμικές διευθετήσεις κρατήρων με διεύθυνση παράλληλη με τα ρήγματα της περιοχής. Ελλειψοειδείς κρατήρες σχηματίζονται είτε από τη δράση ισχυρών πυθμαίων ρευμάτων (Boer et al., 1998), είτε όταν σχηματίζονται κατά μήκος ρηγμάτων (Judd and Hovland, 2007). Στον Πατραϊκό κόλπο τα πυθμαία ρεύματα είναι ασθενή με διεύθυνση περίπου παράλληλη με τις ισοβαθείς (Παπαθεοδώρου και Κοντόπουλος, 1998) στοιχείο που ενισχύει την άποψη ότι οι κρατήρες αναπτύσσονται και συνενώνονται κατά μήκος των ρηγμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση τα ρευστά διαφεύγουν κατά μήκος των ρηγμάτων που συνιστούν ζώνες μειωμένης συνοχής των συγχρόνων ιζημάτων του κόλπου, όπως έχει καταγραφεί στη Βόρεια Θάλασσα (Hovland et al., 1996; Judd and Hovland 2007), στη Βαλτική Θάλασσα. (Soderberg and Floden, 1989) και στη δυτική Μεσόγειο Θάλασσα (Acosta et al., 2001), στον Βισκαϊκό κόλπο (Inglesias et al., 2009).

Το πεδίο έχει παρουσιάσει δύο γεγονότα έντονης δραστηριότητας μετά από δύο ισχυρούς σεισμούς (14/07/2003, 08/06/2008) που έπληξαν την ευρύτερη περιοχή. Η γεωγραφική κατανομή των κρατήρων που ενεργοποιήθηκαν μετά τους δύο σεισμούς παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Στον σεισμό του 1993 ενεργοποιήθηκαν κρατήρες που βρίσκονται στο βόρειο τομέα του πεδίου κοντά στο ρήγμα της Αγίας Τριάδας, ενώ στο σεισμό του 2008 δεν υπήρχε γεωγραφική τάση στους κρατήρες που ενεργοποιήθηκαν (εικόνα 5.82).

Εικόνα 5.82. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών όπου έχουν τοποθετηθεί οι διαφυγές ρευστών μετά από το σεισμό της 14^{ης} Ιουλίου 1993 (μπλε γραμμές) και μετά το σεισμό της 8^{ης} Ιουνίου 2008 (κόκκινες γραμμές) καθώς και η θέση των ρηγμάτων P.AT: ρήγμα Αγίας Τριάδος).

Επίσης οι διαφυγές ρευστών φαίνεται να ήταν μεγαλύτερες μετά από το σεισμό του 1993, σύμφωνα με τις καταγραφές του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης. Δέκα ημέρες μετά από τον κύριο σεισμό καταγράφηκαν 'νέφη' υψηλής ανακλαστικότητας πάνω από ορισμένους κρατήρες, ενώ αντίθετα μετά από το σεισμό του 2008, παρόλο που η καταγραφή πραγματοποιήθηκε τέσσερις ημέρες μετά το κύριο σεισμικό γεγονός καταγράφηκαν μόνο στηλοειδείς ανακλάσεις (gas flares) στην υδάτινη στήλη. Η διαφορά στην ενεργοποίηση του πεδίου πιθανόν να οφείλεται στο διαφορετικό μηχανισμό γένεσης του σεισμού, στο διαφορετικό επίκεντρο και στη διαφορετική διασπορά των μετασεισμών. Ο σεισμός του 1993 προκλήθηκε από κανονικό ρήγμα διεύθυνσης BBA-NNΔ το οποίο βρίσκεται πλησίον του πεδίου ενώ η μετασεισμική του

ακολουθία πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του πεδίου με τις μεγαλύτερες καταστροφές να προκαλούνται κατά μήκος του ρήγματος της Αγίας Τριάδας που ελέγχει το πεδίο. Ο σεισμός του 2008, παρόλο που είχε μεγαλύτερο μέγεθος, προκλήθηκε από ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης σε απόσταση 100km από το πεδίο.

Ένα επιπλέον γεγονός που διαφοροποιεί την ενεργοποίηση των κρατήρων κατά τη διάρκεια των δύο σεισμικών γεγονότων είναι η θερμοκρασία των ρευστών που διέφυγαν από αυτούς. Τρεις απότομες αυξήσεις της θερμοκρασίας καταγράφηκαν πριν από το σεισμό του 1993, συγκεκριμένα διαπιστώθηκαν διαφυγές ρευστών με θερμοκρασίες 19.3°C, 23°C και 22°C οι οποίες ήταν κατά 2.5°C, 6.2°C και 5°C υψηλότερες από τη θερμοκρασία της υδάτινης στήλης αντίστοιχα. Αντίθετα η ενεργοποίηση των κρατήρων μετά το σεισμό του 2008 δεν φαίνεται να συνδέεται με διαφυγές ρευστών υψηλότερης θερμοκρασίας από αυτή της περιβάλλουσας υδάτινης στήλης. Επιπλέον η παρακολούθηση των διαφυγών του κρατήρα PP4 με το υποθαλάσσιο παρατηρητήριο έδειξε ότι οι διαφυγές μεθανίου συνδέονται με μικρή πτώση της θερμοκρασίας (έως 2°C). Οι παραπάνω, σε πρώτη προσέγγιση, αντικρουόμενες διαπιστώσεις είναι πιθανόν να δείχνουν δύο διαφορετικές διεργασίες μετανάστευσης και διαφυγής των ρευστών προς την υδάτινη στήλη. Κατά τη διάρκεια του σεισμού του 1993 τα αυξημένης θερμοκρασίας ρευστά είναι πιθανόν να προέρχονται από μεγαλύτερα βάθη και να μετανάστευσαν κατά μήκος της ρηξιγενούς επιφάνειας που ενεργοποιήθηκε από το σεισμό. Η γεωθερμική βαθμίδα της ευρύτερης περιοχής (1.5-2°C/100m – Cornet et al., 2004) επιτρέπει την ανάπτυξη θερμοκρασιών 29-34°C σε βάθη 1000m. Αντίθετα, οι διαφυγές των ρευστών που πυροδοτήθηκαν από το σεισμό του 2008 πιθανώς να προέρχονται από πολύ μικρά βάθη (15-20m) και να προκλήθηκαν από την αναδιάταξη των κόκκινων των ιζημάτων. Σε αυτή την άποψη συνηγορεί το γεγονός ότι το επίκεντρο του σεισμού ήταν σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση (περίπου 100km) έναντι αυτού του σεισμού του 1993.

Η συστηματική ηχοβολιστική παρακολούθηση της δραστηριότητας του πεδίου μετά από τους δύο ισχυρούς σεισμούς έδειξε ότι σημαντικές διαφυγές ρευστών λαμβάνουν χώρα για ένα χρονικό διάστημα από δέκαεξι (16) έως τριάντα (30) ημέρες μετά το σεισμικό γεγονός. Αυτό το χρονικό διάστημα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σεισμού.....

Σε περιόδους ασθενούς ή απουσίας σεισμικότητας παρατηρούνται μικρές διαφυγές ρευστών όπως φάνηκε από τις αυξημένες τιμές διαλυμένου μεθανίου τόσο κατά τη διάρκεια μετρήσεων μικρής διάρκειας, όσο και κατά την εξαμηνιαία συνεχή παρακολούθηση των φυσικοχημικών παραμέτρων της υδάτινης στήλης στον σύνθετο κρατήρα PP4, όπου καταγράφηκαν περισσότερες από 60 μικροδιαφυγές που διαχωρίζονται σε τέσσερις τύπους ανάλογα με τις μεταβολές των φυσικών παραμέτρων στην υδάτινη στήλη:

- Τύπος 1: χαρακτηρίζεται από αύξηση του διαλυμένου μεθανίου χωρίς μεταβολή στις φυσικές ιδιότητες,
- Τύπος 2: η αύξηση του διαλυμένου μεθανίου συνοδεύεται με απότομη πτώση της θερμοκρασίας και της πίεσης,
- Τύπος 3: η αύξηση του διαλυμένου μεθανίου συνοδεύεται με απότομη πτώση αποκλειστικά της θερμοκρασίας και
- Τύπος 4: η αύξηση του διαλυμένου μεθανίου συνοδεύεται με απότομη αύξηση της θερμοκρασίας.

Οι αυξήσεις διαλυμένου μεθανίου δημιουργούν κάποιες ακολουθίες γεγονότων οι οποίες συνήθως αρχίζουν και τελειώνουν με έντονες μεταβολές στις φυσικές ιδιότητες του θαλασσινού νερού. Οι εντονότερες διαφυγές χαρακτηρίζονται από απότομη πτώση της θερμοκρασίας και της πίεσης του θαλασσινού νερού (Τύπος 2). Οι μικροδιαφυγές αυτές συνήθως ακολουθούν απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης και πιθανόν να οφείλονται:

- Σε ενδογενείς παράγοντες που οφείλονται στην σταδιακή αύξηση της πίεσης των πόρων των ιζημάτων λόγω της συσσώρευσης αερίων υδρογονανθράκων. Απότομη διαφυγή αερίων, θα προκαλέσει μείωση της πίεσης στην υδάτινη στήλη, ενώ η πτώση της θερμοκρασίας πιθανόν να οφείλεται στην διαφυγή ψυχρότερου νερού μαζί με τα αέρια. Το ψυχρότερο νερό βρίσκεται στους πόρους των ιζημάτων μαζί με τα αέρια και δεν μπορεί να προέρχεται από την εκφόρτιση του υδροφόρου ορίζοντα καθώς δεν παρατηρήθηκε η πτώση της θερμοκρασίας να συνοδεύεται από πτώση στην αλατότητα. Η πτώση της θερμοκρασίας μπορεί όμως να προκαλείται από ψύξη του νερού λόγω στροβιλισμού όπως έχει καταγραφεί από τους Washburn et al. (2001) σε διαφυγές φουσαλίδων στην Καλιφόρνια.
- Σε ωκεανογραφικούς παράγοντες που σχετίζονται με την ύπαρξη ισχυρών ρευμάτων εντός των κρατήρων διαφυγής ρευστών. Ισχυρά ρεύματα μπορούν να προκαλέσουν απότομη πτώση της πίεσης λόγω του φαινομένου Bernouli. Σύμφωνα με το νόμο του Bernouli κατά μήκος μιας ροής το άθροισμα της εξωτερικής πίεσης, της δυναμικής πίεσης και της υδροστατικής πίεσης είναι σταθερό. Συνεπώς αύξηση της ταχύτητας των ρευμάτων μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της δυναμικής πίεσης με αποτέλεσμα μείωση της υδροστατικής πίεσης. Απότομη όμως μείωση της υδροστατικής πίεσης μπορεί στα λεπτόκοικα ιζήματα να προκαλέσει αύξηση της μερικής πίεσης των αερίων η οποία με τη σειρά της μπορεί να προκαλέσει θραύση των ιζημάτων με ταυτόχρονη απελευθέρωση αερίου. Τα πυθμαία ρεύματα στην περιοχή του πεδίου είναι ασθενή σύμφωνα με ιζηματολογικά κριτήρια (Παπαθεοδώρου και Κοντόπουλος, 1988), αλλά και όπως φαίνεται από τα μορφολογικά

χαρακτηριστικά των κρατήρων, δεν είναι όμως γνωστή η ταχύτητα τους εντός των κρατήρων. Επίσης φαινόμενα αναβλυσμάτων (upwelling) είναι δυνατόν να συμβούν μόνο στο βόρειο τμήμα του κόλπου και όχι στο νότιο όπου βρίσκεται το πεδίο (Lascaratos et al., 1999). Η απουσία όμως ρευματολογικών δεδομένων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν μπορεί να αποκλείσει ότι τα πυθμαία ρεύματα, που παγιδεύονται μέσα στους κρατήρες δεν αυξάνουν την ταχύτητα τους λόγω τύρβης (Manley et al., 2004). Σύμφωνα με τους Hammer et al. (2009) τα πυθμαία ρεύματα μπορεί να εκτρέπονται από ένα κρατήρα διαφυγής ρευστών και να δημιουργείται μία θετική κατακόρυφη συνιστώσα (upwelling) η οποία δεν είναι απαραίτητο να συνδέεται με τύρβη. Αυτό το φαινόμενο δεν είναι ικανό να σχηματίσει ένα κρατήρα αλλά μπορεί να εξηγήσει τη μείωση του ρυθμού ιζηματογένεσης εντός του κρατήρα ακόμα και σε ανενεργούς κρατήρες. Η απουσία του οργανικού υλικού στους πυρήνες ιζήματος που συλλέχθηκαν εντός των κρατήρων σε σχέση με τα ιζήματα εκτός κρατήρων (Ravasopoulos et al., 2002) μπορεί να εξηγηθεί από το παραπάνω μοντέλο.

Μικρότερες αυξήσεις στη συγκέντρωση του μεθανίου παρατηρήθηκαν επίσης και σε περιόδους όπου οι φυσικές παράμετροι στην υδάτινη στήλη δεν παρουσίασαν αντίστοιχα μεταβολές. Η προσθήκη μεθανίου στην υδάτινη στήλη σε αυτές τις περιπτώσεις πιθανόν να οφείλονται σε μικρής ποσότητας μικροδιαφυγές μεθανίου από τον πυθμένα οι οποίες δεν είναι ικανές να προκαλέσουν μεταβολές στις φυσικές παραμέτρους. Επίσης κάποιες από αυτές τις μικροδιαφυγές φαίνεται να πυροδοτήθηκαν από μικροσεισμούς.

Η ενεργότητα του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών πιστοποιείται και από τις πολύ μεγάλες κλίσεις των πρανών των κρατήρων που φτάνουν έως και τις 70°. Οι Judd and Hovland (2007) αναφέρουν πως η κλίση των τοιχωμάτων των κρατήρων του κόλπου του Maine (>30°) (Gontz et al., 2001) αποτελεί ένδειξη ότι το πεδίο κρατήρων είναι ενεργό, καθώς τόσο μεγάλες κλίσεις είναι αδύνατο να διατηρηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται και από τις αλλαγές της μορφολογίας των κρατήρων λόγω κατάρρευσης των πρανών σε διάστημα 2 χρόνων (Gontz et al., 2001). Στον Πατραϊκό κόλπο διαπιστώθηκε ότι σε διάστημα ενός έτους, διαπιστώθηκαν αλλαγές στην ανακλαστικότητα του πυθμένα και μικρές μεταβολές στη μορφολογία σε τουλάχιστον ένα κρατήρα.

Τα ρευστά που διαφεύγουν από του κρατήρες διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου είναι αέριοι υδρογονάνθρακες με ή χωρίς νερό των πόρων των ιζημάτων. Οι αέριοι υδρογονάνθρακες είναι επί το πλείστον μεθάνιο μικροβιακής προελεύσεως, όπως φάνηκε από την ανάλυση δειγμάτων αέρα και νερού από μία γεώτρηση πλησίον του πεδίου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου παρουσιάζει μία σχεδόν συνεχή μικροδραστηριότητα η οποία διακόπτεται από παροξυσμικά γεγονότα μεγάλων διαφυγών ρευστών που σχετίζονται με μεγάλους σεισμούς.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις ροής μεθανίου που πραγματοποιήθηκαν στην παράκτια ζώνη που βρίσκεται κοντά στο πεδίο κρατήρων βρέθηκαν τρεις περιοχές με διαφυγές μεθανίου προς την ατμόσφαιρα. Η πρώτη βρίσκεται NNA του πεδίου και βρίσκεται γύρω από μία γεώτρηση. Η γεώτρηση φαίνεται να δημιουργεί μία δίοδο ανόδου του μεθανίου προς την επιφάνεια. Δύο άλλες περιοχές με μικρότερη ροή εντοπίστηκαν στο πλησιέστερο σημείο ακτής προς τον κρατήρα PP4 και στην επιφανειακή έκφραση του ρήγματος της Αγ. Τριάδας. Η συνολική προσφορά μεθανίου από την παράκτια ζώνη προς την ατμόσφαιρα εκτιμήθηκε στους 4.32 τόνους μεθανίου το χρόνο. Επίσης πραγματοποιήθηκαν εκτιμήσεις της ποσότητας του εκλυόμενου μεθανίου από το πεδίο κρατήρων σύμφωνα με τις μετρήσεις ροής μεθανίου στην παράκτια ζώνη, και υπολογίστηκε ότι η ποσότητα μεθανίου που εκλύεται από το πεδίο προς τη υδάτινη στήλη είναι της τάξης των 15 τόνων μεθανίου το χρόνο. Οι εκτιμήσεις αυτές δείχνουν ότι η ποσότητα μεθανίου που εκλύεται από την παράκτια ζώνη της Πάτρας, τόσο από το χερσαίο όσο και από το υποθαλάσσιο τμήμα της, είναι συγκρίσιμη με αυτές που έχουν υπολογιστεί στην Ακτή Kattegat στη Δανία, στην Κεντρική Ιταλία και στον Όρμο Torry στη Σκωτία, αλλά υπολείπεται κατά πολύ από τις εκτιμήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για την υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου, για τη δυτική ακτή της Ισπανίας και για τη λεκάνη της Μαύρης Θάλασσας, οι οποίες είναι περιοχές μεγάλης έκτασης (πίνακας 5.15).

Επίσης υπολογίστηκε η ποσότητα μεθανίου που διαφεύγει από την υδάτινη στήλη προς την ατμόσφαιρα μόνο από την επιφάνεια του πεδίου κρατήρων σύμφωνα με τα μοντέλα Liss and Merlivat (1986), και Wanninkhof (1992) και βρέθηκε από 0.09 έως 0.35 t/year. Τέλος σύμφωνα με την ενεργότητα του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών μετά από το σεισμό της 8^{ης}/6/2008, εκτιμήθηκε ότι διέφυγαν περίπου 500 κιλά μεθανίου σε 16 ημέρες, καθώς είχε καταγραφεί με ηχοβολιστή πλευρικής ότι η ενεργοποίηση του πεδίου διήρκησε τουλάχιστον αυτό το χρονικό διάστημα. Παρότι η εκτίμηση της διαφυγής του μεθανίου από την υδάτινη στήλη προς την ατμόσφαιρα εμπεριέχει πολλές αβεβαιότητες που σχετίζονται με ωκεανογραφικούς και μετεωρολογικούς παράγοντες μπορεί να υποστηριχθεί ότι η παράκτια ζώνη της Πάτρας, τόσο το χερσαίο όσο και το θαλάσσιο περιβάλλον της, προσφέρει τουλάχιστον 4.7tn μεθανίου ετησίως στην ατμόσφαιρα.(πίνακας 5.15). Με την παραδοχή ότι όλο το μεθάνιο που εκλύεται από το πεδίο κρατήρων φτάνει στην ατμόσφαιρα υπολογίζεται ότι η μέγιστη προσφορά μεθανίου από την παράκτια ζώνη της Πάτρας μπορεί να φτάσει τους 19 τόνους ετησίως (πίνακας 5.15).

Πίνακας 5.15. Προσφορά μεθανίου στην ατμόσφαιρα από περιοχές διαφυγών.

Περιοχή	Έκταση (km ²)	Διαφυγή Μεθανίου (σε t/year)	Αναφορά
Ακτή Kattegat Δανία	25000	50	Dando et al., 2004; Etiope, 2009
Υφαλοκρηπίδα H.B.	600000	120000-3500000	Judd et al., 1997
Rias Δυτική Ισπανία	751	11400	Garcia-Gil (2003)
Υφαλοκρηπίδα Βουλγαρίας στη Μαύρη Θάλασσα	131700	356000-1614000	Dimitrov (2002)
Λεκάνη Μαύρης Θάλασσας		50000-210000	Kessler et al., 2006
Αζερμπαϊτζάν (5 λασπούχα ηφαιστεια)	5.9	1392	Etiope et al., 2004
Κεντρική Ιταλία (5 λασπούχα ηφαιστεια)	0.042	10.2	Etiope et al., 2007
Όρμος Torry Σκωτία	0.0025	1	Judd et al., 2002
Πεδίο Κ.Δ.Ρ. και παράκτια ζώνη Πάτρας	2.1	4.7-19	Παρούσα εργασία

Κεφάλαιο 6° Δυτικός Κορινθιακός Κόλπος – Όρμος Ελαιώνα

6 ΔΥΤΙΚΟΣ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ – ΟΡΜΟΣ ΕΛΑΙΩΝΑ

6.1 Το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα

Το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών εντοπίσθηκε στον Όρμο του Ελαιώνα μεταξύ των εκβολών των ποταμών Κερυνίτη και Βουραϊκού (Soter, 1999; Christodoulou et al., 2003) (εικόνα 6.1) και πιθανώς να σχετίζεται με την ύπαρξη του ρήγματος μετασχηματισμού Κερυνίτη καθώς βρίσκεται στην πιθανή υποθαλάσσια συνέχεια του. Σχηματίζεται στην εσωτερική υφαλοκρηπίδα, καλύπτει έκταση 0.7km^2 και αποτελείται από 23 κρατήρες που βρίσκονται μεταξύ των ισοβαθών των 10 και 30 μέτρων (εικόνα 6.1), σε απόσταση 250 – 600 μέτρα από την ακτογραμμή.

Εικόνα 6.1. Τοπογραφικός χάρτης ευρύτερης περιοχής του Όρμου του Ελαιώνα στον οποίο σημειώνεται η θέση του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών και η θέση του ρήματος Κερυνίτη και βυθομετρικός χάρτης της περιοχής του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών.

6.1.1 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Οι κρατήρες σύμφωνα με τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά, όπως αυτά προέκυψαν από τις ηχογραφίες του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης (εικόνα 6.2), μπορούν να διακριθούν σε τρεις κύριες μορφολογικές κλάσεις:: τους αρχικούς, τους κοινούς και τους σύνθετους, (πίνακας 6.1) (εικόνα 6.3, 6.4). Οι κλάσεις αυτές είναι όμοιες με αυτές του πεδίου του Πατραϊκού κόλπου. Δύο περιοχές κρατήρων μπορεί να χαρακτηριστούν ως «συστάδες» κρατήρων καθώς συνίστανται από αρχικούς κρατήρες οι οποίοι δεν έχουν συνενωθεί αλλά βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους με αποτέλεσμα η διάκριση τους να μην είναι δυνατή. Τέτοιου τύπου σχηματισμοί δεν είχαν εντοπιστεί στο πεδίο του Πατραϊκού κόλπου. Οι περισσότεροι κοινοί και σύνθετοι κρατήρες έχουν ελλειψοειδές σχήμα. Οι αρχικοί κρατήρες βρίσκονται πιο απομακρυσμένοι από την ακτή, ενώ τέσσερις κρατήρες (3 σύνθετοι και 1 κοινός) σχηματίζουν μία αλυσίδα παράλληλη με τις ισοβαθείς. Το βάθος των αρχικών κρατήρων δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί λόγω της απουσίας πυκνών βυθομετρικών δεδομένων, αλλά πραγματοποιήθηκε εκτίμηση βάθους από το εύρος της ακουστικής σιιάς στις ηχογραφίες Τα πρανή των κοινών και σύνθετων κρατήρων διαφυγών ρευστών χαρακτηρίζονται από μεγάλες κλίσεις πρανών έως και 35° με ακανόνιστη μικρομορφολογία, ενώ ο πυθμένας τους είναι σχετικά επίπεδος.

Εικόνα 6.2. Μωσαικό ηχογραφιών στο οποίο αποτυπώνεται το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών

Πίνακας 6.1. Τα κύρια μορφομετρικά χαρακτηριστικά των κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα (*εκτίμηση σχετικού βάθους, **βάθος ευρύτερης περιοχής).

Κωδικός	X (UTM)	Y (UTM)	Περίμετρος (m)	Εμβαδόν (m ²)	Σχ.Βάθος (m)	Βάθος (m)	Μορφολογικός Χαρακτηρισμός
EP1	602918	4229060	252	4923	8	23	Κοινός
EP2	602632	4229361	392	7733	10	27	Σύνθετος
EP3	602493	4229657	249	4591	8	29	Κοινός
EP4	602970	4229188	143	1337	12	31	Σύνθετος
EP5	602756	4229278	223	3756	11	29	Κοινός
EP6	602839	4229267	241	4460	11	30	Σύνθετος
EP7	602666	4229491	80	476	4*	22**	Αρχικός
EP8	603171	4229445	94	685	4	30	Αρχικός
EP9	602534	4229520	37	102	5*	18**	Αρχικός
EP10	603081	4229393	33	81	5*	18**	Αρχικός
EP11	602667	4229749	37	95	1*	27**	Αρχικός
EP12	602658	4229769	43	135	2*	27**	Αρχικός
EP13	602624	4229845	26	46	4*	28**	Αρχικός
EP14	602588	4229861	30	66	4*	28**	Αρχικός
EP15	602349	4230191	53	215	5*	30**	Αρχικός
EP16	603121	4229451	19	27	1*	26**	Αρχικός

Κωδικός	X (UTM)	Y (UTM)	Περίμετρος (m)	Εμβαδόν (m ²)	Σχ.Βάθος (m)	Βάθος (m)	Μορφολογικός Χαρακτηρισμός
EP17	602991	4229281	27	56	5*	22**	Αρχικός
EP18	602985	4229276	17	23	3*	23**	Αρχικός
EP19	602982	4229259	15	19	1*	20**	Αρχικός
EP20	603028	4229124	160	1959	3*	17**	Συστάδα Αρχικών
EP21	602578	4229678	109	695	3	27	Αρχικός
EP22	602386	4229687	100	587	2*	20**	Συστάδα Αρχικών
EP23	602157	4229907	78	455	3*	22**	Αρχικός

Εικόνα 6.3.
Βυθομετρικός
χάρτης στον
οποίο έχει
τοποθετηθεί η
θέση και ο
κωδικός των
κρατήρων
διαφυγής ρευστών
του Όρμου του
Ελαιώνα.

Εικόνα 6.4. Η μορφολογική διάκριση των κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα.

Η στατιστική ανάλυση των μορφομετρικών χαρακτηριστικών των κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα έδειξε ότι οι κρατήρες εντοπίζονται κυρίως μεταξύ των ισοβαθών των 21-30 μέτρων (εικόνα 6.5), περισσότεροι από τους μισούς κρατήρες έχουν σχετικό βάθος 0-6 μέτρα (εικόνα 6.6), το μεγαλύτερο ποσοστό έχουν μικρή επιφάνεια ($0-500\text{m}^2$), ενώ μία ομάδα τεσσάρων κρατήρων έχει επιφάνεια $3500-5000\text{m}^2$ (εικόνα 6.7). Χαρακτηριστική είναι η απουσία κρατήρων με επιφάνεια $2000-3500\text{m}^2$. Η περίμετρος των περισσότερων κρατήρων είναι μικρότερη από 100 μέτρα, ενώ έξι κρατήρες έχουν περίμετρο από 100-300 μέτρα (εικόνα 6.8). Ο διαχωρισμός των κρατήρων σύμφωνα με το σχετικό βάθος, την επιφάνεια και τη περίμετρο τους είναι παρόμοιος με το διαχωρισμό σύμφωνα με τις μορφολογικές κλάσεις. Οι αρχικοί κρατήρες, που είναι και οι περισσότεροι, έχουν μικρό σχετικό βάθος, μικρή επιφάνεια και περίμετρο. Ο μέγιστος άξονας των ελλειπτικών κρατήρων

έχει διεύθυνση BA-NΔ (εικόνα 6.9) δηλαδή η ελλειπτικότητα των κρατήρων διαμορφώνεται παράλληλα με τις ισοβαθείς (εικόνα 6.1).

Εικόνα 6.5. Ιστόγραμμα συχνότητας βάθους κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 6.6. Ιστόγραμμα συχνότητας σχετικού βάθους κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 6.7. Ιστόγραμμα συχνότητας μεγέθους επιφάνειας (εμβαδόν) κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 6.8. Ιστόγραμμα συχνότητας περιμέτρου κρατήρων διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 6.9. Ροδόγραμμα διευθύνσεων μέγιστων αξόνων κρατήρων διαφυγής ρευστών και η σχέση τους με τη διάμετρο του άξονα.

Η σύγκριση των μορφομετρικών χαρακτηριστικών των κρατήρων του πεδίου του Όρμου του Ελαιώνα με το πεδίο του Πατραϊκού κόλπου έδειξε:

- Μικρότερη πυκνότητα κρατήρων στον Όρμο του Ελαιώνα (33 K.Δ.Ρ./km^2), ενώ στον Πατραϊκό η πυκνότητα είναι 46 K.Δ.Ρ./km^2 .
- Στον Πατραϊκό κόλπο οι περισσότεροι κρατήρες είναι κοινοί, ακολουθούν οι σύνθετοι και λίγοι αρχικοί, ενώ στον Όρμο του Ελαιώνα οι περισσότεροι κρατήρες είναι αρχικοί.
- Το σχετικό βάθος, η επιφάνεια και η περίμετρος των κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου είναι πολύ μεγαλύτερα από τους κρατήρες του Όρμου του Ελαιώνα.
- Ο μέγιστος άξονας των ελλειπτικών κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου έχει διεύθυνση κάθετη προς τις ισοβαθείς ενώ του Όρμου του Ελαιώνα παράλληλη με τις ισοβαθείς.

6.1.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

6.1.2.1 Στρωματογραφία

Η μελέτη των σεισμικών τομογραφιών έδειξε την ύπαρξη μίας ακολουθίας ασθενών παράλληλων σεισμικών ανακλάσεων, η οποία υπέρκειται μίας επιφάνειας με πολύ παρατεταμένο ακουστικό χαρακτήρα (έντονης ανακλαστικότητας) που δεν επιτρέπει την περαιτέρω διείσδυση των ακουστικών κυμάτων του τομογράφου υποδομής πυθμένα 3.5 kHz και αποτελεί το ακουστικό υπόβαθρο της περιοχής (εικόνες 6.10, 6.11). Αυτή η επιφάνεια έχει ανώμαλο ανάγλυφο και αποδίδεται στην επιφάνεια διάβρωσης κατά το τέλος του

Πλειστοκαίνου (Perissoratis et al., 2000). Η ανώτερη ακολουθία έχει μέσο πάχος 10m αποδίδεται σε Ολοκαινικές ιλύες ενώ η κατώτερη, κάτω από τη διαβρωσιγενή επιφάνεια, σε Πλειστοκαινικές αλουβιακές αποθέσεις (Perissoratis et al., 2000).

Εικόνα 6.10. Σεισμική τομογραφία 3.5 kHz κάθετα στην ακτή στην οποία φαίνεται η επιφάνεια διάβρωσης που διαχωρίζει τα Ολοκαινικά από τα Πλειστοκαινικά ιζήματα. Πλησίον της ακτής διακρίνεται έντονη ανάκλαση (ER).

Εικόνα 6.11. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η επιφάνεια διάβρωσης που διαχωρίζει τα Ολοκαινικά από τα Πλειστοκαινικά ιζήματα

Η πολύ παρατεταμένη επιφάνεια οφείλεται κυρίως στη μεγάλη αλλαγή των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των ιζημάτων χωρίς να αποκλείεται η παρουσία ρευστών στα ιζήματα καθώς ο ακουστικός χαρακτήρας που παρουσιάζει είναι συμβατός με αυτή την πιθανότητα.

6.1.2.2 Ενδείξεις παρουσίας αερίων στις σεισμικές τομογραφίες

Η μελέτη των σεισμικών τομογραφιών έδειξε των ύπαρξη στην περιοχή διαφόρων ακουστικών χαρακτήρων, οι οποίοι αποτελούν άμεσες και έμμεσες ενδείξεις για την παρουσία της αέριας φάσης ρευστών (πιθανόν αερίων υδρογονανθράκων) στα ιζήματα. Οι συχνότερα εμφανιζόμενοι ακουστικοί χαρακτήρες είναι οι σεισμοκονιασμένες καταγραφές (Acoustic turbid zone –

ΑΤΖ), οι θύλακες αερίων (GP) και οι έντονες ανακλάσεις (enhanced reflectors – ER) (εικόνες 6.12, 6.13). Οι σεισμοκονιασμένες καταγραφές εντοπίζονται κυρίως στην διαβρωσιγενή επιφάνεια, αλλά και τοπικά εντός της ανώτερης ενότητας των Ολοκαινικών ιλύων. Η εμφάνιση σεισμοκονιασμένων καταγραφών εντός της Ολοκαινικής ακολουθίας δείχνει την κατακόρυφη μετανάστευση των ρευστών. Έντονες ανακλάσεις εντοπίζονται κυρίως σε περιοχές κοντά στην ακτή (βάθος νερού <15m) εντός της Ολοκαινικής ακολουθίας.

Εικόνα 6.12. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται σεισμοκονιασμένη καταγραφή (ΑΤΖ) και έντονες ανακλάσεις (ΕΡ).

Εικόνα 6.13. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται σεισμοκονιασμένη καταγραφή (ΑΤΖ) και θύλακας ρευστών (GP).

6.1.2.3 Κρατήρες διαφυγής ρευστών στις σεισμικές τομογραφίες

Οι κύριοι κρατήρες διαφυγής ρευστών εμφανίζονται στα σεισμικά προφίλ του τομογράφου υποδομής πυθμένα 3.5kHz: (α) με μορφή ευρέως U (εικόνα 6.14) όταν έχουν μεγάλο μέγεθος και πρηνή ήπιας κλίσης και (β) με μορφή τύπου V όταν χαρακτηρίζονται από μικρότερο περίμετρο και απότομα πρηνή τα οποία καταγράφονται με πλευρικές ανακλάσεις δημιουργώντας δομές ‘παπιγιόν’ (bow-tie structure) (εικόνα 6.15). Ο πυθμένας των κύριων κρατήρων φτάνει στην διαβρωσιγενή επιφάνεια Ολοκαίνου/Πλειστοκαίνου, ενώ οι ανακλαστήρες της ανώτερης ακολουθίας διακόπτονται απότομα κοντά στα πρηνή των κρατήρων.

Εικόνα 6.14. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών με επίπεδο πυθμένα (μορφή ευρέως U).

Εικόνα 6.15. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται ένας κρατήρας διαφυγής ρευστών με τοιχώματα μεγάλης κλίσης (δεξιά) (μορφή V) και τα όρια ενός άλλου (αριστερά).

6.1.3 Επιτόπιες μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων – Προέλευση ρευστών

Από το Σεπτέμβριο του 2002 έως τον Ιούνιο του 2004 πραγματοποιήθηκαν, σε επτά περιόδους, μετρήσεις διαλυμένου μεθανίου και φυσικών παραμέτρων στην υδάτινη στήλη, σε πέντε επιλεγμένους κρατήρες διαφυγής ρευστών στον Όρμο του Ελαιώνα (εικόνα 6.16). Οι μετρήσεις του διαλυμένου μεθανίου στην υδάτινη στήλη έγιναν με τον πρωτότυπο αισθητήρα METS (REF). Το Σεπτέμβριο του 2002 πραγματοποιήθηκαν πέντε ωκεανογραφικοί πλόες ενώ το ίδιο δίκτυο μετρήσεων επαναλήφθηκε ένα χρόνο αργότερα τον Αύγουστο 2003. Τον

Ιούνιο 2004 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε μία μόνο θέση για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Στον πίνακα 6.2 δίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων του διαλυμένου μεθανίου, της θερμοκρασίας και της αλατότητας στο επιφανειακό και στο πυθμαίο στρώμα νερού.

Εικόνα 6.16. Μωσαικό ηχογραφιών στο πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα στο οποίο σημειώνονται οι θέσεις που πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων.

Πίνακας 6.2. Μετρήσεις Μεθανίου, Θερμοκρασίας και Αλατότητας στο επιφανειακό και στο πυθμαίο στρώμα.

Θέση	Ημερομηνία	Βάθος μέτρησης	CH ₄ (μmol/l)	Θερμοκρασία (°C)	Αλατότητα (ppt)
EPM1	9 Σεπ 2002	5	0.033	25.02	38.55
		22.5	0.041	22.69	38.43
EPM4	9 Σεπ 2002	5	0.018	25.18	38.63
		27	0.026	22.90	38.43
EPM3	9 Σεπ 2002	5	0.012	25.15	38.67
		27	0.021	22.95	38.47
EPM1	9 Σεπ 2002	5	0.012	25.09	38.61
		23	0.017	22.81	38.44
EPM1	12 Σεπ 2002	5	0.047	25.05	38.68
		22	0.061	22.65	38.47
EPM4	12 Σεπ 2002	5	0.035	25.03	38.67
		28	0.053	23.14	38.44

Θέση	Ημερομηνία	Βάθος μέτρησης	CH ₄ (μmol/l)	Θερμοκρασία (°C)	Αλατότητα (ppt)
EPM6	12 Σεπ 2002	5	0.029	25.10	38.68
		27	0.040	22.82	38.49
EPM3	12 Σεπ 2002	5	0.026	25.15	38.69
		26	0.038	22.79	38.48
EPM1	12 Σεπ 2002	5	0.027	25.09	38.69
		22	0.038	22.75	38.49
EPM1	18 Σεπ 2002	5	0.028	25.01	38.68
		23	0.033	23.02	38.44
EPM6	18 Σεπ 2002	5	0.020	25.08	38.66
		29	0.021	23.11	38.46
EPM4	20 Σεπ 2002	3	0.065	24.83	38.67
		29	0.072	24.07	38.38
EPM1	20 Σεπ 2002	5	0.043	24.60	38.68
		21	0.043	24.10	38.70
EPM4	23 Σεπ 2002	0	0.031	24.21	38.68
		31	0.037	20.69	15.23
EPM4	25 Αυγ 2003	0	0.469	27.71	38.71
		28	0.483	24.42	38.30
EPM6	25 Αυγ 2003	0	0.375	27.95	38.69
		28	0.411	24.24	38.31
EPM2	25 Αυγ 2003	0	0.344	28.24	38.70
		26	0.380	24.51	38.12
EPM4	25 Αυγ 2003	0	0.280	38.26	38.75
		28	0.359	24.50	38.35
EPM4	24 Ιουν 2004	0	0.083	22.04	38.54
		28	0.092	19.71	38.41

Η συγκέντρωση του διαλυμένου μεθανίου σε όλες τις θέσεις και κατά τη διάρκεια όλων των περιόδων των μετρήσεων του Σεπτεμβρίου 2002 παρουσίασε χαμηλές τιμές (0.012 – 0.072 μmol/l) στα όρια περίπου ανιχνευσιμότητας του αισθητήρα διαλυμένου μεθανίου. Επίσης σε όλες τις θέσεις παρατηρήθηκε μία ελαφρά τάση αύξησης της συγκέντρωσης του μεθανίου με το βάθος (εικόνα 6.17), η οποία όμως δεν είναι ικανή ώστε να υποστηρίξει την άποψη ότι κατά τις περιόδους μετρήσεων υπήρχε ροή μεθανίου από τον πυθμένα προς την υδάτινη στήλη. Ένα χρόνο αργότερα (Αύγουστος 2003) μετρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου μεθανίου (0.280-0.483 μmol/l) τόσο στο επιφανειακό όσο και στο πυθμαίο στρώμα με πολύ μικρή τάση αύξησης με το βάθος. Αντίθετα, τον Ιούνιο 2004 η συγκέντρωση μεθανίου που μετρήθηκε στο πεδίο ήταν στα επίπεδα των περιόδων του 2002. Οι υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου μεθανίου τον Αύγουστο 2003 δεν φαίνεται να σχετίζονται με μετεωρολογικά αίτια ή σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή, ενώ επιπλέον δεν παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτες μεταβολές των συγκεντρώσεων οι οποίες να δικαιολογούν χωρίς αμφιβολία, ροή μεθανίου από τον πυθμένα προς την υδάτινη στήλη. Μία πιθανή εξήγηση είναι η μετατόπιση των μετρήσεων (drift) που συλλέγει ο αισθητήρας μεθανίου, μια όχι ασυνήθης συμπεριφορά του πρωτότυπου αυτού αισθητήρα.

Εικόνα 6.17. Κατακόρυφη κατανομή διαλυμένου μεθανίου (α), θερμοκρασίας (β) και αλατότητας (γ) με το βάθος στον κρατήρα διαφυγής ρευστών EP4.

Η θερμοκρασία και η αλατότητα σε όλες τις περιόδους και όλες τις θέσεις μετρήσεων παρουσίασαν μικρή μείωση με το βάθος. Επίσης σε τουλάχιστον μία θέση παρατηρήθηκε σημαντική πτώση της θερμοκρασίας και της αλατότητας κοντά στον πυθμένα (εικόνα 6.17).

Για τη διερεύνηση αυτής της τοπικής ανωμαλίας στις τιμές θερμοκρασίας και αλατότητας διενεργήθηκε συστηματική οπτική παρατήρηση των κρατήρων με χρήση κατευθυνόμενου υποβρύχιου οχήματος (R.O.V) και αυτοδυτών (βλέπε επίσης 6.1.4. *Οπτική παρατήρηση κρατήρων*). Στον κρατήρα EP4 εντοπίστηκαν σημειακές διαφυγές ρευστών οι οποίες ήταν ευδιάκριτες λόγω της τοπικής αύξησης της θολερότητας στην υδάτινη στήλη. Σε μια από αυτές τις σημειακές διαφυγές εκτελέστηκαν εγγάρσιες τομές όλων των φυσικοχημικών παραμέτρων της υδάτινης στήλης με τη βοήθεια αυτοδύτη. Οι εγγάρσιες τομές των μετρήσεων έδειξαν μία πολύ απότομη μείωση της θερμοκρασίας και της αλατότητας στο κέντρο της διαφυγής και μικρότερη μείωση των τιμών σε δύο θέσεις εκατέρωθεν του κεντρικού σημείου, ενώ η συγκέντρωση του διαλυμένου μεθανίου παρέμεινε σταθερή (εικόνα 6.18). Οι πτώσεις της θερμοκρασίας και αλατότητας εμφανίζονταν σε περιοχές όπου οπτικά υπήρχε εκροή ρευστού από τον πυθμένα προς την υδάτινη στήλη (εικόνα 6.19).

Εικόνα 6.18. Διάγραμμα θερμοκρασίας αλατότητας και διαλυμένου μεθανίου κατά μήκος της τομής στον κρατήρα διαφυγής ρευστών EP4.

Εικόνα 6.19. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα διαφυγής ρευστών EP4 στην οποία φαίνεται διαφυγή ρευστού.

Επίσης στις θέσεις όπου παρατηρήθηκε απότομη πτώση της θερμοκρασίας και της αλατότητας υπήρχε πτώση του pH (από 8.45 σε 8.2) και αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου από 60% της συγκέντρωσης κορεσμού σε 85% ακριβώς πάνω από τη θέση διαφυγής (από 4 σε 6.5 mg/l) (εικόνα 6.20). Η μείωση της θερμοκρασίας, της αλατότητας και του pH στο ρευστό της διαφυγής ενισχύει την άποψη ότι τα ρευστά προέρχονται από τον υδροφόρο της περιοχής. Το pH που μετρήθηκε σε δύο αδρευτικές γεωτρήσεις σε απόσταση 1500 και 2000m από την ακτογραμμή ήταν 7.41 και 7.35 αντίστοιχα (Ταβλά, 2005). Επίσης από τη συνολική μελέτη των υπόγειων νερών στην υδρολογική λεκάνη βρέθηκε ότι το υπόγειο νερό του υδροφόρου είναι μετεωρικό, σύμφωνα με τις ισοτοπικές αναλύσεις οξυγόνου και υδρογόνου και ο χρόνος παραμονής του είναι μικρός, σύμφωνα με το μικρό εμπλουτισμό του νερού σε

βαρέα μέταλλα. Ο μικρός χρόνος παραμονής έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό (Champ et al., 1979). Η απότομη αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου στην περιοχή της διαφυγής οφείλεται στην προσφορά οξυγόνου από το υπόγειο νερό.

Εικόνα 6.20. Διάγραμμα θερμοκρασίας, pH και διαλυμένου οξυγόνου κατά μήκος της τομής στον πυθμένα του κρατήρα διαφυγής ρευστών EP4.

6.1.4 Οπτική παρατήρηση

Στο πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα πραγματοποιήθηκε ένα ευρύ και συστηματικό πρόγραμμα οπτικής παρατήρησης των κρατήρων τόσο με χρήση με κατευθυνόμενου υποβρύχιου οχήματος ROV όσο και με αυτοδύτες. Το πρόγραμμα οπτικής παρατήρησης εκτελέστηκε κατά την περίοδο των επιτόπιων μετρήσεων (ερευνητική περίοδος 2002-2004) και την ερευνητική περίοδο 2007 (Γσαρπαλής, 2008) και οδήγησε στην λεπτομερή φωτογράφιση του πυθμένα έξι κύριων (κοινών και σύνθετων) κρατήρων.

6.1.4.1 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP1

Είναι ο πιο ρηχός από τους κύριους κρατήρες, ο πυθμένας του χαρακτηρίζεται από ήπιες τοπογραφικές ανωμαλίες της τάξης του 1m και έχει σχήμα κυκλικό (εικόνα 6.21). Στο εσωτερικό του κρατήρα εντοπίστηκαν δύο επιμέρους μικροί κρατήρες με κωνικό σχήμα, βάθη 1.5m και 2.5m (μέγιστο βάθος νερού 24.6m) και διάμετρο 3m και 5m μέτρων, αντίστοιχα. Στο εσωτερικό αυτών των μικρών κρατήρων εντοπίστηκαν διαφυγές ρευστών από μικρές οπές του πυθμένα (εικόνες 6.22, 6.23). Ο πυθμένας του κρατήρα καλύπτεται από λεπτόκοκκο υλικό (άμμος και ιλύς). Στον πυθμένα του κρατήρα δεν εντοπίστηκαν βενθικοί οργανισμοί σε

αξιοσημείωτες πυκνότητες, εκτός από κάποια συσσωματώματα διθύρων (εικόνα 5.23), μικρές αποικίες κοραλλιών (εικόνες 6.24, 6.25, 6.26) και αρκετά ολοθούρια, τα οποία είναι χαρακτηριστικά σε όλη την περιοχή του πεδίου.

Εικόνα 6.21. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών EP1

Εικόνα 6.22. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται έντονες διαφυγές ρευστών.

Εικόνα 6.23. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται διαφυγή ρευστών

Εικόνα 6.24. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται συστάδα διθύρων πάνω σε ιλυώδη πυθμένα.

Εικόνα 6.25. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται αποικία εξακοράλλιου *cladocora caespitosa*.

Εικόνα 6.26. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται κοραλλιογενής σχηματισμό.

6.1.4.2 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP2

Είναι σύνθετος κρατήρας διαφυγής ρευστών (εικόνα 6.27) και έχει τη μεγαλύτερη έκταση από όλους τους κρατήρες του πεδίου. Έχει μέγιστο βάθος 26.8m και χαρακτηρίζεται από απότομα πρανή. Στον πυθμένα του εντοπίστηκαν πολλές κρατηρόμορφες γεωμορφές διαμέτρου 20-40cm και βάθους μέχρι 20cm (εικόνες 6.28, 6.29, 6.30). Σε αυτούς τους μικροκρατήρες διαπιστώθηκαν διαφυγές ρευστών, οι οποίες παρουσίασαν διακοπτόμενο χαρακτήρα όπως απέδειξε η παρακολούθηση τους για ικανό χρονικό διάστημα. Μετά από κάθε επαναδραστηριοποίηση οι διαφυγές είναι έντονες καθώς παρατηρήθηκε επαναιώρηση του ιζήματος σε ύψος περίπου 0.5m (εικόνα 6.31). Ο πυθμένας του κρατήρα καλύπτεται σε ένα μεγάλο μέρος του από χονδρόκοκκο υλικό (άμμος και ψηφίδες), ενώ τοπικά βρέθηκαν και κροκάλες (εικόνα 6.32).

Εικόνα 6.27. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών EP2

Εικόνα 6.28. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται έντονη διαφυγή ρευστών από μικρό κρατήρα.

Εικόνα 6.29. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται διαφυγές ρευστών από μικρές οπές.

Εικόνα 6.30. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται μικροί κρατήρες και οπές.

Εικόνα 6.31. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται η επαναιώρηση του ιζήματος μετά από μία έντονη διαφυγή ρευστών.

Εικόνα 6.32. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται κροκάλες

Επίσης στον πυθμένα του κρατήρα παρατηρήθηκε αυξημένη παρουσία οργανισμών. Το είδος που κυριαρχεί είναι οι πολύχαιτοι (εικόνες 6.33, 6.34), ενώ βρέθηκαν διάσπαρτες αποικίες κοραλλιών (εικόνα 6.35). Επίσης βρέθηκαν αρκετά δίθυρα και γυμνοβράγχια (εικόνα 6.36).

Εικόνα 6.33. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα στην οποία φαίνονται πλήθος από σωλήνες πολύχαιτων (*polichaeta sabella*).

Εικόνα 6.34. Φωτογραφία του είδους *polichaeta sabella*, το οποίο αφθονεί στους κρατήρες διαφυγής ρευστών.

Εικόνα 6.35. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται κοραλλιογενής σχηματισμός.

Εικόνα 6.36. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται γυμνοβράγχιο να κινείται σε αδρόκοκκο πυθμένα

6.1.4.3 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP3

Είναι ο πιο απομακρυσμένος κύριος κρατήρας διαφυγής ρευστών από την αλυσίδα κρατήρων που αναπτύσσεται παράλληλα προς τις ισοβαθείς. Έχει μέγιστο βάθος 28.9m, ενώ το σχήμα του είναι ακανόνιστο (εικόνα 6.37). Ο πυθμένας του καλύπτεται από χονδρόκοκκο υλικό (άμμος και ψηφίδες) (εικόνες 6.38, 6.39), τοπικά υπάρχουν κροκάλες ενώ τα πρανή παρουσιάζουν μεγάλη κλίση και καλύπτονται από λεπτόκοκκο υλικό. Λόγω της μικρής ορατότητας κοντά στον πυθμένα (<1m) δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός διαφυγών ρευστών.

Στον πυθμένα του κρατήρα εντοπίστηκε πλήθος από αποικίες σπόγγων (εικόνες 6.40, 6.41, 6.42, 6.43), πολύχαιτοι (εικόνα 6.42) και διθυρα(εικόνα 6.44).

Εικόνα 6.37. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών EP3

Εικόνα 6.38. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται η παρουσία κροκάλων και συσσωματωμάτων ψηφίδων.

Εικόνα 6.39. Φωτογραφία όπου φαίνονται ψηφίδες από τον πυθμένα του κρατήρα

Εικόνα 6.40. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων

Εικόνα 6.41. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων.

Εικόνα 6.42. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων και ένα πολύχαιτο.

Εικόνα 6.43. Φωτογραφία στην οποία φαίνεται κοράλλι από τον πυθμένα

Εικόνα 6.44. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται δίθυρο πάνω σε αδρόκοκκο πυθμένα.

6.1.4.4 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών ΕΡ4

Είναι ο κρατήρας διαφυγής ρευστών με το μεγαλύτερο απόλυτο (31m) και σχετικό βάθος (12m) (εικόνα 6.45). Έχει μικρή διάμετρο και πολύ απότομα πρανή (εικόνες 6.46, 6.47, 6.48). Εντοπίστηκαν σημαντικές και συνεχείς διαφυγές ρευστών (εικόνα 6.49), μια εκ των οποίων απέδωσε το διάγραμμα της εικόνας 6.18, καθώς επίσης και μικρές σημειακές διακοπτόμενες διαφυγές ρευστών. Ο πυθμένας του καλύπτεται από μεγάλο εύρος κοκκομετρικών κλάσεων (ιλύς, άμμος και ψηφίδες) και από θραύσματα κελυφών (εικόνες 6.50, 6.51). Στον πυθμένα του κρατήρα εντοπίστηκε πλήθος από πολύχαιτους (εικόνες 6.52, 6.53), ενώ στη θέση των συνεχών διαφυγών υπάρχει έντονη φυτοκάλυψη (εικόνες 6.49, 6.54).

Εικόνα 6.45. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών EP4.

Εικόνα 6.46. Φωτογραφία από τα όρια του κρατήρα στην οποία φαίνονται τα απότομα πρανή του κρατήρα.

Εικόνα 6.47. Φωτογραφία από τα όρια του κρατήρα στην οποία φαίνονται τα απότομα πρανή του κρατήρα.

Εικόνα 6.48. Φωτογραφία από τα όρια του κρατήρα στην οποία φαίνονται τα απότομα πρανή του κρατήρα.

Εικόνα 6.49. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται διαφυγή ρευστών και πυκνή φυτοκάλυψη περιφερειακά της διαφυγής

Εικόνα 6.50. Φωτογραφία όπου φαίνεται το αδρομερές υλικό και τα θραύσματα οργανισμών που βρίσκονται στον πυθμένα.

Εικόνα 6.51. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται πολύχαιτοι

Εικόνα 6.52. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται πολύχαιτοι σε ένα αδρόκοκκο πυθμένα.

Εικόνα 6.53. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται το είδος *polichaeta sabella* σε πλήρη ανάπτυξη.

Εικόνα 6.54. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται γυμνοβράγχιο να κινείται σε φυτά.

6.1.4.5 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP5

Ο πυθμένας του κρατήρα διαφυγής ρευστών είναι επίπεδος, (εικόνα 6.55) ενώ τα πρανή του παρουσιάζουν έντονη κλίση (35°) (εικόνα 6.56). Κατά τη διάρκεια τη κατάδυσης υπήρχε ένα έντονο θερμοκλινές 3-4m πάνω από τον πυθμένα, αλλά λόγω της πολύ χαμηλής ορατότητας

δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός διαφυγών. Ο πυθμένας του κρατήρα καλύπτεται κατά τόπους από χονδρόκοκκο υλικό (άμμος και ψηφίδες), ενώ υπάρχουν περιοχές όπου χαρακτηρίζονται από ιλυούχα ιζήματα. Στον πυθμένα εντοπίστηκε πλήθος από οπές διαμέτρου 1-5cm (εικόνα 6.57) οι οποίες οφείλονται είτε σε βιοαναμόχλευση είτε σε διαφυγές ρευστών.

Εικόνα 6.55. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών EP5.

Ο πυθμένας του κρατήρα χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη παρουσία αποικιών κοραλλιών (εικόνες 6.58, 6.59), καρκινοειδών και δίθυρων.

Εικόνα 6.56. Φωτογραφία από τα πρανή του κρατήρα.

Εικόνα 6.57. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται μικρές οπές

Εικόνα 6.58. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες κοραλλιών.

Εικόνα 6.59. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες κοραλλιών.

6.1.4.6 Κρατήρας Διαφυγής Ρευστών EP6

Ο κρατήρας έχει μέγιστο βάθος 30m και ο πυθμένας του είναι επίπεδος. Τα πρανή του κρατήρα σχηματίζουν αναβαθμίδες (εικόνα 6.60). Ο πυθμένας του καλύπτεται κυρίως από χονδρόκοκκο υλικό (άμμος και ψηφίδες) με μικρότερη παρουσία ιλύος (εικόνα 6.61). Στο κέντρο του κρατήρα, σε μία έκταση 1-2m² εντοπίζονται κροκάλες διαμέτρου 5-10cm (εικόνα 6.62). Στον κρατήρα εντοπίστηκαν πολλές διαφυγές ρευστών με μικρή όμως ένταση. Είναι ο κρατήρας στον οποίο παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη συγκέντρωση οργανισμών, με μεγάλες αποικίες από κοράλλια (εικόνες 6.63, 6.64, 6.65), πολύχαιτους (εικόνα 6.66) και δίθυρα.

Εικόνα 6.60. Ηχογραφία στην οποία αποτυπώνεται ο κρατήρας διαφυγής ρευστών EP6.

Εικόνα 6.61. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται έντονες διαφυγές ρευστών.

Εικόνα 6.62. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται κροκάλες. Ένα δίθυρο αναπτύσσεται πάνω τους.

Εικόνα 6.63. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων (πιθανώς του γένους *Leucosolenia*) και το

κρινοειδές εχινόδερμο *Antedon* sp. (οικ. Antedonidae).

Εικόνα 6.64. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων.

Εικόνα 6.65. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνονται αποικίες σπόγγων .

Εικόνα 6.66. Φωτογραφία από τον πυθμένα του κρατήρα όπου φαίνεται το είδος *poliCHAETA sabella* σε πλήρη ανάπτυξη

6.2 Επιμέρους Συμπεράσματα

Στον Όρμο του Ελαιώνα μελετήθηκε ένα πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών. Το πεδίο αποτελείται από 23 κρατήρες εκ των οποίων οι έξι (‘κύριοι’ κρατήρες) έχουν επιφάνεια 1300-7700m², και σχετικό βάθος 8-12m, και χαρακτηρίζονται μορφολογικά ως κοινοί και σύνθετοι. Οι υπόλοιποι κρατήρες διαφυγής ρευστών είναι μικρότεροι και χαρακτηρίζονται ως αρχικοί ή σχηματίζουν συστάδες αρχικών. Οι κύριοι κρατήρες μελετήθηκαν ως προς τη σύσταση των ρευστών που διαφεύγουν από τον πυθμένα τους, με επιτόπιες μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων, ενώ πραγματοποιήθηκαν πλήθος καταδύσεων με στόχο την οπτική επιβεβαίωση της ύπαρξης διαφυγών ρευστών και τη διερεύνηση της οικολογίας τους (πίνακας 6.3).

Πίνακας 6.3. Τα κυριότερα μορφολογικά, ιζηματολογικά και βιολογικά χαρακτηριστικά και η παρουσία διαφυγών ρευστών των ‘κύριων’ κρατήρων διαφυγής ρευστών του Όρμου του Ελαιώνα

Κωδικός		EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	EP6
Περίμετρος (m)		252	392	249	143	223	241
Εμβαδόν (m ²)		4923	7733	4591	1337	3756	4460
Σχ.Βάθος (m)		8	10	8	12	11	11
Βάθος (m)		23	27	29	31	29	30
Μορφολογικός Χαρακτηρισμός		Κοινός	Σύνθετος	Κοινός	Σύνθετος	Κοινός	Σύνθετος
Ιζηματολογικά χαρακτηριστικά πυθμένα		Ιλύς και άμμος	Άμμος, ψηφίδες, τοπικά κροκάλες	Άμμος, ψηφίδες, τοπικά κροκάλες ή λεπτόκοκκο υλικό	Ιλύς, άμμος και ψηφίδες	Ιλύς, κατά τόπους άμμος και ψηφίδες	Άμμος και ψηφίδες, μικρή παρουσία ιλύος, τοπικά κροκάλες
Εντοπισμός Διαφυγών	Συνεχείς	√	√	?	√	?	√
	Διακοπτόμενες	-	√	?	√	?	-
Βιοποικιλότητα	Φυτοκάληψη	-	√	√	√	-	√
	Πολύχαιτοι	-	√	√	√	-	√
	Σπόγγοι	-	-	√	-	-	√
	Κοράλλια	√	√	√	-	√	√
	Δίθυρα	√	√	√	√	√	√
	Γυμνοβάγχια	-	√	-	-	-	√
Εκτίμηση πυκνότητας βενθικής βιομάζας (ποσοστό κάλυψης του πυθμένα %)		<5	10-20	20-25	5-10	5-10	25-30

Η απότομη πτώση της θερμοκρασίας και της αλατότητας κατά πρώτο λόγο, αλλά και η πτώση του pH και η αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου κατά δεύτερο λόγο, κιντά στον πυθμένα σε συνδυασμό με την οπτική επιβεβαίωση της ύπαρξης διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην περιοχή και εντός των ορίων των κρατήρων διαφυγής ρευστών υπάρχει εκφόρτιση του υδροφόρου ορίζοντα. Ανατολικότερα στην περιοχή του Αιγίου οι Giurgea et al. (2004) προτείνουν την εκφόρτιση του υδροφόρου των Πλειστοκαινικών αλλουβιακών αποθέσεων στην υποθαλάσσια περιοχή του Αιγίου. Στην

περιοχή του Όρμου του Ελαιώνα οι κρατήρες διαφυγής ρευστών σχηματίζονται σε Ολοκαινικές ιλύες και ο πυθμένας των κρατήρων φτάνει στην διεπιφάνεια Ολοκαινού/Πλειστοκαινού. Συνεπώς στην περιοχή των κρατήρων πιθανόν να εκφορτίζεται ο ελεύθερος υδροφόρος των Πλειστοκαινικών αλλουβιακών αποθέσεων.

Κρατήρες διαφυγής ρευστών μπορούν να σχηματιστούν είτε από τη διαφυγή αερίων υδρογονανθράκων είτε από τη διαφυγή υπόγειου νερού ή ακόμη από τη σύγχρονη διαφυγή και των δύο (Judd and Hovland, 2007). Κρατήρες διαφυγής ρευστών που έχουν σχηματιστεί από την εκφόρτιση υδροφόρου έχουν αναφερθεί στον κόλπο του Eckernförde στη Βαλτική Θάλασσα (Khandriche and Werner, 1995; Bussman and Suess, 1988; Bussmann et al., 1999; Whiticar, 2002; Jensen et al., 2002), ενώ κρατήρες διαφυγής ρευστών στην περιοχή Skagerrak μεταξύ Νορβηγίας και Δανίας, οι οποίοι αρχικά είχαν αποδοθεί σε διαφυγές αερίων (Hempel et al., 1994) σήμερα επικρατεί η άποψη ότι οι διαφυγές γλυκού νερού από ένα αρτεσιανό υδροφόρο είναι ο κύριος μηχανισμός σχηματισμού τους (Hübscher and Borowski, 2006). Οι κρατήρες του Eckernförde είναι οι καλύτερα μελετημένοι κρατήρες διαφυγής γλυκού νερού και η σύγκρισή τους με αυτούς του Ελαιώνα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Σύμφωνα με τους Jensen et al. (2002), οι κρατήρες διαφυγής ρευστών του Eckernförde σχηματίζουν αλυσίδες είτε ‘συστάδες’ που εξαρτώνται από την παγετώδη και μεταπαγετώδη στρωματογραφία. Μετρήσεις της αλατότητας στην υδάτινη στήλη εντός και εκτός των κρατήρων έδειξαν σημαντική μείωση της αλατότητας κοντά στον πυθμένα εντός των ορίων των κρατήρων (Bussman and Suess, 1988) ενώ μετρήσεις στο νερό των πόρων από πυρήνες ιζήματος που συλλέχθηκαν από τους κρατήρες έδειξαν χαμηλή συγκέντρωση χλωριώντων σε σχέση με πυρήνες εκτός κρατήρων, που είναι ενδεικτική της εκφόρτισης γλυκού νερού (Bussmann et al., 1999). Παρόμοιες συνθήκες διαπιστώθηκαν στην υδάτινη στήλη εντός των κρατήρων του Ελαιώνα. Οι κρατήρες του Eckernförde έχουν σχετικό βάθος 2m, είναι καταβυθίσεις με σχήμα κόλουρου κώνου, έχουν διάμετρο 50-300m και σχηματίζονται σε Ολοκαινικές ιλύες. Οι κρατήρες του Ελαιώνα παρουσιάζουν διάμετρο 150 έως 400m, έχουν μεγαλύτερο σχετικό βάθος (8-12m) και αναπτύσσονται σε Ολοκαινικές αποθέσεις (Πίνακας 5.3). Στην περιοχή του Eckernförde, οι διαφυγές γλυκού νερού συμβαίνουν στα περιθώρια του κόλπου, όπου οι μεταπαγετώδεις αποθέσεις έχουν μικρότερο πάχος και είναι αδρομερέστερες. Οι κρατήρες διαφυγής ρευστών περιορίζονται εντός των ζωνών εκφόρτισης των υδροφόρων, σε θέσεις όπου καλύπτονται από χαλαρές Ολοκαινικές ιλύες μικρού πάχους, τις οποίες είναι εύκολο να διαπεράσει ο αρτεσιανός υδροφόρος, σχηματίζοντας συστάδες ή αλυσίδες κρατήρων. Παρόμοια, στην περιοχή του Ελαιώνα οι μεγαλύτεροι σε μέγεθος κρατήρες

εντοπίζονται στην παράκτια ζώνη και περιφερειακά του όρμου, στα ρηχά νερά, ενώ φαίνεται να αναπτύσσονται σε περιοχή όπου οι ολοκαινικές αποθέσεις έχουν πάχος 6-12m.

Η παρουσία ακουστικών χαρακτήρων (σεισμοκονιασμένη καταγραφή, θύλακες αερίων) στις σεισμικές τομογραφίες, ενδεικτικών της παρουσίας αέριας φάσης στα ιζήματα του Όρμου του Ελαιώνα, σε συνδυασμό με την εκφόρτιση υπόγειου νερού προτείνει δύο πιθανές διεργασίες όσον αφορά στο σχηματισμό των κρατήρων: (α) σχηματισμός από τη συνδυαστική δράση των διαφυγών των αερίων και του γλυκού νερού, (β) η εκφόρτιση του γλυκού νερού είναι η αιτία σχηματισμού των κρατήρων και η οποία απλά συμπαρασύρει τα συγκεντρωμένα αέρια στη διαβρωσιγενή επιφάνεια Ολοκαίνου/Πλειστοκαίνου. Η απουσία ενδείξεων διαφυγής μεθανίου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ενισχύει τη δεύτερη διεργασία σχηματισμού καθώς είναι πιθανόν το διαθέσιμο μεθάνιο να έχει ήδη εξαντληθεί ή να διαφεύγουν μικροποσότητες σε συγκεντρώσεις κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας του αισθητήρα μεθανίου που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης η παρουσία του ρήγματος μετασχηματισμού Κερυνίτης, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει ως μία δίοδος μεταφοράς μεγαλύτερων ποσοτήτων υπόγειου νερού σε σχέση με τον υδροφόρο προς την περιοχή του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών ενισχύει την άποψη ότι οι κρατήρες σχηματίζονται από την εκφόρτιση γλυκού νερού. Παρόμοιες διεργασίες με τις προτεινόμενες στον όρμο του Ελαιώνα διαπιστώθηκαν στον κόλπο του Eckernförde. Παρουσία αερίων υδρογονανθράκων βρέθηκε τόσο στα ιζήματα του κόλπου (Abegg and Anderson, 1998; Bussman et al., 1999; Jensen et al., 2002) όσο και στην υδάτινη στήλη εντός των κρατήρων διαφυγής ρευστών (Bussman and Suess, 1998). Οι αέριοι υδρογονάνθρακες στην περιοχή δεν αποτελούν την αιτία σχηματισμού των κρατήρων η οποία είναι η διαφυγή του γλυκού νερού. Η μεταβολές όμως στο ρυθμό διαφυγών του γλυκού νερού μεταβάλλουν τη συγκέντρωση διαλυμένου μεθανίου στην υδάτινη στήλη, καθώς το μεθάνιο συμπαρασύρεται από το γλυκό νερό και διαφεύγει από τους κρατήρες (Bussman and Suess, 1998)

Οι βενθικές βιοκοινωνίες που εντοπίστηκαν στο εσωτερικό των κρατήρων διαφυγής ρευστών σε συνδυασμό με την απουσία τους στην ευρύτερη περιοχή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το υπόγειο νερό, εμπλουτισμένο με θρεπτικά συστατικά και διαλυμένο οξυγόνο δημιουργεί ένα εξαιρετικό οικοτόπο για την ανάπτυξη βενθικών οργανισμών (πίνακας 5.3). Παρόμοιες διαπιστώσεις αναφέρονται από πολλούς ερευνητές σε μια ποικιλία παρακτίων περιβαλλόντων. Οι Ullman et al. (2003); Miller and Ullman (2004) κατέγραψαν βενθικές βιοκοινότητες τυπικές περιβαλλόντων ποταμόκολπου, στον Όρμο Delaware στην ανατολική ακτή των ΗΠΑ στον Ατλαντικό ωκεανό. Πυκνές αποικίες του πολύχαιτου *Marenzelleria varidis*, ένα είδος τυπικό των γλυκών ή υφάλμυρων νερών των ποταμόκολπων εντοπίστηκαν σε μικρή απόσταση από την

ακτή σε μία περιοχή όπου αναμένονταν η παρουσία μικρής βιομάζας ειδών θαλασσινού νερού. Έντονες διαφυγές γλυκού, με μεγάλη παρουσία θρεπτικών αλάτων εντοπίστηκαν στην περιοχή ανάπτυξης των πολύχαιτων, καθώς και μεγάλη παρουσία ψαριών. Συνεπώς η παρουσία διαφυγών γλυκού νερού σχετίζεται με την υψηλή βιολογική παραγωγικότητα και την ανώτερη τροφική αλυσίδα (Miller and Ullman, 2004). Στη λίμνη Superior, στη Βόρεια Αμερική καταγράφηκαν δακτυλιοειδείς καταβυθίσεις που μοιάζουν με κρατήρες διαφυγής ρευστών που σχηματίστηκαν είτε από τη διαφυγή του νερού των πόρων (sediment dewatering) ή διαφυγές γλυκού νερού (Hovland and Judd, 1988). Η υψηλή παραγωγικότητα (στρώματα από μύκητες που αναπτύσσονται πάνω σε υφάλους) (Clark, 1986) αποδόθηκε στην αυξημένη παρουσία θρεπτικών συστατικών από τις διαφυγές (Judd and Hovland, 2007). Σύμφωνα με τον Johannes (1980) ο οποίος μελέτησε την πιθανή επίδραση των διαφυγών γλυκού νερού από τον πυθμένα της θάλασσας στην περιοχή του Περθ, στη Δυτική Αυστραλία, όπου κατέγραψε παράκτιες περιοχές χαμηλής αλατότητας και σε μερικές περιπτώσεις μικρές υποθαλάσσιες πηγές, υποστηρίζει ότι οι διαφυγές γλυκού νερού φέρνουν περισσότερα θρεπτικά συστατικά σε σχέση με την επιφανειακή απορροή, με αποτέλεσμα την επίδραση τους στην παραγωγικότητα και στη βιοποικιλότητα. Η οικολογία στις παράκτιες περιοχές και στους ποταμόκολπους εξαρτάται από την ποιότητα του νερού, συνεπώς η θέση και η ποσότητα των διαφυγών γλυκού νερού επηρεάζει την χλωρίδα και την πανίδα που υπάρχει σε αυτές τις περιοχές, καθώς μεταβάλλει την ποιότητα του νερού (Tanigushi et al., 2002; Burnett et al., 2003). Επίσης προκαταρκτική ανάλυση δειγμάτων ζωοπλαγκτόν που συλλέχθηκαν πρόσφατα από το εσωτερικό του κρατήρα διαφυγής ρευστών EP2 καθώς και από την περιοχή εκτός αυτού έδειξε σημαντικά περισσότερη βιομάζα εντός του κρατήρα σε σχέση με την γύρω περιοχή.

Κεφάλαιο 7^ο Κόλπος Κατακόλου

7 ΚΟΛΠΟΣ ΚΑΤΑΚΟΛΟΥ

7.1 Γεωφυσική Διασκόπηση

Από την ψηφιοποίηση των δεδομένων του τομογράφου υποδομής πυθμένα κατασκευάστηκε βυθομετρικός χάρτης του Λιμένα Κατακόλου και της παράκτιας περιοχής του κόλπου του Κατακόλου (εικόνα 7.1). Το κεντρικό και νότιο τμήμα του Λιμένα Κατακόλου χαρακτηρίζεται από μέσο βάθος περίπου 10m το οποίο έχει προκύψει από ειβαθύνσεις, ενώ το βόρειο τμήμα του έχει βάθος <10m. Ο κόλπος του Κατακόλου, ανατολικά της χερσονήσου του Κατακόλου χαρακτηρίζεται από μικρά βάθη νερού που φτάνουν τα 20m σε απόσταση 2.5km από την ακτογραμμή. Οι κλίσεις του πυθμένα είναι ομαλές εκτός από μία περιοχή νότια του λιμένα, όπου σχηματίζεται ένα απότομο πρηνές, διεύθυνσης BBA-NNΔ έως B-N με μέγιστη κλίση 9°, με μέγιστη βυθομετρική διαφορά 13m. Νότια της χερσονήσου το βάθος αυξάνεται με σταθερό ρυθμό και φτάνει τα 35m σε απόσταση 1200m από το νοτιότερο τμήμα της.

Εικόνα 7.1. Βυθομετρικός χάρτης του κόλπου του Κατακόλου, ο οποίος κατασκευάστηκε με σύνθεση βυθομετρικών δεδομένων και δεδομένων τομογράφου υποδομής του πυθμένα που συλλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

7.1.1 Σεισμοστρωματογραφία

Η μελέτη των σεισμικών τομογραφιών έδειξε την ύπαρξη μίας σεισμικής ακολουθίας με συνεχείς, τοπικά ασθενείς παράλληλες εσωτερικές ανακλάσεις, με μέγιστο πάχος τουλάχιστον 25m, όσο το μέγιστο βάθος διείσδυσης του τομογράφου υποδομής πυθμένα στην περιοχή. Η βάση αυτής της ακολουθίας των σεισμικών ανακλάσεων, στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας, συνίσταται από μία έντονη και παρατεταμένη ανάκλαση, η οποία εντοπίζεται σε μεταβαλλόμενα βάθη και δεν επιτρέπει την περαιτέρω διείσδυση των ηχητικών κυμάτων (εικόνα 7.2). Σεισμικές τομογραφίες που συλλέχθηκαν σε ρηχά νερά (<20m) έδειξαν την παρουσία μιας επιφανειακής σεισμικής ακολουθίας με ασυνεχείς, ασαφείς και ασθενείς εσωτερικές σεισμικές ανακλάσεις (εικόνα 7.3), καθώς και την ανάδυση μίας πολύ παρατεταμένης σεισμικής ανάκλασης στην επιφάνεια του πυθμένα πλησίον της ακτογραμμής της χερσονήσου του Κατακόλου νότια του λιμένα η οποία αποδίδεται στην πιθανή εμφάνιση

των Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων τα οποία εμφανίζονται στην παρακείμενη χέρσο (εικόνα 7.4).

Εικόνα 7.2. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται μία τυπική σεισμωστρωματογραφική διάρθρωση των επιφανειακών ιζημάτων στην περιοχή του κόλπου του Κατακόλου.

Εικόνα 7.3. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η σεισμωστρωματογραφική διάρθρωση στα βάθη νερού <20m στον κόλπο του Κατακόλου.

Εικόνα 7.4. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η πιθανή επιφανειακή εμφάνιση των Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων.

7.1.2 Ενδείξεις παρουσίας αερίων στις σεισμικές τομογραφίες

Η μελέτη των σεισμικών τομογραφιών έδειξε των ύπαρξη στην περιοχή διαφόρων ακουστικών χαρακτήρων, οι οποίοι αποτελούν άμεσες και έμμεσες ενδείξεις για την παρουσία αέριας φάσης στα ρευστά των πόρων των ιζημάτων. Οι συνηθέστερα εμφανιζόμενοι ακουστικοί

χαρακτήρες είναι οι σεισμοκονιασμένες καταγραφές (Acoustic turbid zone – ATZ) (εικόνες 7.5, 7.6), οι έντονες ανακλάσεις (enhanced reflectors – ER) (εικόνες 7.6, 7.7), οι θύλακες αερίων (GP) (εικόνα 7.7) και οι πλούμες αερίων (GPI) (εικόνα 7.7). Οι σεισμοκονιασμένες καταγραφές εντοπίζονται σε διάφορα βάθη της ιζηματογενούς ακολουθίας ενώ τοπικά προσεγγίζουν ακόμη και την επιφάνεια του πυθμένα.

Εικόνα 7.5. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η παρουσία σεισμοκονιασμένης καταγραφής (ATZ) στα επιφανειακά ιζήματα..

Εικόνα 7.6. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η παρουσία σεισμοκονιασμένης καταγραφής (ATZ) και έντονων ανακλάσεων (ER) στα επιφανειακά ιζήματα.

Εικόνα 7.7. Σεισμική τομογραφία 3.5kHz στην οποία φαίνεται η παρουσία έντονων ανακλάσεων (ER) και θυλάκων αερίων (GP) στην επιφανειακή ακολουθία και πλούμων αερίων (GPI) στην υδάτινη στήλη.

7.1.3 Ρήγματα

Στα δυτικά της περιοχής έρευνας, πλησίον των ακτογραμμών της χερσονήσου του Κατακόλου και σε βάθη 5 έως 30m, εντοπίστηκε και χαρτογραφήθηκε ένα κανονικό ρήγμα διεύθυνσης BBA-NNΔ έως B-N (εικόνα 7.8) το οποίο συμπίπτει με το υποθαλάσσιο πρηνές που εντοπίστηκε από τα βυθομετρικά δεδομένα (εικόνες 7.1, 7.8). Στον πόδα του ρήγματος εμφανίζεται μία πολύ παρατεταμένη σεισμική ανάκλαση (πιθανή εμφάνιση Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων) ενώ η οροφή χαρακτηρίζεται από μια σεισμική ακολουθία με ασυνεχείς, ασαφείς και ασθενείς εσωτερικές σεισμικές ανακλάσεις, το πάχος της οποίας είναι μεγαλύτερο από τη διεισδυτική ικανότητα του τομογράφου υποδομής πυθμένα 3.5kHz με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο προσδιορισμός του άλματος του ρήγματος.

Σεισμικές τομογραφίες που συλλέχθηκαν εγκάρσια στη διεύθυνση του ρήγματος έδειξαν την παρουσία σεισμοκονιασμένης καταγραφής (ATZ), έντονων ανακλάσεων (ER) και θυλάκων αερίων (GP) στη σεισμική ακολουθία της οροφής του ρήγματος (εικόνα 7.8). Κατά μήκος του ίχνους του ρήγματος διαπιστώνεται η άνοδος της σεισμοκονιασμένης καταγραφής και η συχνότερη εμφάνιση των υπολοίπων, ενδεικτικών της παρουσίας ρευστών, ακουστικών χαρακτήρων στα ιζήματα. (εικόνα 7.8). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την τάση των ρευστών να μεταναστεύουν προς την επιφάνεια του πυθμένα κατά μήκος του ρήγματος και την τελική διαφυγή τους προς την υδάτινη στήλη. Οι θύλακες των αερίων (GP) φαίνεται να έχουν προσεγγίσει κατά πολύ την επιφάνεια του πυθμένα στο βόρειο τμήμα του ρήγματος όπου εμφανίζονται και πλούμες αερίων (GPI) (εικόνα 7.8) και συνεπώς αυτό το τμήμα φαίνεται να αποτελεί μία δίοδο για την μετανάστευση των αερίων προς την επιφάνεια του πυθμένα.

Εικόνα 7.8. Χάρτης της περιοχής έρευνας στον οποίο έχει αποτυπωθεί ένα κανονικό ρήγμα διεύθυνσης BBA-NNΔ έως B-N και τυπικές σεισμικές τομές 3.5kHz στις οποίες φαίνεται το ρήγμα (P) και η άνοδος των ρευστών κατά μήκος του ρήγματος (βλπ. κείμενο για λεπτομέρειες).

7.1.4 Ηχοβολιστικός εντοπισμός και αποτύπωση των διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα

Η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης οδήγησαν στην κατασκευή μωσαϊκών ηχογραφιών για την περιοχή του λιμένα (εικόνα 7.9α) και την

παράκτια περιοχή νοτίως του λιμένα κατά μήκος του επιφανειακού ίχνους του ρήγματος (εικόνα 7.10).

Η ανάλυση του μωσαϊκού ηχογραφιών του λιμένα έδειξε μια εκτεταμένη περιοχή χαμηλής ανακλαστικότητας και δύο περιοχές υψηλής ανακλαστικότητας (Περιοχή Α και Β) (εικόνα 7.9α). Η περιοχή χαμηλής ανακλαστικότητας χαρακτηρίζει το μεγαλύτερο τμήμα του πυθμένα του λιμένος και παρουσιάζει ομαλή μορφολογία (εικόνα 7.9β) αλλά και περιοχές με έντονο μικροανάγλυφο αποτέλεσμα των εργασιών εκβάθυνσης του λιμένος (εικόνα 7.9γ). Οι περιοχές υψηλής ανακλαστικότητας εντοπίζονται στην προέκταση του νότιου λιμενοβραχίονα του λιμένος (Περιοχή Α) και στο βρειοανατολικό τμήμα (Περιοχή Β) της περιοχής έρευνας. Η περιοχή Α αντιστοιχεί σε μια ταπείνωση του πυθμένα με τραχύ μικροανάγλυφο πιθανώς αποτέλεσμα της διατάραξης του πυθμένα από τις προπέλες των μεγάλων πλοίων που ελιμενίζονται στο λιμάνι του Κατακόλου. Η περιοχή Β πιθανώς αντιστοιχεί σε πυθμένα με πυκνή αλλά χαμηλή φυτοκάλυψη. Η οπτική παρατήρηση στο βόρειο τμήμα του λιμένα πλησίον της περιοχής Β (βλ. Κεφάλαιο 7.2) έδειξε την παρουσία φυτοκάλυψης στον πυθμένα.

Για την αξιόπιστη ηχοβολιστική αποτύπωση των σημαντικών και εκτεταμένων διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα που παρατηρούνται στον λιμένα του Κατακόλου εφαρμόστηκε η μεθοδολογία ενίσχυσης του σήματος της υδάτινης στήλης (raw data), ίδια με αυτή που εφαρμόστηκε στον Πατραϊκό κόλπο. Οι διαφυγές ρευστών εντοπίζονται και αναγνωρίζονται ως έντονες ανακλάσεις, οι οποίες εκκινούν από το ίχνος της ηχοβολιστικής τορπίλης ή σε κάποιο σημείο μεταξύ του ίχνους και πρώτης ανάκλασης του πυθμένα και τερματίζουν συνήθως στο ίχνος του πυθμένα (εικόνα 7.11).

Με αυτή τη μέθοδο εντοπίστηκαν και αποτυπώθηκαν συγκεκριμένες περιοχές του πυθμένα με σημαντικές διαφυγές ρευστών.

Εικόνα 7.9. (α) Μωσαϊκό ηχογραφιών στο λιμένα Κατακόλου όπου σημειώνονται οι περιοχές όπου εντοπίστηκαν διαφυγές ρευστών μετά από ανάλυση των ηχογραφιών, (β) μωσαϊκό ηχογραφιών τμήματος του λιμένα στο οποίο εμφανίζεται πυθμένας με χαμηλή ανακλαστικότητα και ομαλό ανάγλυφο και (γ) μωσαϊκό ηχογραφιών τμήματος του λιμένα στο οποίο εμφανίζεται πυθμένας με χαμηλή ανακλαστικότητα και ανώμαλο ανάγλυφο.

Εικόνα 7.10. Μωσαϊκό ηχογραφιών νότια του λιμένα Κατακόλου κατά μήκος του ρήγματος διεύθυνσης BBA-NNΔ έως B-N, όπου σημειώνονται οι περιοχές όπου εντοπίστηκαν διαφυγές ρευστών μετά από την ανάλυση των ηχογραφιών.

Εικόνα 7.11. Ηχογραφία ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης (α) αδιόρθωτη με τυπική ενίσχυση σήματος και (β) με μεγάλη ενίσχυση σήματος.

Μια εκτεταμένη περιοχή σημαντικών διαφυγών εντοπίζεται περιφερειακά του κεντρικού μόλου του λιμένα, γεγονός που πιθανώς υποδηλώνει την επίδραση του φορτίου της κατασκευής στην χωρική κατανομή των διαφυγών (εικόνα 7.12). Επίσης διαφυγές ρευστών προς την υδάτινη στήλη εντοπίστηκαν σε τέσσερις περιοχές βορειοανατολικά του κεντρικού μόλου τόσο σε αδιατάρακτο πυθμένα όσο και σε έντονα διαταραγμένα πυθμένα λόγω των εκβαθύνσεων. Μικρότερης έκτασης διαφυγές εντοπίστηκαν βορειοανατολικά του κυματοθραύστη εκτός των ορίων της περιοχής Α. Στην περιοχή Α δεν εντοπίστηκαν ίχνη διαφυγών ρευστών. Η συνολική έκταση του πυθμένα του λιμένος από την οποία διαφεύγουν ρευστά υπολογίζεται σε 70.000 m².

Νοτίως του λιμένα, κατά μήκος του ίχνους του κανονικού ρήγματος διεύθυνσης BBA-NNΔ έως B-N εντοπίστηκαν δύο περιοχές με έντονη διαφυγή ρευστών από τον πυθμένα, συνολικής έκτασης 8000 m² (εικόνα 7.13). Οι δύο αυτές περιοχές τοποθετούνται στο βόρειο τμήμα του ρήγματος στο οποίο οι σεισμικές τομογραφίες, οι οποίες συλλέχθηκαν ένα χρόνο

πριν από τις ηχογραφίες, έδειξαν την παρουσία θυλάκων αερίων (GP) πολύ κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα και πλούμες αερίων (GPI) στην υδάτινη στήλη (εικόνες 7.8, 7.13).

Εικόνα 7.12. Ηχογραφίες με έντονη ενίσχυση του σήματος στις οποίες φαίνονται πλήθος διαφυγών ρευστών περιφερειακά του κεντρικού μόλου του λιμένα (με γαλάζιο χρώμα απεικονίζεται η υδάτινη στήλη και καφέ χρώμα ο πυθμένας).

Εικόνα 7.13. Ηχογραφίες με έντονη ενίσχυση του σήματος στις οποίες φαίνονται διαφυγές ρευστών πλησίον της επιφανειακής έκφρασης του ρήγματος, σε θέσεις όπου είχαν καταγραφεί πλούμες αερίων (GPI) στις σεισμικές τομές που συλλέχθηκαν ένα χρόνο πριν (με γαλάζιο χρώμα απεικονίζεται η υδάτινη στήλη και καφέ χρώμα ο πυθμένας).

7.2 Οπτική παρατήρηση

Σε έξι θέσεις στην ευρύτερη περιοχή του λιμένα Κατακόλου πραγματοποιήθηκαν καταδύσεις με σκοπό την φωτογράφιση των διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα και επιπλέον τη συλλογή δειγμάτων (εικόνα 7.14). Σε τρεις θέσεις πλησίον του κεντρικού μόλου (εικόνες 7.15, 7.16, 7.17) εντοπίστηκαν φυσαλίδες μεγέθους έως 20cm. Ο πυθμένας σε αυτές τις θέσεις καλύπτεται από ογκόλιθους, οι οποίοι είχαν τοποθετηθεί για την κατασκευή του λιμένα. Ο φυσαλίδες διαφεύγουν διαμέσου των κενών που αφήνουν οι ογκόλιθοι. Στις θέσεις των διαφυγών έχουν σχηματιστεί βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα που σχηματίζουν τα βακτήρια του γένους *Beggiatoa*, τα οποία αποτελούν τυπικές ενδείξεις διαφυγών αερίων από τον πυθμένα (Judd and

Hovland, 2007). Στο κεντρικό σημείο του λιμένα (εικόνα 7.18) εντοπίστηκαν φυσαλίδες διαμέτρου περίπου 2-3cm οι οποίες διαφεύγουν από ιλυώδη πυθμένα. Νότια του λιμένα (εικόνα 6.18), εντοπίστηκαν μικρότερες διαφυγές με φυσαλίδες μεγέθους 1-2cm οι οποίες διαφεύγουν από αμμώδη πυθμένα σχηματίζοντας μικρούς κρατήρες διαμέτρου 4-5cm. Στο βόρειο τμήμα του λιμένα, στο οποίο ο πυθμένας καλύπτεται από αραιές συστάδες *Posidonia oceanica* διαφεύγουν φυσαλίδες διαμέτρου 2-3cm. (εικόνα 7.19). Η οπτική παρατήρηση των φυσαλίδων στα σημεία διαφυγής και η λήψη διαδοχικών φωτογραφιών οδήγησαν σε μια αδρή εκτίμηση του ρυθμού διαφυγής των φυσαλίδων. Οι μικρού μεγέθους φυσαλίδες (1-3cm) φαίνεται να διαφεύγουν με ρυθμό μία/1s ενώ οι μεγαλύτερες με ρυθμό περίπου μία/10s.

Εικόνα 7.14. Χάρτης του Λιμένα στον οποίο σημειώνονται οι θέσεις κατάδυσης και φωτογράφισης των διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα

Εικόνα 7.15. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K1 όπου φαίνονται φυσαλίδες αερίων να διαφεύγουν από τον πυθμένα και βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα να έχουν αναπτυχθεί περιφερειακά του σημείου διαφυγής.

Εικόνα 7.16. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K2, η πρώτη σε στιγμή ηρεμίας, ηρεμίας πριν το σχηματισμό φυσαλίδας και η δεύτερη περίπου 10 δευτερόλεπτα αργότερα όταν μία μεγάλη φυσαλίδα αερίων έχει σχηματιστεί και κινείται ανοδικά. Στη θέση της διαφυγής έχει σχηματιστεί μικρού μεγέθους βακτηριδιακό ινώδες συσσωμάτωμα.

Εικόνα 7.17. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K3 όπου φαίνονται φυσαλίδες αερίων να διαφεύγουν διαμέσου κενού που έχουν αφήσει ογκόλιθοι. Περιφερειακά του σημείου διαφυγής έχουν σχηματιστεί βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα.

Εικόνα 7.18. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K4 όπου φαίνονται μικρές φυσαλίδες αερίων να διαφεύγουν από τον πυθμένα.

Εικόνα 7.19. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K5 όπου φαίνονται μικρές φυσαλίδες αερίων να διαφεύγουν από ένα μικρό κρατήρα στον αμμόδη πυθμένα.

Εικόνα 7.20. Διαδοχικές φωτογραφίες στη θέση κατάδυσης K6 όπου φαίνονται μικρές φυσαλίδες αερίων να διαφεύγουν από ιλυώδη πυθμένα με παρουσία φυτοκάλυψης (*P. oceanica*).

7.3 Γεωχημική διασκόπηση υποθαλάσσιων διαφυγών ρευστών

Μετρήσεις διαλυμένου μεθανίου πραγματοποιήθηκαν με αισθητήρα διαλυμένου μεθανίου (METS) κατά μήκος μιας τραβέρσας από την περιοχή του ρήγματος έως το εσωτερικό του λιμένα του Κατακόλου (εικόνα 7.21). Κατά μήκος αυτής της τραβέρσας εκτελέστηκαν μετρήσεις σε πέντε σταθμούς. Δύο σταθμοί (P1, P2) κατά μήκος του ρήγματος διεύθυνσης BBA-NNΔ έως B-N νοτίως του λιμένα, σε ένα σταθμό (Λ) εντός του λιμένα και σε δύο σταθμούς αναφοράς (ΑΝΦ1, ΑΝΦ2) σε απομακρυσμένες θέσεις από τις περιοχές διαφυγών (εικόνα 7.21). Αυξημένες συγκεντρώσεις μεθανίου βρέθηκαν στη θέση P2, στο βόρειο τμήμα του ρήγματος όπου έχουν καταγραφεί με τον τομογράφο υποδομής πυθμένα και τον ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης σημαντικές διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα (εικόνα. 7.13). Πολύ υψηλές συγκεντρώσεις μεθανίου ($>4.5 \mu\text{mol/l}$) μετρήθηκαν στο εσωτερικό του λιμένα, ξεπερνώντας τελικά τα ανώτερα όρια λειτουργίας του αισθητήρα (εικόνα 7.22).

Εικόνα 7.21. Χάρτης του κόλπου του Κατακόλου στον οποίο σημειώνονται οι θέσεις μετρήσεων με αισθητήρα μεθανίου και η πορεία του σκάφους που ακολουθήθηκε.

Εικόνα 7.22. Διάγραμμα διαλυμένου μεθανίου με το χρόνο κατά μήκος της τραβέρσας που παρουσιάζεται στον χάρτη της εικόνας 7.23. Η χρονική περίοδος των μετρήσεων σε κάθε σταθμό σημειώνεται με διαφορετικό χρώμα.

Επιπλέον των μετρήσεων διαλυμένου μεθανίου στην υδάτινη στήλη, συλλέχθηκαν δείγματα φυσαλίδων από τη θέση κατάδυσης K1 (εικόνες 7.18, 7.19). Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων των φυσαλίδων δίνονται στον πίνακα 7.1. Οι φυσαλίδες

αποτελούνται κατά κύριο λόγο από μεθάνιο (40%), ενώ σχετικά υψηλές τιμές παρουσιάζουν το αιθάνιο (0.72%) και το προπάνιο (0.15%). Σημαντική επίσης είναι η συγκέντρωση υδροθείου (0.23%), η οποία δικαιολογεί και τον σχηματισμό βακτηριδιακών ινιδίων συσσωματωμάτων (bacterial mats) στην περιοχή εξόδου των φουσαλίδων από τον πυθμένα προς την υδάτινη στήλη.

Πίνακας 7.1. Χημική ανάλυση του δείγματος από τη θέση K1 (συγκέντρωση %).

Θέση	Δείγμα	CH ₄	H ₂ S	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	C ₅	C ₆ +	He	Ar	O ₂	CO ₂	N ₂
K1 Λιμένας Κατακόλου (υποθαλάσσια θέση)	Φουσαλίδες	40	0.23	0.722	0.154	0.045	nd	nd	0.0214	0.011	0.52	10.94	2.42	45.10

7.4 Γεωχημική διασκόπηση χερσαίων διαφυγών

Μετρήσεις της ροής και χημικές αναλύσεις των αερίων πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του λιμένα του Κατακόλου και στη χερσαία θέση διαφυγής «Φάρος».

Οι μετρήσεις της ροής των αερίων πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο του κλειστού θαλάμου (Klusman et al., 2000; Etiope et al., 2004) (εικόνα 7.23). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 7.2 (Etiope et al., 2005; 2006). Οι μέγιστες τιμές ροής αερίων προσεγγίζουν τα 285000 και 165000 mg /m² d στην περιοχή του Φάρου και του Λιμένα αντίστοιχα.

Εικόνα 7.23. Μέτρηση ροής αερίων με τη μέθοδο του κλειστού θαλάμου στην περιοχή του φάρου.

Στην περιοχή του λιμένα οι διαφυγές διαπερνούν και καταστρέφουν τον ασφάλτινο δρόμο και το πεζοδρόμιο σε δύο κυρίως θέσεις, στο κτήριο του καταστήματος αφορολογήτων στον προβλήτα του λιμένα (εικόνα 7.24α) και στο κτήριο του Τελωνείου (εικόνα 7.24β). Οι μεγαλύτερες τιμές ροής εντοπίστηκαν στον προβλήτα (165000 mg /m² d) ενώ σε απόσταση

περίπου 30 μέτρων από τις διαφυγές οι τιμές της ροής παρουσίασαν σημαντική μείωση ($44-450 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) (πίνακας 7.2).

Η χημική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε ένα δείγμα που συλλέχθηκε από την περιοχή στάθμευσης του λιμένα έδειξε ότι το αέριο συνίσταται κυρίως από μεθάνιο με υψηλές τιμές υδροθείου ενώ επιπλέον παρουσίασε υψηλό βαθμό μείξης με τον ατμοσφαιρικό αέρα, σύμφωνα με τις υψηλές τιμές οξυγόνου και αζώτου (πίνακας 7.3). Χημική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε επί τόπου, με φορητό αέριο χρωματογράφο και χρωματομετρικούς σωλήνες, επιβεβαίωσε την παραπάνω ανάλυση καθώς έδειξε ότι οι διαφυγές αποτελούνται κυρίως από μεθάνιο με υψηλές τιμές υδροθείου (πίνακας 7.3).

Εικόνα 7.24. Διαβρώσεις και βλάβες (α) στο ασφάλτινο κάλυμμα στον προβλήτα του λιμένα και (β) στο κτήριο του τελωνείου, αποτέλεσμα της διαφυγής των αερίων.

Στην περιοχή του «Φάρου» οι μετρήσεις της ροής περιορίστηκαν σε μία γραμμική περιοχή με εμβαδόν 800 m^2 όπου απουσιάζει η φυτοκάλυψη και το έδαφος συνίσταται από ιλυώδες/λασπώδες υλικό (εικόνα 7.25). Οι μετρήσεις ροής έδειξαν πολύ υψηλές τιμές, τάξεως $10^5 \text{ mg / m}^2 \text{ d}$, στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, όπου οι διαφυγές μπορούσαν να διατηρούν ακόμη και μικρές φωτιές (πίνακας 7.2). Η ροή των αερίων μειώνεται σημαντικά ($260-7100 \text{ mg / m}^2 \text{ d}$) ακτινωτά από τη κεντρική περιοχή διαφυγής (πίνακας 7.2). Επιτόπια χημική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην κεντρική περιοχή του «Φάρου», έδειξε ότι οι διαφυγές αποτελούνται κυρίως από μεθάνιο (πίνακας 7.3).

Πίνακας 7.2. Μετρήσεις ροής αερίων στον λιμένα και στο «Φάρο» Κατακόλου.

Περιοχή	Θέση	Αριθμός μετρήσεων	Ροή ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
Λιμένας (χερσαίες θέσεις)	Προβλήτα – κεντρικός μόλος	1	165000
	Τελωνείο	3	5600 -4800 -6900
	Περιοχή στάθμευσης	2	57000 - 80000
	>30 m μακριά από τις διαφυγές	3	44 - 365 - 450
Φάρος	Περιοχή μακροδιαφυγής	5	6800 - 285000
	10, 30 και 90m από την περιοχή μακροδιαφυγής	3	7100 - 650 - 260

Εικόνα 7.25. Η περιοχή διαφυγών αερίων στην περιοχή του «Φάρου» Κατακόλου.

Πίνακας 7.3. Χημικές αναλύσεις των δειγμάτων αερίων που συλλέχθηκαν στον λιμένα και στο «Φάρο» Κατακόλου (συγκέντρωση %)

Θέση	Δείγμα	CH ₄	H ₂ S	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	C ₅	C ₆ +	He	Ar	O ₂	CO ₂	N ₂
Λιμένας χερσαίο	Αέριο στο έδαφος (10cm)	9.3	0.005	0.135	0.006	0.002	nd	nd	0.0105	0.003	0.84	18.97	0.86	69.88
	Διαφυγή*	85	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.12	-
Φάρος	Διαφυγή *	94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*Επί τόπου αναλύσεις με φορητό GC-FID (CH₄) και χρωματομετρικούς σωλήνες (H₂S and CO₂); nd: μη ανιχνεύσιμο

7.5 Προέλευση των ρευστών

Σε δείγματα αερίων που συλλέχθηκαν τόσο από τις υποθαλάσσιες διαφυγές ρευστών (φυσαλίδες) όσο και από το έδαφος πραγματοποιήθηκαν χημικές και ισοτοπικές αναλύσεις (πίνακας 7.4).

Πίνακας 7.4. Ισοτοπική ανάλυση των δειγμάτων.

Θέση	Δείγμα	δ ¹³ C ₁ ‰	δDC ₁ ‰
Λιμένας Υποθαλάσσια	Φυσαλίδες	-36.11	-140.1
Λιμένας χερσαίο	Αέριο στο έδαφος (10cm)	-31.25	-135.5

Σύμφωνα με την τοποθέτηση των ισοτοπικών αποτελεσμάτων στα διαγράμματα ισοτόπων άνθρακα-υδρογόνου και 'Bernard' (Whiticar, 1999), το μεθάνιο που διαφεύγει τόσο από τη θάλασσα όσο και από τη χέρσο είναι θερμογενούς προελεύσεως (εικόνα 7.26, 7.27). Τα

αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα των Kamberis et al., 2000, οι οποίοι ανέλυσαν αέριο που συλλέχθηκε από μία γεώτρηση σε βάθος 2376m. Οι διαφυγές των αερίων στην περιοχή του Κατακόλου έχουν υψηλότερο λόγο $C_1/(C_2+C_3)$ από το δείγμα της βαθιάς γεώτρησης ως αποτέλεσμα της μετανάστευσης τους. Το αέριο που συλλέχθηκε από το έδαφος παρουσιάζει ελαφρά υψηλότερη τιμή $\delta^{13}C$ σε σχέση με αυτό του υποθαλάσσιου δείγματος, γεγονός που πιθανώς οφείλεται στην παρουσία μεθανο-οξειδωτικών βακτηρίων που αναπτύσσονται στο έδαφος και τα οποία έχουν την τάση να καταναλώνουν μεγαλύτερη ποσότητα $\delta^{12}C$ σε σχέση με το $\delta^{13}C$.

Εικόνα 7.26. Διάγραμμα ισοτόπων άνθρακα-υδρογόνου, όπου έχουν τοποθετηθεί τα αποτελέσματα των ισοτοπικών αναλύσεων από την περιοχή του Κατακόλου.

Εικόνα 7.27. Διάγραμμα 'Bernard' όπου έχουν τοποθετηθεί τα αποτελέσματα των ισοτοπικών αναλύσεων από την περιοχή του Κατακόλου.

7.5.1 Μεθάνιο

Σύμφωνα με τα παραπάνω το μεθάνιο που διαφεύγει από τον πυθμένα και το έδαφος στην περιοχή του Κατακόλου είναι θερμογενούς προέλευσης, το οποίο προέρχεται από τα Μεσοζωικά ταμιευτήρες υδρογονανθράκων. Από τα ισοτοπικά αποτελέσματα (εικόνα 7.27) φαίνεται ότι το μεθάνιο προέρχεται από σαπροπηλικά κηρογενή (τύπος II) τα οποία έχουν υποστεί καταγένεση. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με ένα μέρος των αναλύσεων των Kamberis et al. (2000) (μόνο για το δείγμα που συλλέχθηκε από γεώτρηση σε βάθος 2376m) αλλά και με τις αναλύσεις του οργανικού υλικού των ασβεστόλιθων που έγιναν από τους Rigakis and Karakitsios (1998). Βιογενές μεθάνιο μικροβιακής προέλευσης που βρέθηκε στις ακολουθίες Νεογενών κλαστικών ιζημάτων δεν φαίνεται να συνεισφέρει στις επιφανειακές διαφυγές.

7.5.2 Υδροόθειο

Το μεθάνιο λειτουργεί ως αέριο μεταφοράς για το υδρόθειο, του οποίου η προέλευση σχετίζεται με τα κηρογενή, το πετρέλαιο και/ή τους σχηματισμούς ανυδρίτη. Γενικά, το υδρόθειο σε πετρελαϊκούς ταμιευτήρες μπορεί να προέρχεται από τρεις διεργασίες: τη βακτηριδιακή θειική αναγωγή, τη θερμική αποσύνθεση των θειικών συστατικών στα κηρογενή ή στα πετρέλαια, και τη θερμοχημική θειική αναγωγή (TSR). Η βακτηριδιακή θειική αναγωγή και η θερμική αποσύνθεση των θειικών συστατικών οδηγεί γενικά σε μικρά ποσοστά υδρόθειου στα αέρια (<3-5%). Η θερμοχημική θειική αναγωγή είναι η μόνη διεργασία που μπορεί να οδηγήσει μεγαλύτερες ποσότητες υδρόθειου και είναι μία συνήθης διεργασία στην παρουσία εβαποριτών σε επαφή με ασβεστόλιθους σε θερμοκρασίες >120°C (Worden et al., 1995), αλλά και σε μικρότερες θερμοκρασίες (80 °C) (Hunt, 1996; Noth, 1997). Η βασική αντίδραση της διεργασίας TSR είναι (Worden and Smalley, 1996):

Η κυρίαρχη αντίδραση περιλαμβάνει το μεθάνιο:

Οι μεγάλες ποσότητες υδρόθειου στους Ιουρασικούς ασβεστόλιθους της Ιόνιας ζώνης (10% σε βάθος 2500m) (Kamberis et al., 2000) και η παρουσία ανυδρίτη είναι σύμφωνη με την προέλευση του υδρόθειου από θερμοχημική θειική αναγωγή. Η γεωθερμική βαθμίδα στην περιοχή είναι 2 °C/100m, συνεπώς σε βάθος 2500m, στα ανώτερα σημεία των διαπυρικών δομών η θερμοκρασία είναι 70 °C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές για τη διεργασία σε αυτό το βάθος, αλλά πιθανώς το υδρόθειο να σχηματίζεται βαθύτερα σε επαφές ανυδρίτη-ασβεστόλιθου όπου οι συνθήκες θερμοκρασίας είναι ιδανικές και στη

συνέχεια να μεταναστεύει στη θέση όπου βρίσκεται. Η συνεισφορά της θερμικής αποσύνθεσης των θειικών συστατικών του κηρογενούς ή του πετρελαίου δεν μπορεί να παραβλεφθεί. Το σαπροπηλικό κηρογενές, το οποίο είναι υπεύθυνο για το σχηματισμό των υδρογονανθράκων, περιέχει περισσότερο θείο σε σχέση τα κηρογενή (τύπου IV) των κλαστικών νεογενών ιζημάτων. Τα ανθρακικά πετρώματα δεν έχουν αρκετό σίδηρο ώστε να αποβάλλουν το υδρόθειο ως πυρίτη (Worden and Smalley, 1996), αντίθετα τα νεογενή ιζήματα, τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν υδρόθειο με βακτηριδιακή αναγωγή, έχουν τουλάχιστον 12 φορές περισσότερο σίδηρο, με αποτέλεσμα τη μεγάλη μείωση του υδρόθειου σε αυτά. Τα παραπάνω ενισχύουν την άποψη ότι οι διαφυγές υδρόθειου, ανεξάρτητα από τη γένεση τους, σχετίζονται με το θερμογενές μεθάνιο.

7.6 Μετανάστευση ρευστών και αλατούχος διαπυρισμός

Σύμφωνα με τους Kamberis et al. (2000b) από την ανάλυση βαθιών σεισμικών τομογραφιών, οι διαπυρικές δομές στη χερσόνησο του Κατακόλου περιορίζονται στα δυτικά από ένα προς τα ανατολικά βυθιζόμενο ανάστροφο ρήγμα. Οι διαπυρικές δομές είναι ενεργές, επηρεάζοντας τις υπερκείμενες ακολουθίες και σχηματίζοντας κανονικά ρήγματα, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ΔΒΔ-ΑΝΑ δομών εφελκυσμού (Koukouvelas et al., 1996). Στην χερσόνησο του Κατακόλου, τα ρήγματα διεύθυνσης Β-Ν που χαρτογραφήθηκαν στη βάση των νεογενών ιζημάτων και τα νεοτεκτονικά κανονικά ρήγματα διεύθυνσης ΒΒΑ/ΝΝΔ έως Β-Ν και ΒΑ-ΝΔ και ΔΒΔ-ΑΝΑ φαίνεται να συγκροτούν μία ιδανική δίοδο μετανάστευσης των αερίων από τους Ιουρασικούς ασβεστόλιθους και τους Τριαδικούς ανυδρίτες προς την επιφάνεια.

Η άποψη αυτή ενισχύεται από το γεγονός ότι οι υποθαλάσσιες και χερσαίες διαφυγές στην περιοχή του Κατακόλου συσχετίζονται με κύριες τεκτονικές δομές (εικόνα 7.28). Συγκεκριμένα: (α) εντοπίστηκαν σημαντικές υποθαλάσσιες διαφυγές ρευστών, νοτίως του λιμένα, κατά μήκος ενός κανονικού ρήγματος διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΔ έως Β-Ν, (β) μεγάλες χερσαίες διαφυγές αερίων εντοπίστηκαν στην περιοχή του «Φάρου» κατά μήκος ενός ρήγματος διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ, και (γ) οι χερσαίες και υποθαλάσσιες διαφυγές ρευστών στην περιοχή του λιμένα του Κατακόλου τοποθετούνται σε μια περιοχή όπου συντρέχουν τέσσερα κανονικά ρήγματα, τρία ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ και ΑΒΑ-ΔΝΔ που χαρτογραφήθηκαν στη χέρσο (Kamberis et al., 2000a) και ένα υποθαλάσσιο διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΔ έως Β-Ν (εικόνα 7.28). Η μετανάστευση και η διαφυγή ρευστών κατά μήκος ρηγμάτων έχει διαπιστωθεί από πολλούς ερευνητές (Kuşçu et al., 2005; Geli et al., 2008; Hovland et al., 1996; Judd and Hovland 2007; Soderberg and Floden, 1989; Acosta et al., 2001).

Εικόνα 7.28. Χάρτης του Κατακόλλου στον οποίο έχουν αποτυπωθεί οι θαλάσσιες και χερσαίες περιοχές διαφυγών ρευστών σε σχέση με τα κύρια ρήγματα της ευρύτερης περιοχής. (τα ρήγματα στη χέρσο προέρχονται από τους Kamberis et al., 2000a).

7.7 Εκτίμηση ποσότητας μεθανίου που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα

Ο υπολογισμός της ροής μεθανίου από τον θαλάσσιο πυθμένα προς την υδάτινη στήλη και στη συνέχεια προς την ατμόσφαιρα βασίστηκε στα δεδομένα του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης και συγκεκριμένα (α) στον αριθμό των θέσεων όπου εντοπίστηκαν διαφυγές φυσαλίδων, (β) στην εκτίμηση του ρυθμού διαφυγής των φυσαλίδων και (γ) στο μέγεθος τους. Για την εκτίμηση του αριθμού των θέσεων διαφυγών φυσαλίδων η περιοχή χωρίστηκε σε περιοχές («κελιά») διαστάσεων 20X20 μέτρα (κάνναβος 20X37 κελιά) (εικόνα 7.29). Σε κάθε κελί μετρήθηκαν οι διαφυγές κατά μήκος των πορειών (εικόνα 7.29) και το συνολικό μήκος των πορειών ηχοβολιστή πλευρική σάρωσης (εικόνα 7.30). Σύμφωνα με αυτό υπολογίστηκε η μέση απόσταση των διαφυγών κατά μήκος της πορείας του ηχοβολιστή. Εάν θεωρηθεί για

κάθε κελί ότι η μέση απόσταση των διαφυγών κατά μήκος της πορείας του σκάφους είναι η ίδια με τη μέση απόσταση των διαφυγών κάθετα της πορείας τότε προκύπτει η πυκνότητα των διαφυγών ανά κελί και συνεπώς ο συνολικός αριθμός των διαφυγών ανά κελί (εικόνα 7.31). Η άθροιση όλων των επιμέρους συνολικών διαφυγών ανά κελί οδηγεί στον εκτιμώμενο αριθμό διαφυγών για όλη την περιοχή οποίος ανέρχεται σε 2732 θέσεις διαφυγών φυσαλίδων.

Εικόνα 7.29. Χάρτης του λιμένα Κατακόλου, στον οποίο παρουσιάζεται ο διαχωρισμός της περιοχής σε κελιά διαστάσεων 20x20m και ο αριθμός των διαφυγών κατά μήκος της πορείας του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης σε κάθε κελί.

Εικόνα 7.30. Χάρτης του λιμένα Κατακόλου, στον οποίο παρουσιάζεται ο διαχωρισμός της περιοχής σε κελιά διαστάσεων 20x20m και το συνολικό μήκος των πορειών του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης ανά κελί.

Εικόνα 7.31. Χάρτης του λιμένα Κατακόλου, στον οποίο παρουσιάζεται ο διαχωρισμός της περιοχής σε κελιά διαστάσεων 20x20m και ο αριθμός των διαφυγών σε κάθε κελί.

Για την εκτίμηση του μεγέθους και του ρυθμού διαφυγής των φυσαλίδων προτάθηκαν διάφοροι συνδυασμοί σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την οπτική παρατήρηση των διαφυγών. Η κάθε φυσαλίδα θεωρήθηκε ότι περιέχει 40% μεθάνιο, όπως προέκυψε από τη χημική ανάλυση που δίνεται στον πίνακα 6.1, ενώ η πυκνότητα του αερίου μεθανίου θεωρήθηκε ίση με 0.716 kg/m^3 (Judd et al., 1997). Επίσης υπολογίστηκε η διάχυση του μεθανίου προς την υδάτινη στήλη σύμφωνα με τα μοντέλα διάχυσης των Leifer and Patro (2002). Σύμφωνα με τα παραπάνω υπολογίστηκε η ροή μεθανίου για έξι πιθανές περιπτώσεις (πίνακας 7.5):

- Μέσο μέγεθος φυσαλίδων διαμέτρου 1cm και ρυθμός διαφυγής φυσαλίδων προς την υδάτινη στήλη 1 φυσ./s.
- Μέσο μέγεθος φυσαλίδων διαμέτρου 1cm και ρυθμός διαφυγής φυσαλίδων στην υδάτινη στήλη 1 φυσ./10s.
- Μέσο μέγεθος φυσαλίδων διαμέτρου 5cm και ρυθμός διαφυγής φυσαλίδων στην υδάτινη στήλη 1 φυσ./s.

- Μέσο μέγεθος φυσαλίδων διαμέτρου 5cm και ρυθμός διαφυγής φυσαλίδων στην υδάτινη στήλη 1 φυσ./10s.
- Μέσο μέγεθος φυσαλίδων διαμέτρου 10cm και ρυθμός διαφυγής φυσαλίδων στην υδάτινη στήλη 1 φυσ./s.
- Μέσο μέγεθος φυσαλίδων διαμέτρου 10cm και ρυθμός διαφυγής φυσαλίδων στην υδάτινη στήλη 1 φυσ./10s.

Πίνακας 7.5. Εκτίμηση της ποσότητας μεθανίου που διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα από την υποθαλάσσια περιοχή του λιμένα Κατακόλου

Συνολικός αριθμός θέσεων διαφυγής	Διάμετρος φυσαλίδων (cm)	Ρυθμός διαφυγής φυσαλίδων (sec)	Ποσότητα μεθανίου ανά θέση διαφυγής και ανά έτος (m ³ /year)	Ποσότητα μεθανίου που διαφεύγει από τον πυθμένα προς την υδάτινη στήλη από το σύνολο των θέσεων (T/year)	Ποσοστό μεθανίου που φτάνει στην ατμόσφαιρα % (Leifer and Patro, 2002)	Ποσότητα μεθανίου προς την ατμόσφαιρα ανά έτος (T/year)
2732	1	1	6.60	12.6	80	10.1
	1	0.1	0.66	1.3	80	1.05
	5	1	825.19	1578.1	95	1500
	5	0.1	82.52	157.8	95	150
	10	1	6601.54	12624.8	≈100	12624
	10	0.1	660.15	1262.5	≈100	1262

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ποσότητα του μεθανίου που διαφεύγει από το θαλάσσιο χώρο του λιμένα Κατακόλου προς την ατμόσφαιρα κυμαίνεται από 1 έως 12624 τόνους το χρόνο. Σύμφωνα με την οπτική παρατήρηση των διαφυγών κατά τις οποίες εντοπίστηκαν φυσαλίδες με διάμετρο από 1cm έως και 20cm με ρυθμούς διαφυγής που κυμαίνονται από μία φυσαλίδα ανά δευτερόλεπτο και σε κάποιες θέσεις ίσως και μεγαλύτερος, έως μία φυσαλίδα ανά δέκα δευτερόλεπτα για τις μεγαλύτερες σε μέγεθος μπορεί να υποστηριχθεί ότι οι πλησιέστερες παράμετροι προς τις πραγματικές συνθήκες είναι: (α) μέσο μέγεθος φυσαλίδας διαμέτρου 5cm με μέσο ρυθμό διαφυγής 1 φυσαλίδα ανά δευτερόλεπτο και (β) μέσο μέγεθος φυσαλίδας 10cm με μέσο ρυθμό διαφυγής 1 φυσαλίδα ανά 10 δευτερόλεπτα. Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι η ποσότητα του μεθανίου που διαφεύγει από την υποθαλάσσια περιοχή του λιμένα Κατακόλου προς την ατμόσφαιρα κυμαίνεται μεταξύ 1262 και 1500 τόνων το χρόνο.

Συγκρίνοντας τις εκτιμήσεις προσφοράς μεθανίου από το θαλάσσιο πυθμένα με άλλες περιοχές όπου έχουν καταγραφεί ψυχρές διαφυγές (cold seeps) αέριων υδρογονανθράκων (πίνακας 6.6) προκύπτει ότι η περιοχή του λιμένα Κατακόλου παρουσιάζει μεγαλύτερη αλλά συγκρίσιμη προσφορά μεθανίου με τις περιοχές Tommeliten στη Βόρεια θάλασσα (περίπου 673 t/year) (Hovland et al., 1993), Golden Sands στην υφαλοκρηπίδα της Βουλγαρίας στη Μαύρη Θάλασσα (περίπου 930 t/year) (Dimitrov, 2002), αλλά υπολείπεται από την περιοχή Coal Oil Point στην Καλιφόρνια (περίπου 7200 t/year) (Hovland et al., 1993) (πίνακας 7.6).

Πίνακας 7.6. Εκτιμήσεις διαφυγής μεθανίου από περιοχές ψυχρών διαφυγών αέριων υδρογονανθράκων.

Περιοχή	Διαφυγής Μεθανίου (σε t/year)	Μέθοδος εκτίμησης	Αναφορά
Golden Sands - Υφαλοκρηπίδα Βουλγαρίας στη Βόρεια Θάλασσα	930	Γεωφυσική διερεύνηση αριθμού διαφυγών, κινηματογράφηση διαφυγών Μέτρηση ροής με ανάστροφο χωνί και συλλογή του αερίου, χημική ανάλυση αερίων	Dimitov, 2002
Coal Oil Point Καλιφόρνια ΗΠΑ	7200	Γεωφυσική διερεύνηση αριθμού διαφυγών, Μέτρηση ροής με ανάστροφες πυραμυδικές κατασκευές, συλλογή του αερίου, χημική ανάλυση αερίων	Hovland et al., 1993
Tommeliten Βόρεια Θάλασσα	672	Γεωφυσική διερεύνηση αριθμού διαφυγών, εκτίμηση ροής σε μία από τις 120 διαφυγές με κινηματογράφηση από ROV και χημική ανάλυση αερίων	Hovland and Judd, 1998; Hovland et al., 1993
Λιμένας Κατακόλου	1262-1500	Γεωφυσική διερεύνηση αριθμού διαφυγών, φωτογράφηση διαφυγών και χημική ανάλυση αερίων	Παρούσα εργασία

Επίσης συγκρίνοντας την ποσότητα μεθανίου που διαφεύγει από το λιμένα Κατακόλου με την ποσότητα μεθανίου που διαφεύγει από την περιοχή του «Φάρου» Κατακόλου (10 t/year σε έκταση 1000m²) (Etiope, 2009; ΕΘΑΓΕΦΩ αδημοσίευτα δεδομένα), λαμβάνοντας υπόψη την έκταση όπου εντοπίστηκαν διαφυγές στις δύο περιοχές προκύπτει ότι η περιοχή του λιμένα παρουσιάζει προσφορά μεθανίου 1262-1500 τόνους το χρόνο σε έκταση 70000m² ή ροή 18-21 tonnesCH₄/1000m².year η οποία είναι συγκρίσιμη με τη ροή από τη θέση Φάρου 10 tonnesCH₄/1000m².year.

7.8 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαφυγών στην ευρύτερη περιοχή

Οι διαφυγές ρευστών στην περιοχή του Κατακόλου αποτελούν μία γεωλογική επικινδυνότητα τόσο για τον άνθρωπο, όσο και τις κατασκευές στην περιοχή του Λιμένα (Etiope et al., 2005; Christodoulou et al., 2006). Η υψηλή συγκέντρωση μεθανίου μπορεί να προκαλέσει έκρηξη ή πυρκαγιά όταν υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες (5-10% μεθάνιο), τιμές που μετρήθηκαν στην περιοχή του Λιμένα. Οι υποθαλάσσιες διαφυγές και η παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα επιφανειακά ιζήματα (πλούμες αερίων κοντά στην επιφάνεια) μπορούν να προκαλέσουν έκρηξεις κατά τη διάρκεια γεωτρήσεων ή να καταστρέψουν θαλάσσιες κατασκευές (Judd and Hovland, 2007).

Το υδρόθειο είναι το πιο επικίνδυνο και τοξικό γεωρευστό. Χαρακτηρίζεται ως χημικό ασφυξιογόνο καθώς αντιδρά άμεσα με την αιμοσφαιρίνη στο αίμα, και σταματάει την τροφοδοσία με οξυγόνο των ζωτικών οργάνων του ανθρώπου και των ζώων. Η χαρακτηριστική οσμή του υδρόθειου (σαν κλούβιο αυγό) είναι εύκολα ανιχνεύσιμη σε χαμηλές συγκεντρώσεις, αλλά σε υψηλότερες συγκεντρώσεις παραλύει την αίσθηση της μυρωδιάς. Γενικά 10ppmv H₂S προκαλούν ερεθισμό στα μάτια, 200-300 ppmv φλεγμονές στα μάτια και δυσκολία στο

αναπνευστικό μετά από έκθεση μίας ώρας, 500-700 ppmv μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια των αισθήσεων και πιθανό θάνατο μετά από έκθεση 30-60 λεπτών, ενώ 1000 ppmv προκαλούν διαφραγματική παράλυση με την πρώτη αναπνοή και ασφυξία (W.H.O., 2003). Οι μετρήσεις υδρόθειου στις διαφυγές στον λιμένα με τιμές που έφτασαν τα 200 ppmv κατά την περίοδο των μετρήσεων δείχνουν ότι θα πρέπει να υπάρξει μεγάλη προσοχή και πολύ καλός αερισμός των κλειστών χώρων του τελωνίου και καταστήματος αφορολογήτων.

7.9 Επιμέρους Συμπεράσματα

Στην περιοχή του Κατακόλου είχαν αναφερθεί από τους Kamberis et al. (2000a) διαφυγές ρευστών στην θέση «Φάρος» και στην περιοχή του Λιμένα. Θαλάσσιες γεωφυσικές έρευνες εκτελέστηκαν στον κόλπο του Κατακόλου με σκοπό τον εντοπισμό ενδείξεων παρουσίας διαφυγών ρευστών και τη διερεύνηση της χωρικής τους έκτασης. Επίσης πραγματοποιήθηκε γεωχημική διασκόπηση τόσο στην θαλάσσια όσο και στη χερσαία περιοχή ώστε να διερευνηθεί η σύσταση, η προέλευση και η ποσότητα των ρευστών που διαφεύγουν από την περιοχή.

Η μελέτη των σεισμικών τομογραφιών έδειξε των ύπαρξη στην περιοχή διαφόρων ακουστικών χαρακτήρων, οι οποίοι αποτελούν άμεσες και έμμεσες ενδείξεις για την παρουσία αέριας φάσης στα ρευστά των πόρων των ιζημάτων. Πλησίον των ακτογραμμών της χερσονήσου του Κατακόλου και σε βάθη 5 έως 30m, εντοπίστηκε και χαρτογραφήθηκε ένα κανονικό ρήγμα διεύθυνσης BBA-NNΔ έως B-N. Στον πόδα του ρήγματος εμφανίζονται Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα ενώ η οροφή χαρακτηρίζεται από μια σεισμική ακολουθία με ασυνεχείς, ασαφείς και ασθενείς εσωτερικές σεισμικές ανακλάσεις, το πάχος της οποίας είναι μεγαλύτερο από τη διεισδυτική ικανότητα του τομογράφου υποδομής πυθμένα 3.5kHz με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο προσδιορισμός του άλματος του ρήγματος. Σεισμικές τομογραφίες που συλλέχθηκαν εγκάρσια στη διεύθυνση του ρήγματος έδειξαν την παρουσία ενδείξεων παρουσίας αέριας φάσης στα ρευστά της σεισμικής ακολουθίας της οροφής του ρήγματος, ενώ κατά μήκος του ρήγματος και κυρίως στο βόρειο άκρο του, διαπιστώθηκε η άνοδος των ενδεικτικών ακουστικών χαρακτήρων κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα και την εμφάνιση πλουμών αερίων στην υδάτινη στήλη. Η ηχοβολιστική διερεύνηση της παρουσίας διαφυγών ρευστών με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης έδειξε στην ίδια περιοχή έντονες διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα. Η ύπαρξη διαφυγών ρευστών από το συγκεκριμένο τμήμα του ρήγματος επιβεβαιώθηκε με επιτόπιες μετρήσεις διαλυμένου μεθανίου με αισθητήρα μεθανίου, στις οποίες μετρήθηκαν πολύ υψηλότερες τιμές διαλυμένου μεθανίου στην υδάτινη στήλη σε σχέση με το νοτιότερο τμήμα του ρήγματος και με απομακρυσμένες θέσεις από το ρήγμα.

Η ηχοβολιστική διερεύνηση ύπαρξης διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα του Λιμένα Κατακόλου με ηχοβολιστική πλευρικής σάρωσης έδειξε μια εκτεταμένη περιοχή σημαντικών διαφυγών που εντοπίζεται περιφερειακά του κεντρικού μώλου του λιμένα, τέσσερις περιοχές βορειοανατολικά του κεντρικού μώλου και μία μικρότερης έκτασης βορειοανατολικά του κυματοθραύστη. Η συνολική έκταση του πυθμένα του λιμένος από την οποία διαφεύγουν

ρευστά υπολογίζεται σε 70.000 m². Οι ισχυρές διαφυγές που εντοπίστηκαν περιφερειακά του κεντρικού μόλου πιθανώς να ενισχύονται από την επίδραση του φορτίου της κατασκευής στην χωρική κατανομή των διαφυγών. Η οπτική παρατήρηση σε έξι θέσεις διαφυγών στην περιοχή του λιμένα έδειξε την διαφυγή φυσαλίδων διαμέτρου από 1 έως 20 cm με τις μικρού μεγέθους φυσαλίδες (1-3cm) να διαφεύγουν με ρυθμό μία/1s ενώ οι μεγαλύτερες με ρυθμό περίπου μία/10s. Στις θέσεις περιφερειακά του κεντρικού μόλου, όπου παρατηρήθηκαν και οι μεγαλύτερης διαμέτρου φυσαλίδες έχουν σχηματιστεί βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα που σχηματίζουν τα βακτήρια του γένους *Beggiatoa*, τα οποία αποτελούν τυπικές ενδείξεις διαφυγών αερίων από τον πυθμένα (Judd and Hovland, 2007).

Στο χερσαίο τμήμα του λιμένα οι διαφυγές διαπερνούν και καταστρέφουν τον ασφάλτινο δρόμο και το πεζοδρόμιο σε δύο κυρίως θέσεις, στο κτήριο του καταστήματος αφορολογήτων στον προβλήτα του λιμένα και στο κτήριο του Τελωνείου σε θέσεις όπου μετρήθηκαν υψηλές τιμές ροής αερίων από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα. Η χημική ανάλυση των ρευστών που διαφεύγουν από το υποθαλάσσιο και χερσαίο τμήμα του λιμένα έδειξε ότι τα ρευστά αποτελούνται κατά κύριο λόγο από αέριους υδρογονάνθρακες και κυρίως μεθάνιο, ενώ σημαντική είναι και η ποσότητα του υδροθείου.

Στην περιοχή του «Φάρου» οι μετρήσεις της ροής έδειξαν πολύ υψηλές τιμές, τάξεως 10⁵ mg/m² d, σε μία γραμμική περιοχή, κατά μήκος ενός ρήγματος διεύθυνσης BA-NΔ, όπου απουσιάζει η φυτοκάλυψη και το έδαφος συνίσταται από ιλυώδες/λασπώδες υλικό, ενώ στο κεντρικό τμήμα αυτής της περιοχής οι διαφυγές μπορούσαν να διατηρούν ακόμη και μικρές φωτιές. Επιτόπια χημική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην κεντρική περιοχή του «Φάρου», έδειξε ότι οι διαφυγές αποτελούνται κυρίως από μεθάνιο.

Οι έντονες διαφυγές ρευστών που παρατηρήθηκαν στην περιοχή του Λιμένα Κατακόλου (υποθαλάσσια και στις εγκαταστάσεις του λιμένα), στην χερσαία περιοχή του «Φάρου» Κατακόλου και στην υποθαλάσσια περιοχή, νότια του λιμένα, φαίνεται να συνδέονται με την παρουσία κανονικών ρηγμάτων, στην περιοχή του Φάρου με ένα BA-NΔ διεύθυνσης ρήγμα, νότια του λιμένα με ένα υποθαλάσσιο BBA-NNΔ έως B-N διεύθυνσης ρήγμα, ενώ η περιοχή του λιμένα με την πιθανή συνέχεια τόσο του υποθαλασσίου ρήματος ή και τη διασταύρωση του με τα ρήματα διεύθυνσης BA-NΔ και ABA-ΔNΔ που υπάρχουν στη χέρσο (Kamberis et al., 2000a).

Συμπερασματικά στην περιοχή του Κατακόλου οι ενεργές διαπυριικές δομές που επηρεάζουν τις υπερκείμενες ακολουθίες και σχηματίζοντας κανονικά ρήγματα, όπως τα ρήγματα διεύθυνσης B-N που χαρτογραφήθηκαν στη βάση των νεογενών ιζημάτων (Kamberis et al., 2000a) και τα νεοτεκτονικά κανονικά ρήγματα διεύθυνσης BBA/NNΔ έως B-N, BA-

ΝΔ και ΔΒΔ-ΑΝΑ φαίνεται να συγκροτούν μία ιδανική δίοδο μετανάστευσης των αερίων από τους Ιουρασικούς ασβεστόλιθους και τους Τριαδικούς ανυδρίτες προς την επιφάνεια. Η μετανάστευση και η διαφυγή ρευστών κατά μήκος ρηγμάτων έχει διαπιστωθεί από πολλούς ερευνητές (Kuşçu et al., 2005; Geli et al., 2008; Hovland et al., 1996; Judd and Hovland 2007; Soderberg and Floden, 1989; Acosta et al., 2001).

Οι ισοτοπικές αναλύσεις άνθρακα και υδρογόνου του μεθανίου των ρευστών των υποθαλάσσιων και χερσαίων διαφυγών έδειξαν ότι το μεθάνιο που διαφεύγει από την περιοχή του Κατακόλου είναι θερμογενούς προέλευσης, το οποίο προέρχεται από τους Μεσοζωικούς ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, και προέρχεται από σαπροπηλικά κηρογενή (τύπος ΙΙ) τα οποία έχουν υποστεί καταγένεση. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με την ανάλυση ενός δείγματος αερίου σε ασβεστόλιθους σε βάθος 2376m Kamberis et al., 2000a) και με τις αναλύσεις του οργανικού υλικού των ασβεστόλιθων (Rigakis and Karakitsios, 1998), ενώ το βιογενές μεθάνιο μικροβιακής προέλευσης στις ακολουθίες Νεογενών κλαστικών ιζημάτων (Kamberis et al., 2000a) δεν συνεισφέρει στις επιφανειακές διαφυγές.

Το μεθάνιο όμως λειτουργεί και ως αέριο μεταφοράς για το υδρόθειο που διαφεύγει από την περιοχή του Κατακόλου. Το υδρόθειο σε πετρελαϊκούς ταμιευτήρες μπορεί να προέρχεται από τρεις διεργασίες: τη βακτηριδιακή θειική αναγωγή, τη θερμική αποσύνθεση των θειικών συστατικών στα κηρογενή ή στα πετρέλαια, και τη θερμοχημική θειική αναγωγή (TSR). Η βακτηριδιακή θειική αναγωγή και η θερμική αποσύνθεση των θειικών συστατικών οδηγεί γενικά σε μικρά ποσοστά υδρόθειου στα αέρια (<3-5%). Οι μεγάλες ποσότητες υδρόθειου στους Ιουρασικούς ασβεστόλιθους της Ιόνιας ζώνης (10% σε βάθος 2500m) (Kamberis et al., 2000a) και η παρουσία ανυδρίτη, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η βασική διεργασία σχηματισμού του υδρόθειου είναι η θερμοχημική θειική αναγωγή (TSR) (Worden et al., 1995; Hunt, 1996; Worden and Smalley, 1996). Η γεωθερμική βαθμίδα στην περιοχή είναι 2 °C/100m, συνεπώς σε βάθος 2500m, στα ανώτερα σημεία των διαπυρικών δομών η θερμοκρασία είναι 70 °C, με αποτέλεσμα οι συνθήκες να μην είναι ιδανικές για τη διεργασία σε αυτό το βάθος (Hunt, 1996; Noth, 1997), αλλά πιθανός το υδρόθειο να σχηματίζεται βαθύτερα σε επαφές ανυδρίτη-ασβεστόλιθου όπου οι συνθήκες θερμοκρασίας είναι ιδανικές και στη συνέχεια να μεταναστεύει στη θέση όπου βρίσκεται. Επίσης στο σχηματισμού του υδρόθειου πιθανόν να συνεισφέρει και η θερμική αποσύνθεση των θειικών συστατικών του κηρογενούς ή του πετρελαίου. Το σαπροπηλικό κηρογενές, το οποίο είναι υπεύθυνο για το σχηματισμό των υδρογονανθράκων, περιέχει περισσότερο θείο σε σχέση τα κηρογενή (τύπου ΙV) (Kamberis et al., 2000a) των κλαστικών νεογενών ιζημάτων. Τα ανθρακικά πετρώματα δεν έχουν αρκτικό σίδηρο ώστε να αποβάλλουν το υδρόθειο ως πυρίτη (Worden and Smalley,

1996), αντίθετα τα νεογενή ιζήματα, τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν υδρόθειο με βακτηριδιακή αναγωγή, έχουν τουλάχιστον 12 φορές περισσότερο σίδηρο, με αποτέλεσμα τη μεγάλη μείωση του υδρόθειου σε αυτά. Για την ασφαλή διερεύνηση της προέλευσης του υδρόθειου απαιτούνται ισοτοπικές αναλύσεις $\delta^{34}\text{S}$ του υδρόθειου (Worden et al., 1995; Hunt, 1996). Τα παραπάνω ενισχύουν την άποψη ότι οι διαφυγές υδρόθειου, ανεξάρτητα από τη γένεση τους, σχετίζονται με το θερμογενές μεθάνιο.

Στην υποθαλάσσια περιοχή του Λιμένα Κατακόλου πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της ποσότητας μεθανίου που διαφεύγει από το θαλάσσιο πυθμένα προς την υδάτινη στήλη και στη συνέχεια προς την ατμόσφαιρα, η οποία εκτιμήθηκε σε 1260-1500 τόννους το χρόνο. Η εκτίμηση βασίστηκε στην εξάπλωση και στον αριθμό διαφυγών ρευστών που εντοπίστηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης και στην εκτίμηση του μεγέθους και του ρυθμού εισόδου των φυσαλίδων στην υδάτινη στήλη σύμφωνα με την οπτική παρατήρηση των διαφυγών. Ο ρυθμός διαφυγής μεθανίου από το λιμένα Κατακόλου είναι συγκρίσιμος με το ρυθμό διαφυγής μεθανίου από την περιοχή του «Φάρου» Κατακόλου. Επίσης η ποσότητα μεθανίου που διαφεύγει από την περιοχή του λιμένα Κατακόλου είναι συγκρίσιμη με άλλες περιοχές ψυχρών διαφυγών (cold seeps) αερίων υδρογονανθράκων (Hovland et al., 1993; Dimitrov, 2002).

Πέραν της μεγάλης ποσότητας μεθανίου που διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα και επιδρά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου τοπικά οι διαφυγές ρευστών στην περιοχή του Κατακόλου αποτελούν μία γεωλογική επικινδυνότητα τόσο για τον άνθρωπο, όσο και τις κατασκευές στην περιοχή του Λιμένα. Η υψηλή συγκέντρωση μεθανίου στην ατμόσφαιρα μπορεί να προκαλέσει έκρηξη ή πυρκαγιά όταν υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες, ενώ οι υποθαλάσσιες διαφυγές και η παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα επιφανειακά ιζήματα μπορούν να προκαλέσουν εκρήξεις κατά τη διάρκεια γεωτρήσεων ή να καταστρέψουν θαλάσσιες κατασκευές (Judd and Hovland, 2007). Το υδρόθειο είναι το πιο επικίνδυνο και τοξικό γεωρευστό και μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ιατρικές βλάβες στον άνθρωπο στις συγκεντρώσεις που μετρήθηκε στην περιοχή του λιμένα, ειδικά κλειστούς χώρους, εάν δεν αερίζονται καλά, όπως είναι το κατάστημα αφορολογήτων και το τελωνείο.

Τέλος είναι σημαντικό να εξεταστεί η μελλοντική εκμετάλλευση των διαφυγών ρευστών για ενεργειακούς σκοπούς. Εκμετάλλευση διαφυγών ρευστών έχει πραγματοποιηθεί στο Coal Oil point στην Καλιφόρνια, Η.Π.Α., όπου το 1982 δύο ειδικές πυραμιδικές κατασκευές τοποθετήθηκαν σε βάθος νερού 67m για τη συλλογή των διαφυγόντων ρευστών από το θαλάσσιο πυθμένα (Boles et al., 2001). Οι πυραμίδες αυτές κάλυψαν 1860m^2 και η παραγωγή πετρελαίου κυμάνθηκε στα 600 δισεκατομμύρια βαρέλια από το 1982 έως το 1987. Από το 1994 και μετά το μοναδικό προϊόν ήταν αέριο καθώς οι διαφυγές πετρελαίου σταμάτησαν. Η

μέση παραγωγή αερίου κυμάνθηκε στα 3×10^5 έως $9 \times 10^5 \text{ m}^3$ αερίου το μήνα με την παραγωγή να μειώνεται στο τέλος της χιλιετίας. Ο κυριότερος λόγος της μείωσης των διαφυγών ρευστών ήταν η εξόρυξη πετρελαίου από τις γεωτρήσεις που είχε αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης στους ταμιευτήρες πετρελαίου και κατά συνέπεια τη μείωση της ανόδου των ρευστών προς την επιφάνεια (Quigley et al., 1999). Σύμφωνα με τους Hornafius et al., 1999, η εξόρυξη πετρελαίου από την περιοχή που είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των διαφυγών από το θαλάσσιο πυθμένα, είχε πολύ σημαντική θετική επίδραση στο περιβάλλον, καθώς η συστηματική εξόρυξη πετρελαίου από τη δεκαετία του 1940 είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των διαφυγών αερίων από το θαλάσσιο πυθμένα στο 8% των αρχικών τη δεκαετία του 1970.

Σύμφωνα με τα παραπάνω θεωρείται σημαντικό να διερευνηθεί η δυνατότητα εξόρυξης αερίου ή/και πετρελαίου από τους Μεσοζωικούς ταμιευτήρες η μπορεί να προσδώσει διπλό όφελος: (i) την ενεργειακή εκμετάλλευση των κοιτασμάτων πετρελαίου της περιοχής του Κατακόλου και (ii) θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση των διαφυγών αερίων στην ατμόσφαιρα από την περιοχή του Κατακόλου δίνοντας σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη.

Κεφάλαιο 8^ο

Συμπεράσματα

8 Συμπεράσματα

Τρεις περιοχές της Δυτικής Ελλάδας, στις οποίες είχαν καταγραφεί διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα της θάλασσας μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, το υποθαλάσσιο πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών στον Πατραϊκό κόλπο, το υποθαλάσσιο πεδίο κρατήρων διαφυγής στον Όρμο του Ελαιώνα στο Δυτικό Κορινθιακό κόλπο και οι διαφυγές ρευστών στον κόλπο του Κατακόλου. Η διατριβή βασίζεται:

- στη μελέτη θαλάσσιων γεωφυσικών δεδομένων τα οποία είτε είχαν συλλεχθεί κατά το παρελθόν και επαναεπεξεργάστηκαν, είτε συλλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας
- στη μελέτη των φυσικών και χημικών παραμέτρων της υδάτινης στήλης στις περιοχές των διαφυγών
- στη χημική και ισοτοπική ανάλυση των ρευστών
- στη μελέτη των δεδομένων που προέκυψαν από την πρώτη παγκόσμια καταγραφή μακράς περιόδου διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα που πραγματοποιήθηκε στον Πατραϊκό κόλπο
- στη μελέτη των διαφυγών στην παράκτια ζώνη πλησίον των υποθαλάσσιων θέσεων
- στην οπτική παρατήρηση των θέσεων διαφυγών ρευστών

Το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου αποτελείται από ενενήντα δύο κρατήρες διαφυγής ρευστών και έχει σχηματιστεί μεταξύ των ισοβαθών 15 και 50 μέτρων, σε Ολοκαινικές ιλυούχες αποθέσεις που υπέρκεινται Πλειστοκαινικών ιζημάτων. Το βόρειο

άκρο του πεδίου περιορίζεται από ένα κανονικό ρήγμα, το οποίο αποτελεί την θαλάσσια συνέχεια του ρήγματος της Αγίας Τριάδας και στην επιφανειακή έκφραση του οποίου σχηματίζεται μία «αλυσίδα» κρατήρων. Μικρότερα συνιζηματογενή ρήγματα τα οποία καταγράφηκαν εντός των ορίων του πεδίου φαίνεται να επηρεάζουν την γεωγραφική κατανομή των κρατήρων. Το ελλειψοειδές σχήμα σε κάτοψη μεγάλου μέρους των κοινών και σύνθετων κρατήρων, δείχνει ότι οι κρατήρες μεγαλώνουν και συνενώνονται παράλληλα και κατά μήκος των ρηξιγενών δομών. Σε αυτήν την περίπτωση τα ρευστά διαφεύγουν κατά μήκος των ρηγμάτων που συνιστούν ζώνες μειωμένης συνοχής των συγχρόνων ιζημάτων του κόλπου.

Το πεδίο έχει παρουσιάσει δύο γεγονότα έντονης δραστηριότητας μετά από δύο ισχυρούς σεισμούς (14/07/2003, 08/06/2008) που έπληξαν την ευρύτερη περιοχή, με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η διαφορά στην ενεργοποίηση του πεδίου πιθανόν να οφείλεται στο διαφορετικό μηχανισμό γένεσης του σεισμού, στο διαφορετικό επίκεντρο και στη διαφορετική διασπορά των μετασεισμών. Στον σεισμό του 1993 ενεργοποιήθηκαν κρατήρες που βρίσκονται στο βόρειο τομέα του πεδίου κοντά στο ρήγμα της Αγίας Τριάδας, ενώ στο σεισμό του 2008 δεν υπήρχε γεωγραφική τάση στους κρατήρες που ενεργοποιήθηκαν και οι διαφυγές ρευστών φαίνεται να ήταν μεγαλύτερες μετά από το σεισμό του 1993. Κατά τη διάρκεια του σεισμού του 1993 τα αυξημένης θερμοκρασίας ρευστά είναι πιθανόν να προέρχονται από μεγαλύτερα βάθη και να μετανάστευσαν κατά μήκος της ρηξιγενούς επιφάνειας που ενεργοποιήθηκε από το σεισμό, ενώ αντίθετα οι διαφυγές των ρευστών που πυροδοτήθηκαν από το σεισμό του 2008 πιθανώς να προέρχονται από πολύ μικρά βάθη (15-20m) και να προκλήθηκαν από την αναδιάταξη των κόκκινων των ιζημάτων. Η συστηματική ηχοβολιστική παρακολούθηση της δραστηριότητας του πεδίου μετά από τους δύο ισχυρούς σεισμούς έδειξε ότι σημαντικές διαφυγές ρευστών λαμβάνουν χώρα για ένα χρονικό διάστημα από δέκαεξι έως τριάντα ημέρες μετά το σεισμικό γεγονός.

Σε περιόδους ασθενούς ή απουσίας σεισμικότητας παρατηρούνται μικρές διαφυγές ρευστών όπως φάνηκε από τις αυξημένες τιμές διαλυμένου μεθανίου τόσο κατά τη διάρκεια μετρήσεων μικρής διάρκειας, όσο και κατά την εξαμηνιαία συνεχή παρακολούθηση των φυσικοχημικών παραμέτρων της υδάτινης στήλης στον σύνθετο κρατήρα PP4, όπου καταγράφηκαν περισσότερες από 60 μικροδιαφυγές. Οι εντονότερες διαφυγές χαρακτηρίζονται από απότομη πτώση της θερμοκρασίας και της πίεσης του θαλασσινού νερού και πιθανόν να οφείλονται είτε σε ενδογενείς παράγοντες που οφείλονται στην σταδιακή αύξηση της πίεσης των πόρων των ιζημάτων λόγω της συσώρευσης αερίων υδρογονανθράκων, είτε σε ωκεανογραφικούς παράγοντες που σχετίζονται με την ύπαρξη ισχυρών ρευμάτων εντός των κρατήρων διαφυγής ρευστών. Μικρότερες διαφυγές παρατηρήθηκαν και σε περιόδους όπου οι φυσικές παράμετροι

στην υδάτινη στήλη δεν παρουσίασαν αντίστοιχα μεταβολές, κάποιες εκ των οποίων φαίνεται να πυροδοτήθηκαν από μικροσεισμούς.

Το πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου παρουσιάζει μία σχεδόν συνεχή μικροδραστηριότητα η οποία διακόπτεται από παροξυσμικά γεγονότα μεγάλων διαφυγών ρευστών που σχετίζονται με μεγάλους σεισμούς. Τα ρευστά που διαφεύγουν είναι αέριοι υδρογονάνθρακες (μεθάνιο μικροβιακής προέλευσης) με ή χωρίς νερό των πόρων των ιζημάτων.

Στην παράκτια ζώνη που βρίσκεται κοντά στο πεδίο κρατήρων εντοπίστηκαν τρεις περιοχές με διαφυγές μεθανίου προς την ατμόσφαιρα, μία NNA του πεδίου και βρίσκεται γύρω από μία γεώτρηση, η οποία δημιουργεί μία δίοδο ανόδου του μεθανίου προς την επιφάνεια. Δύο άλλες περιοχές με μικρότερη ροή εντοπίστηκαν στο πλησιέστερο σημείο ακτής προς τον κρατήρα PP4 και στην επιφανειακή έκφραση του ρήγματος της Αγ. Τριάδας. Η συνολική προσφορά μεθανίου από την παράκτια ζώνη προς την ατμόσφαιρα εκτιμήθηκε στους 4.32 τόνους μεθανίου το χρόνο.

Η εκτίμηση της ποσότητας μεθανίου που εκλύεται από το πεδίο προς τη υδάτινη στήλη είναι της τάξης των 15 τόνων μεθανίου το χρόνο. Η ποσότητα μεθανίου που διαφεύγει από την υδάτινη στήλη προς την ατμόσφαιρα μόνο από την επιφάνεια του πεδίου κρατήρων εκτιμήθηκε σε 0.09 έως 0.35 t/year. Τέλος μετά από το σεισμό της 8^{ης}/6/2008, εκτιμήθηκε ότι διέφυγαν περίπου 500 κιλά μεθανίου σε 16 ημέρες. Συνολικά η παράκτια ζώνη της Πάτρας, τόσο το χερσαίο όσο και το θαλάσσιο περιβάλλον της, προσφέρει τουλάχιστον 4.7tn μεθανίου ετησίως στην ατμόσφαιρα, ενώ με την παραδοχή ότι όλο το μεθάνιο που εκλύεται από το πεδίο κρατήρων φτάνει στην ατμόσφαιρα υπολογίζεται ότι η μέγιστη προσφορά μεθανίου από την παράκτια ζώνη της Πάτρας μπορεί να φτάσει τους 19 τόνους ετησίως.

Στον Όρμο του Ελαιώνα μελετήθηκε ένα πεδίο κρατήρων διαφυγής ρευστών. Το πεδίο αποτελείται από 23 κρατήρες εκ των οποίων οι έξι (‘κύριοι’ κρατήρες) έχουν επιφάνεια 1300-7700m² και σχετικό βάθος 8-12m, και χαρακτηρίζονται μορφολογικά ως κοινοί και σύνθετοι. Οι υπόλοιποι κρατήρες διαφυγής ρευστών είναι μικρότεροι και χαρακτηρίζονται ως αρχικοί ή σχηματίζουν συστάδες αρχικών.

Η απότομη πτώση της θερμοκρασίας και της αλατότητας κατά πρώτο λόγο, αλλά και η πτώση του pH και η αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου κατά δεύτερο λόγο, κοντά στον πυθμένα σε συνδυασμό με την οπτική επιβεβαίωση της ύπαρξης διαφυγών ρευστών από τον πυθμένα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην περιοχή των κρατήρων διαφυγής ρευστών υπάρχει εκφόρτιση του υδροφόρου ορίζοντα. Στην περιοχή του Όρμου του Ελαιώνα οι κρατήρες

διαφυγής ρευστών σχηματίζονται σε Ολοκαινικές ιλύες και ο πυθμένας των κρατήρων φτάνει στην διεπιφάνεια Ολοκαίνου/Πλειστοκαίνου. Συνεπώς στην περιοχή των κρατήρων πιθανόν να εκφορτίζεται ο ελεύθερος υδροφόρος των Πλειστοκαινικών αλλουβιακών αποθέσεων. Η παρουσία ακουστικών χαρακτήρων, ενδεικτικών της παρουσίας αέριας φάσης στα ιζήματα του Όρμου του Ελαιώνα, σε συνδυασμό με την εκφόρτιση υπόγειου νερού προτείνει δύο πιθανές διεργασίες όσον αφορά στο σχηματισμό των κρατήρων: (α) σχηματισμός από τη συνδυαστική δράση των διαφυγών των αερίων και του γλυκού νερού, (β) η εκφόρτιση του γλυκού νερού είναι η αιτία σχηματισμού των κρατήρων και η οποία απλά συμπαρασύρει τα συγκεντρωμένα αέρια στη διαβρωσιγενή επιφάνεια Ολοκαίνου/Πλειστοκαίνου. Η απουσία ενδείξεων διαφυγής μεθανίου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ενισχύει τη δεύτερη διεργασία σχηματισμού καθώς είναι πιθανόν το διαθέσιμο μεθάνιο να έχει ήδη εξαντληθεί ή να διαφεύγουν μικροποσότητες σε συγκεντρώσεις κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας του αισθητήρα μεθανίου που χρησιμοποιήθηκε.

Οι βενθικές βιοκοινωνίες που εντοπίστηκαν στο εσωτερικό των κρατήρων διαφυγής ρευστών σε συνδυασμό με την απουσία τους στην ευρύτερη περιοχή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το υπόγειο νερό, εμπλουτισμένο με θρεπτικά συστατικά και διαλυμένο οξυγόνο δημιουργεί ένα εξαιρετικό οικοτόπο για την ανάπτυξη βενθικών οργανισμών.

Στην περιοχή του Κατακόλου εντοπίστηκαν και καταγράφηκαν πολύ μεγάλες διαφυγές ρευστών σε τρεις περιοχές, στον Λιμένα Κατακόλου, στη θέση «Φάρος» Κατακόλου και νότια του Λιμένα. Νότια του Λιμένα και πλησίον των ακτογραμμών της χερσονήσου του Κατακόλου, εντοπίστηκε και χαρτογραφήθηκε ένα κανονικό ρήγμα, κατά μήκος του οποίου και κυρίως στο βόρειο άκρο του, διαπιστώθηκε η άνοδος προς την επιφάνεια του πυθμένα και η διαφυγή στην υδάτινη στήλη ρευστών. Η ύπαρξη διαφυγών ρευστών από το συγκεκριμένο τμήμα του ρήγματος επιβεβαιώθηκε με επιτόπιες μετρήσεις διαλυμένου μεθανίου με αισθητήρα μεθανίου.

Στον Λιμένα Κατακόλου καταγράφηκαν εκτεταμένες περιοχές σημαντικών διαφυγών που εντοπίζονται κυρίως περιφερειακά του κεντρικού μώλου του λιμένα και σε άλλες πέντε περιοχές του λιμένα με συνολική έκταση 70.000m². Οι ισχυρές διαφυγές που εντοπίστηκαν περιφερειακά του κεντρικού μώλου πιθανώς να ενισχύονται από την επίδραση του φορτίου της κατασκευής στην χωρική κατανομή των διαφυγών. Η οπτική παρατήρηση έδειξε την διαφυγή φυσαλίδων διαμέτρου από 1 έως 20 cm με τις μικρού μεγέθους φυσαλίδες (1-3cm) να διαφεύγουν με ρυθμό μία/1s ενώ οι μεγαλύτερες με ρυθμό περίπου μία/10s. Στις θέσεις περιφερειακά του κεντρικού μώλου, όπου παρατηρήθηκαν και οι μεγαλύτερης διαμέτρου

φυσαλίδες έχουν σχηματιστεί βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα που σχηματίζουν τα βακτήρια του γένους *Beggiatoa*, τα οποία αποτελούν τυπικές ενδείξεις διαφυγών αερίων από τον πυθμένα. Στο χερσαίο τμήμα του λιμένα οι διαφυγές διαπερνούν και καταστρέφουν τον ασφάλτινο δρόμο και το πεζοδρόμιο σε δύο κυρίως θέσεις, στο κτήριο του καταστήματος αφορολογήτων στον προβλήτα του λιμένα και στο κτήριο του Τελωνείου, σε θέσεις όπου μετρήθηκαν υψηλές τιμές ροής αερίων από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα. Η χημική ανάλυση των ρευστών που διαφεύγουν από το υποθαλάσσιο και χερσαίο τμήμα του λιμένα έδειξε ότι τα ρευστά αποτελούνται κατά κύριο λόγο από αέριους υδρογονάνθρακες και κυρίως μεθάνιο, ενώ σημαντική είναι και η ποσότητα του υδρόθειου.

Στην περιοχή του «Φάρου» οι μετρήσεις της ροής έδειξαν πολύ υψηλές τιμές, τάξεως 10^5 mg/m².d, σε μία γραμμική περιοχή, κατά μήκος ενός ρήγματος, όπου απουσιάζει η φυτοκάλυψη και το έδαφος συνίσταται από ιλυώδες/λασπώδες υλικό, ενώ στο κεντρικό τμήμα αυτής της περιοχής οι διαφυγές μπορούσαν να διατηρούν ακόμη και μικρές φωτιές. Επιτόπια χημική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην κεντρική περιοχή του «Φάρου», έδειξε ότι οι διαφυγές αποτελούνται κυρίως από μεθάνιο.

Οι έντονες διαφυγές ρευστών που παρατηρήθηκαν στην περιοχή του Λιμένα Κατακόλου, στην χερσαία περιοχή του «Φάρου» Κατακόλου και στην υποθαλάσσια περιοχή, νότια του λιμένα, φαίνεται να συνδέονται με τις ενεργές διαπυρικές δομές στην περιοχή, που επηρεάζουν τις υπερκείμενες ακολουθίες σχηματίζοντας κανονικά ρήγματα, όπως τα ρήγματα στη βάση των νεογενών ιζημάτων και τα νεοτεκτονικά κανονικά ρήγματα, τα οποία συγκροτούν μία ιδανική δίοδο μετανάστευσης των αερίων από τους Ιουρασικούς ασβεστόλιθους και τους Τριαδικούς ανυδρίτες προς την επιφάνεια.

Το μεθάνιο που διαφεύγει από την περιοχή του Κατακόλου είναι θερμογενούς προέλευσης, το οποίο προέρχεται από τους Μεσοζωικούς ταμειυτήρες υδρογονανθράκων, και προέρχεται από σαπροπηλικά κηρογενή (τύπος II) τα οποία έχουν υποστεί καταγένεση, ενώ το βιογενές μεθάνιο μικροβιακής προέλευσης που έχει βρεθεί στις ακολουθίες Νεογενών κλαστικών ιζημάτων δεν συνεισφέρει στις επιφανειακές διαφυγές. Οι μεγάλες ποσότητες υδρόθειου στους Ιουρασικούς ασβεστόλιθους της Ιόνιας ζώνης και η παρουσία ανυδρίτη, οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η βασική διεργασία σχηματισμού του υδρόθειου είναι η θερμοχημική θειική αναγωγή, ενώ πιθανόν να συνεισφέρει και η θερμική αποσύνθεση των θειικών συστατικών του κηρογενούς ή του πετρελαίου.

Στην υποθαλάσσια περιοχή του Λιμένα Κατακόλου εκτιμήθηκε ότι η ποσότητα μεθανίου που διαφεύγει από το θαλάσσιο πυθμένα προς την υδάτινη στήλη και στη συνέχεια προς την ατμόσφαιρα είναι της τάξεως των 1260-1500 τόννων το χρόνο. Ο ρυθμός διαφυγής μεθανίου

από το λιμένα Κατακόλου είναι συγκρίσιμος με το ρυθμό διαφυγής μεθανίου από την περιοχή του «Φάρου» Κατακόλου.

Οι διαφυγές ρευστών στην περιοχή του Κατακόλου αποτελούν μία γεωλογική επικινδυνότητα τόσο για τον άνθρωπο, όσο και τις κατασκευές στην περιοχή του Λιμένα. Η υψηλή συγκέντρωση μεθανίου στην ατμόσφαιρα μπορεί να προκαλέσει έκρηξη ή πυρκαγιά, ενώ οι υποθαλάσσιες διαφυγές και η παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στα επιφανειακά ιζήματα μπορούν να προκαλέσουν εκρήξεις κατά τη διάρκεια γεωτρήσεων ή να καταστρέψουν θαλάσσιες κατασκευές. Το υδρόθειο είναι το πιο επικίνδυνο και τοξικό γεωρευστό και μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ιατρικές βλάβες στον άνθρωπο στις συγκεντρώσεις που μετρήθηκε στην περιοχή του λιμένα.

Στον πίνακα 8.1 δίνονται οι ποσότητες μεθανίου που διαφεύγουν από διάφορες περιοχές του πλανήτη και οι ποσότητες μεθανίου που διαφεύγουν από τις περιοχές που μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η ποσότητα μεθανίου που διαφεύγει από την παράκτια ζώνη της Πάτρας είναι συγκρίσιμη με περιοχές διαφυγών ρευστών που δεν σχετίζονται με πετρελαϊκά πεδία ενώ η ποσότητα μεθανίου που διαφεύγει από την περιοχή του Κατακόλου είναι συγκρίσιμη με περιοχές διαφυγών που σχετίζονται με πετρελαϊκά πεδία.

Πίνακας 8.1. Ποσότητες μεθανίου που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα από διάφορες περιοχές του πλανήτη και από τις υπό μελέτη περιοχές

Περιοχή	Διαφυγή Μεθανίου (σε t/year)	Αναφορά
Ακτή Kattegat Δανία	50	Dando et al., 2004; Etiope, 2009
Υφαλοκρηπίδα Η.Β.	120000-3500000	Judd et al., 1997
Rias Δυτική Ισπανία	11400	Garcia-Gil (2003)
Υφαλοκρηπίδα Βουλγαρίας στη Μαύρη Θάλασσα	356000-1614000	Dimitrov (2002)
Λεκάνη Μαύρης Θάλασσας	50000-210000	Kessler et al., 2006
Αζερμπαιτζάν (5 λασπούχα ηφαιστεια)	1392	Etiope et al., 2004
Κεντρική Ιταλία (5 λασπούχα ηφαιστεια)	10.2	Etiope et al., 2007
Όρμος Torry Σκωτία	1	Judd et al., 2002
Golden Sands - Υφαλοκρηπίδα Βουλγαρίας στη Μαύρη Θάλασσα	930	Dimitov, 2002
Coal Oil Point Καλιφόρνια ΗΠΑ	7200	Hovland et al., 1993
Tommeliten Βόρεια Θάλασσα	672	Hovland and Judd, 1998; Hovland et al., 1993
Πεδίο Κ.Δ.Ρ. και παράκτια ζώνη Πάτρας	4.7-19	Παρούσα εργασία
Λιμένας Κατακόλου	1262-1500	Παρούσα εργασία

Τα δύο πεδία κρατήρων διαφυγής ρευστών στον Πατραϊκό κόλπο και στον Όρμο του Ελαιώνα σχηματίζονται σε Ολοκαινικές ιλύες πάχους 10-20 μέτρα οι οποίες έχουν αποτεθεί με ασυμφωνία σε Πλειστοκαινικά ιζήματα. Η επιφάνεια Ολοκαίνου/Πλειστοκαίνου αποτελεί μία επιφάνεια συγκέντρωσης ρευστών (αέριων υδρογονανθράκων στον Πατραϊκό κόλπο, γλυκού νερού και πιθανώς αέριων υδρογονανθράκων στον όρμο του Ελαιώνα). Αντίθετα στον κόλπο του Κατακόλου, η παρουσία μεγάλου πάχους ιζημάτων αδρομερέστερων επιφανειακών ιζημάτων δεν φαίνεται να επιτρέπει στον σχηματισμό κρατήρων. Επίσης η πιθανή παρουσία παροξυσμικών γεγονότων διαφυγών στις δύο πρώτες περιοχές είναι ο κύριος παράγοντας σχηματισμού κρατήρων διαφυγής ρευστών ενώ αντίθετα στην περιοχή του Κατακόλου η συνεχής διαφυγή αερίου με πιθανώς σχετικά σταθερό ρυθμό δεν επιτρέπει το σχηματισμό τους.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή μπορεί να αποτελέσει μία βάση για μελλοντικές έρευνες τόσο στις τρεις περιοχές που μελετήθηκαν αλλά και σε άλλες περιοχές της Ελλάδας όπου έχουν παρατηρηθεί ή θα εντοπιστούν στο μέλλον διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα της θάλασσας. Πιο συγκεκριμένα έχουν είδη ξεινήσει ή έχουν προγραμματιστεί από το Εργαστήριο Θαλάσσια Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας σε συνεργασία και με άλλους ερευνητές:

- Στην περιοχή του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών του Πατραϊκού κόλπου θα πρέπει να διερευνηθεί η πιθανότητα διαφυγών ρευστών διαφορετικής προέλευσης από της ρηξιγενείς δομές και εάν αυτές αποτελούν πρόδρομα φαινόμενα σεισμών όπως φάνηκε πριν από το σεισμό του 1993. Επίσης η μέτρηση της ροής μεθανίου από τουλάχιστον ένα κρατήρα διαφυγής ρευστών θα μπορέσει να επιτρέψει τον καλύτερο υπολογισμό της ροής μεθανίου από το πεδίο κρατήρων προς την ατμόσφαιρα. Τέλος θα πρέπει να διερευνηθεί η σχέση των διαφυγών με την ύπαρξη ενός μεγάλου τεχνικού έργου όπως ο νέος λιμένας Πατρών και εάν αυτές μπορεί να αποτελέσουν μία γεωλογική επικινδυνότητα για τις κατασκευές.
- Στην περιοχή του Όρμου του Ελαιώνα θα πρέπει να ταυτοποιηθεί το γλυκό νερό που διαφεύγει και η σχέση του με το νερό του παράκτιου υδροφόρου (έχουν είδη συλλεχθεί τα δείγματα), αλλά το πιο σημαντικό στην περιοχή φαίνεται να είναι η σχέση των κρατήρων διαφυγής ρευστών με τη βιολογική δραστηριότητα, η οποία φαίνεται να είναι εντονότερη στους κρατήρες (είναι σε εξέλιξη). Τέλος θα πρέπει να μελετηθεί η δυνατότητα μελλοντικής εκμετάλλευσης του νερού των υποθαλάσσιων διαφυγών.

- Στον κόλπο του Κατακόλου θα πρέπει να μετρηθεί ο ρυθμός εισόδου των φουσαλίδων αερίου στην υδάτινη στήλη σε δύο τουλάχιστον θέσεις (μία εντός του λιμένα και μία νότια του λιμένα), και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής (περιοχές διαφυγών που εντοπίστηκαν με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης) θα γίνει δυνατός ο ακριβέστερος υπολογισμός της εισόδου μεθανίου στην ατμόσφαιρα, στην όπως διαπιστώνεται έως τώρα, περιοχή με τις μεγαλύτερες διαφυγές αερίων στον ελληνικό χώρο. Επίσης θα πρέπει να μελετηθεί η επίδραση των διαφυγών ρευστών στις κατασκευές του λιμένα και ίσως το πιο σημαντικό η επίδραση τους στον άνθρωπο. Τέλος σημαντική θεωρείται η δυνατότητα ενεργειακής εκμετάλλευσης των αποθεμάτων πετρελαίου και αερίου που υπάρχουν στην περιοχή.

Κεφάλαιο 9^ο

Βιβλιογραφικές Αναφορές

9 Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Abegg F. and Anderson A.L., 1997. The acoustic turbid layer in muddy sediments of Eckernförde Bay, western Baltic: methane concentrations, saturation and bubble characteristics. *Marine Geology* 137:137-147.
- Abrams M., 1996. Distribution of subsurface hydrocarbon seepage in near-surface marine sediments. In Schumacher D. and Abrams M. (eds) *Hydrocarbon Migration and its near-surface expression* American Association of Petroleum Geologists Memoir 66:1-14.
- Acosta J., 1984. Occurrence of acoustic masking in sediments in two areas of the continental shelf of Spain: Ria de Muros (NW) and Gulf of Cadiz (SW). *Marine Geology* 58:427-434
- Acosta, J., Munoz, A., Herranz, P., Palomo, C., Ballesteros, M., Vaquero, M., Uchupi, E., 2001. Pockmarks in the Ibiza Channel and Western end of the Balearic Promontory (Western Mediterranean) revealed by multibeam mapping. *Geo-Marine Letters* 21(3):123-130.
- Addy S. and Worzel J., 1979. Gas seeps and sub-surface structure off Panama City, Florida. *AAPG Bulletin* 63:668-675
- Aharon P. (ed), 1994. Hydrocarbon seeps and vents. *Geo-Marine Letters* 14(2/3):69-230
- Albert D.B., Martens C.S., Alperin M.J., 1998. Biogeochemical processes controlling methane in gassy coastal sediments, Part 2. Groundwater flow control of acoustic turbidity in Eckernförde Bay sediments. *Continental Shelf Research* 18:1771-1793
- Anderson A.L. and Bryant W.R., 1990. Gassy sediment occurrence and properties: northern Gulf of Mexico. *Geo-Marine Letters* 10:209-220
- Anderson A.L. and Bryant W.R., 1987. Distribution of seafloor shallow gas in the northwestern Gulf of Mexico. In: *Proceedings of the 19th Offshore Technology Conference, 27-30 April 1987, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 5518*, pp 295-299
- Anderson A.L. and Hampton L.D., 1980. Acoustics of gas-bearing sediments. I. Background. II. Measurements and models. *Journal of the Acoustical Society of America* 67:1890-1903
- Anderson AL and Bryant WR (1989) Acoustic properties of shallow seafloor gas. In: *Proceedings 21st Offshore Technology Conf, 1-4 May 1989, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 5955*, pp 669-676
- Apps, J.A. and Van De Kamp, P.C., 1993. Energy gases of abiogenic origin in the Earth's crust. *The Future of Energy Gases* 1570, pp. 81-132.
- Αχιλλεόπουλος Π., 1990. Παλίρροιες σε κόλπου και στενά της Δυτικής Ελλάδας: Α Πατραϊκό Κόλπο, Β Δίαυλο Λευκάδας. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Baas J.H., Mienert J., Schultheiss P., Evans D., 1994. Evidence of gas vents and gas hydrates in the Storegga Slide area (Norwegian Continental Margin). In: *Abstracts Volume of the 3rd International Conference on Gas in Marine Sediments, 25-28 September 1994, NIOZ, Texel*
- Baraza J. and Ercilla G., 1996. Gas-charged sediments and large pockmark-like features on the Gulf of Cadiz (SW Spain). *Marine Petroleum Geology* 13:253-261
- Baraza J., Ercilla G., Nelsen C.H., 1999. Potential geologic hazards on the eastern Gulf of Cadiz slope (SW Spain). *Marine Geology* 155:191-215

- Barrie, J.V. and Hill, P.R., 2004. Holocene faulting on a tectonic margin: Georgia Basin, British Columbia, Canada. *Geo-Marine Letters* 24(2):86-96.
- Bayon, G., Pierre, C., Etoubleau, J., Voisset, M., Cauquil, E., Marsset, T., Sultan, N., (...), Fouquet, Y., 2007. Sr/Ca and Mg/Ca ratios in Niger Delta sediments: Implications for authigenic carbonate genesis in cold seep environments. *Marine Geology* 241(1-4):93-109.
- Bernard B., Brooks J., Sackett W., 1978. Light hydrocarbons in recent Texas continental shelf and slope sediments. *Journal of Geophysical Research* 83C:4053-4061
- Blazhchishin A.I. and Lange D., 1984. Geological-geophysical investigations in the Baltic Sea during the 1982 SEV-Program. *Oceanology* 24:648-652
- Bøe R., Rise L., Ottesen D., 1998. Elongate depressions on the southern slope of the Norwegian Trench (Skagerrak): Morphology and evolution. *Marine Geology* 146(1-4):191-203.
- Boetius A., Ravensschlag K., Schubert C.J., Rickert D., Widdel F., Gleseke A., Amann R., Jørgensen B.B., Witte U., Pfannkuche O., 2000. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation methane. *Nature* 407(6804):623-626.
- Boles J.R., Clark J.F., Leifer I., Washburn L., 2001. Temporal variation in natural methane seep rate due to tides, Coal Oil Point, California. *Journal of geophysical research* 106(C11):27077-27086.
- Brooks M. and G. Ferentinos, 1984. Tectonics and sedimentation in the Gulf of Corinth and Kephallonia– Zante straits, Ionian Sea, Greece: *Tectonophysics* 101:25-54.
- Bryant W.R. and Roemer L.B., 1983. Structure of the continental shelf and slope of the northern Gulf of Mexico and its geohazards and engineering constraints. In Geyer R.A. and Moore J.R (eds) *CRC Handbook of geophysical exploration at sea*. Florida, CRC Press, 123-184.
- Bryn P., Berg K., Forsberg C.F., Solheim A., Kvalstad T.J., 2005. Explaining the Storegga Slide. *Marine and Petroleum Geology* 22(1-2):11-19.
- Bünz S., Mienert J., Bryn P., Berg K., 2005. Fluid flow impact on slope failure from 3D seismic data: A case study in the Storegga Slide. *Basin Research* 17(1):109-122.
- Burnett W.C., Bokuniewicz H., Huettel M., Moore W.S., Taniguchi M., 2003. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry* 66(1-2):3-33.
- Burruss R.C., 1993. Stability and flux of methane in the deep crust - a review. *USGS Professional Paper* 1570, pp. 21-29
- Bussmann I. and Suess E., 1998. Groundwater seepage in Eckernförde Bay (Western Baltic Sea): Effect on methane and salinity distribution of the water column. *Continental Shelf Research* 18(14-15):1795-1806.
- Bussmann I., Dando P.R., Niven S.J., Suess E., 1999. Groundwater seepage in the marine environment: Role for mass flux and bacterial activity. *Marine Ecology Progress Series* 178:169-177.
- Butenko J. and Barbot J.P., 1979. Geological hazards related to offshore drilling and construction in the Orinoco River Delta of Venezuela. In: *Proceedings 11th Offshore Technology Conference, 30 April-3 May 1979, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 3395*, pp 323-329
- Butenko J., Milliman J.D., Ye Y., 1985. Geomorphology, shallow structure, and geological hazards in the East China Sea. *Continental Shelf Research* 4:121-141
- Carlson P.R., Golan-Bac M., Karl H.A., Kvenvolden K.A., 1985. Seismic and geochemical evidence for shallow gas in sediment of Navarin Continental Margin, Bering Sea. *AAPG Bulletin* 69:422-436
- Chalari A., Christodoulou D., Papatheodorou G., Geraga M., Stefatos A., Ferentinos G., 2008. Use of remote sensing and GIS in the reconstruction of coastal palaeogeography of Alexandria, Egypt, In: Y. Facorellis, N. Zacharias, K. Polokreti (eds), *British Archaeological Reports (BAR) International Series* 1746:119-128.
- Χάλαρη Α., 2008. *Ανάπλαση του φυσικού περιβάλλοντος της παράκτιας ζώνης της ελληνιστικής Αλεξάνδρειας (Αιγύπτου), με τη χρήση θαλάσσιων γεωφυσικών μεθόδων και γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.*
- Chand S., Rise L., Ottesen D., Dolan M.F.J., Bellec V., Bøe R., 2009. Pockmark-like depressions near the Goliat hydrocarbon field, Barents Sea: Morphology and genesis. *Marine and Petroleum Geology* 26(7):1035-1042.
- Chappellaz J., Blunier T., Raynaud D., Barnola J.M., Schwander J., Stauffer B., 1993. Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP. *Nature* 366(6454):443-445.

- Charlou J.L., Donval J.P., Fouquet Y., Ondreas H., Knoery J., Cochonat P., Levaché D., (...), Chazallon B., 2004. Physical and chemical characterization of gas hydrates and associated methane plumes in the Congo-Angola Basin. *Chemical Geology*, 205(3-4):405-425.
- Cheesman S.J., Law L.K., St Louis B., 1993. A porosity mapping survey in Hecate Strait using a seafloor electro-magnetic profiling system. *Marine Geology* 110:245-256
- Choi D.L., Kim S.R., Suk B.C., Oh J.K., 1993. Shallow geological structure of the Yongil Bay, southeast coast of Korea. Korean. *Journal of Petroleum Geology* 1:53-62
- Choi D.L., Oh J.K., Lee C.W., Woo H.J., 1997. High-resolution seismic characteristics of the Holocene mud deposits in the southeast innershelf, Korea. The Sea, *Journal of the Korean Society of Oceanography* 2:8-13
- Christodoulou D., Chronopoulos K., Makrodimitras G., Etiope G., Papatheodorou G. and Ferentinos G., 2006. Gas Hazard Induced by Methane and Hydrogen Sulfide Seepage in the Katakolo Harbour, NW Peloponnesus, Greece. *11th International Symposium on Natural and Human Induced Hazards & 2nd Workshop on Earthquake Prediction, Patras, Greece*. Abstract Volume p.30.
- Christodoulou D., Papatheodorou G., Fakiris E., Etiope G., Ferentinos G., 2009. The activation of the Patras gulf, western Greece, pockmark field triggered by the Mw=6.4R June 8, 2008 earthquake. In *Proceedings of the 10th International Conference on Gas Geochemistry, Cluj-Napoca*.
- Christodoulou D., Papatheodorou G., Ferentinos G., Masson M., 2003. Active seepage in two contrasting pockmark fields in Patras and Corinth Gulfs, Greece. *Geo-Marine Letters* 23:194-199.
- Χριστοδούλου Δ., Παπαθεοδώρου Γ., Φακίρης Η., Etiope G., Φερεντίνος Γ. (2009): Η ενεργοποίηση του πεδίου κρατήρων διαφυγής ρευστών (pockmarks) του πατράϊκού κόλπου μετά το σεισμό Mw=6.4R της 8ης Ιουνίου 2008, στη ΒΔ Πελοπόννησο. *Πρακτικά του 9ου Συμποσίου Ωκεανογραφίας & Αλιείας*, Τόμος Ι, σελ. 3-8.
- Chronis G., Piper D.J.W., Anagnostou C., 1991. Late Quaternary evolution of the Gulf of Patras. Greece: Tectonism, deltaic sedimentation and sea-level change. *Marine Geology* 97:191-209.
- Church T.M., 1996. An underground route for the water cycle. *Nature* 380(6575):579-580.
- Cifj G., Dondurur D., Ergün M., 2003. Deep and shallow structures of large pockmarks in the Turkish shelf, Eastern Black Sea. *Geo-Marine Letters* 23(3-4):311-322.
- Clifton H., Greene H., Moore G., Phillips R., 1971. Methane seep off Malibu Point following San Fernando earthquake. *U.S.G.S. Professional Paper* 733:112-116.
- Cornet F.H., Doan M.L., Moretti I., Borm G., 2004. Drilling through the active Aigion Fault: The AIG10 well observatory [Forage au travers de la faille active d'Aigion : L'observatoire constitué par le puits AIG10]. *Comptes Rendus - Geoscience* 336(4-5):395-406.
- Curtis C.D., 1983. Microorganisms and diagenesis of sediments. *Microbial Geochemistry*, pp. 263-286.
- Curzi P.V. and Judd A.G. (eds), 1998. *Abstract Volume and Guide of the 5th International Conference on Gas in Marine Sediments, 9-12 September 1998, Bologna*
- Curzi P.V. and Veggiani A., 1985. I pockmarks nel mare Adriatico centrale. *Acta Nat Ateneo Parmense* 21:79-90
- Curzi P.V., 1990. Some acoustic and sedimentological evidences of gas charged sediments in the Adriatic Sea (Mediterranean). In: *Proc Int Worksh Marine Acoustics, 26-30 March 1990, Beijing, China* Ocean Press, Beijing, pp 391-396
- Curzi P.V., 1992. Holocene evolution of the shore at the mouth of the River Musone (Adriatic Sea). *Boll Oceanol Teoria Appl* 10:255-263
- Dando P.R., 2001. *A Review of Pockmarks in the UK Part of the North Sea, With Particular Respect to their Biology*. Technical Report TR1, Strategic Environmental Assessment - SEA2. Department of Trade and Industry, London.
- Dando P.R., O'Hara S.C.M., Schuster U., Taylor L.J., 1994. Gas seepage from a carbonate-cemented sandstone reef on the Kattegat coast of Denmark. *Marine and Petroleum Geology* 11(2):182-189.
- D'Arrigo J.S., 1986. *Stable Gas-in-Liquid Emulsions*. Amsterdam, Elsevier.
- Davis A.M. (ed), 1992. Methane in marine sediments. *Proceedings 1st International Conference on Gas in Marine Sediments, 19-21 September 1990, Edinburgh. Continental Shelf Research* 12(10):1077-1264
- DeLong E.F., 2000. Resolving a methane mystery. *Nature* 407(6804):577-579.
- Díaz J.I. and Ercilla G., 1993. Holocene depositional history of the Fluviá-Muga prodelta, northwestern Mediterranean Sea. *Marine Geology* 111:83-92

- Diez R., García-Gil S., Durán R., Vilas F., 2007. Gas-charged sediments in the Ría de Arousa: Short- to long-term fluctuations? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 71(3-4):467-479.
- Dimitrov L. and Dontcheva V., 1994. Seabed pockmarks in the southern Bulgarian Black Sea zone. *Bull Geol Soc Denmark* 41:24-33
- Dimitrov L. and Woodside J., 2003. Deep sea pockmark environments in the eastern Mediterranean. *Marine Geology* 195(1-4):263-276.
- Dimitrov L., 2002. Contribution to atmospheric methane by natural seepages on the Bulgarian continental shelf. *Continental Shelf Research* 22(16):2429-2442.
- Doutsos T. and Piper D.J.W., 1990. Listric faulting, sedimentation and morphological evolution of the Quaternary eastern Corinth rift, Greece: First stages of continental rifting. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 102, 812-829.
- Doutsos T., Kontopoulos N., Poulimenos, G., 1988. The Corinth-Patras rift as the initial stage of continental fragmentation behind an active island arc (Greece). *Basin Research* 1:177-190.
- Dugan B. and Flemings P.B., 2000. Overpressure and fluid flow in the New Jersey continental slope: Implications for slope failure and cold seeps. *Science* 289(5477):288-291.
- Duncan A.R. and Pantin H.M., 1969. Evidence for submarine geothermal activity in the Bay of Plenty. *N Z J Mar Freshwater Res* 3:602-606
- Edgerton H.E., Seibold E., Vollbrecht K., Werner F., 1966. Morphologische Untersuchungen am Mittelgrund (Eckernförder Bucht, westliche Ostsee). *Meyniana* 16:37-50
- Ehhalt D., Prather M.J., Dentener E., Derwent R., Dlogokenky E., Holland E., Isaksen I., (...), Wang M., 2001. Atmospheric chemistry and Greenhouse Gases. *Climate Change*, pp.243-278.
- Houghton, J. T, Ding, Y, Griggs, D. J, Noguera, M, van der Linden, P. J, Dai, X, Maskell, K, and Johnson, C. A, eds, Cambridge: Cambridge University Press.
- Elhatip H., 2003. The use of hydrochemical techniques to estimate the discharge of Ovacik submarine springs on the Mediterranean coast of Turkey. *Environmental Geology* 43(6):714-719.
- Ellis J.P. and McGuinness W.T., 1986. Pockmarks of the northwestern Arabian Gulf. In: *Advances in underwater technology, ocean science and offshore engineering, Vol 6. Oceanology. Proc Oceanology Int Conf, 4-7 March 1986, Brighton*. Graham and Trotman, London, pp 353-367
- Ergün M., Dondurur D., Cifci G., 2002. Acoustic evidence for shallow gas accumulations in the sediments of the Eastern Black Sea. *Terra Nova* 14(5):313-320.
- Etiopie G., Papatheodorou G., Christodoulou D., Ferentinos G., Sokos E., Favali P., 2006. Methane and hydrogen sulfide seepage in the NW Peloponnesus petroliferous basin (Greece): origin and geohazard. *AAPG Bull* 90(5):701-713.
- Etiopie G. and Klusman R.W., 2002. Geologic emissions of methane to the atmosphere. *Chemosphere*, 49:777-789.
- Etiopie G. and Marinaro G., 2003. *METS - Methane Sensor laboratory tests*. Technical Report for ASSEM project. Document No d275005a.
- Etiopie G., 2004. GEM— Geologic emissions of methane, the missing source in the atmospheric methane budget: *Atmospheric Environment*, 38(19):3099-3100.
- Etiopie G., 2009. Natural emissions of methane from geological seepage in Europe. *Atmospheric Environment* 43(7):1430-1443.
- Etiopie G., Feyzullaiev A., Baci C.L., Milkov A.V., 2004. Methane emission from mud volcanoes in eastern Azerbaijan: *Geology*, 32(6):465-468.
- Etiopie G., Papatheodorou G., Christodoulou D., Favali P. and Ferentinos G., 2005. Gas hazard induced by methane and hydrogen sulfide seepage in the NW Peloponnesus petroliferous basin (Greece). *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 16(4):1-7.
- Etiopie G., Savini A., Lo Bue N., Favali P., Corselli C., 2009. Deep-sea survey for the detection of methane at the "Santa Maria di Leuca" cold-water coral mounds (Ionian Sea, South Italy). *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* (in press).
- Evans D., King E.L., Kenyon N.H., Brett C., Wallis D., 1996. Evidence for long-term instability in the Storegga Slide off western Norway. *Marine Geology* 130:281-292
- Fader G.B., 1991. Gas-related sedimentary features from the eastern Canadian continental shelf. *Continental Shelf Research* 11:1123-1153
- Fakiris E., Chalari A., Papatheodorou G., 2007: 'A convenient Matlab Graphical User Interface for the analysis of analog sub-bottom profiles'. In *proceedings of the 2nd International Conference & Exhibition on "Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results"*, I: 239-245.

- Faure H., Walter R.C., Grant D.R., 2002. The coastal oasis: Ice age springs on emerged continental shelves. *Global and Planetary Change* 33(1-2):47-56.
- Favali P., Beranzoli L., Calcara M., Dapos Anna G., Etiope G., Frugoni F., Lo Bue N., Marinaro G., Monna S., Montuori C., Sgroi T., Gasparoni F., Cenedese S., Furlan F., Ferentinos G., Papatheodorou G., Christodolou D., Blandin J., Marvaldi J., Rolin J.-F., Clauss G., Gerber H., Coudeville J.-M., Nicot M., Flueh E., Gamberi F., Marani M.P., Neri G., 2004. Single-frame multiparameter platforms for seafloor geophysical and environmental observations: projects and missions from GEOSTAR to ORION. *MTS/IEEE TECHNO-OCEAN*, 4:2000-2007.
- Ferentinos G., Brooks M., Doutsos T., 1985. Quaternary tectonics in the Gulf of Patras. Western Greece. *Journal of Structural Geology* 7:713-717.
- Ferentinos, G., Papatheodorou, G., Collins, M.B., 1988. Sediment Transport processes on an active submarine fault escarpment: Gulf of Corinth, Greece. *Marine Geology* 83 (1-4), pp. 43-61.
- Φερεντίνος, Γ., Παπαθεοδώρου, Γ., Λαμπράκης, Ν., Ραβασόπουλος, Ι., Χριστοδούλου Δ., Παναγόπουλος, Γ., 2005. Παρακολούθηση (monitoring) ποιότητας υδάτινου αποδέκτη των επεξεργασμένων αποβλήτων του βιολογικού καθαρισμού Πατρών. (2002-2003) Σειρά Τεχνικών Εκθέσεων για τη Δ.Ε.Υ.Α.Πατρών.
- Fernández-Puga M.C., Vázquez J.T., Somoza L., Díaz del Río V., Medialdea T., Mata M.P., León R., 2007. Gas-related morphologies and diapirism in the Gulf of Cádiz. *Geo-Marine Letters* 27(2-4):213-221.
- Field M., and Jennings A., 1987, Sea floor gas seeps triggered by a northern California earthquake: *Marine Geology*, v. 77, p. 39– 51.
- Field M.E., Gardner J.V., Jennings A.E., Edwards B.D., 1982. Earthquake-induced sediment failures on a 0.25o slope, Klamath River delta, California. *Geology* 10 (10), pp. 542-546.
- Figueiredo A.G., Nittrouer C.A., Costa E.A., 1996. Gas-charged sediments in the Amazon submarine delta. *Geo-Marine Letters* 16:31-35
- Fish J-P. and Carr H.A., (Eds), 1990. *Sound Underwater Images. A guide to the generation and interpretation of side scan sonar data*. Lower Cape Publishing, Orleans, MA.
- Floodgate G.D. and Judd A.G., 1992. The origins of shallow gas. *Continental Shelf Research* 12:1145-1156
- Flotté N., Sorel D., Müller C., Tensi J., 2005. Along strike changes in the structural evolution over a brittle detachment fault: Example of the Pleistocene Corinth-Patras rift (Greece). *Tectonophysics* 403(1-4):77-94.
- García M.L. and Masson M., 2004. Environmental and geologic application of solid-state methane sensors. *Environmental Geology* 46:1059–1063.
- García-García A., García-Gil S., Vilas F., 1998. Natural gas seepages contribution from the northwestern Spanish coast. In: *Curzi PV, Judd AG (eds) Abstr and Guidebook 5th Int Conf Gas in Marine Sediments*, 9-12 September 1998, Bologna, pp 111-112
- García-García A., Orange D.L., Maher N.M., Heffernan A.S., Fortier G.S., Malone A., 2004. Geophysical evidence for gas geohazards off Iskenderun Bay, SE Turkey. *Marine and Petroleum Geology* 21(10):1255-1264.
- Garcia-Gil S., 2003. A natural laboratory for shallow gas: The Rías Baixas (NW Spain). *Geo-Marine Letters* 23(3-4):215-229.
- Garcia-Gil S., Garcia-Garcia A., Vilas F., 2000. Holocene relict collapse structures in the Ria de Vigo, NW Spain. In: *Shallow Gas Group/VNIOkeangeologia (eds) Abstr Vol 6th Int Conf Gas in Marine Sediments*, 5-9 September 2000, St Petersburg, pp 28-30.
- Garcia-Gil S., Vilas F., Garcia-Garcia A., 2002. Shallow gas features in incised-valley fills (Ria de Vigo, NW Spain): a case study. *Continental Shelf Research* 22:2303-2315.
- Gardner T.N., 2000. An acoustic study of soils that model seabed sediments containing gas bubbles. *Journal of the Acoustical Society of America* 107:163-176
- Gay A., Lopez M., Berndt C., Séranne M., 2007. Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin. *Marine Geology* 244(1-4):68-92.
- Gay A., Lopez M., Cochonat P., Levaché D., Sermondadaz G., Seranne M., 2006c. Evidences of early to late fluid migration from an upper Miocene turbiditic channel revealed by 3D seismic coupled to geochemical sampling within seafloor pockmarks, Lower Congo Basin. *Marine and Petroleum Geology* 23(3):387-399.

- Gay A., Lopez M., Cochonat P., Séranne M., Levaché D., Sermondadaz G., 2006b. Isolated seafloor pockmarks linked to BSRs, fluid chimneys, polygonal faults and stacked Oligocene-Miocene turbiditic palaeochannels in the Lower Congo Basin. *Marine Geology* 226(1-2):25-40.
- Gay A., Lopez M., Ondreas H., Charlou J.-L., Sermondadaz G., Cochonat P., 2006a. Seafloor facies related to upward methane flux within a Giant Pockmark of the Lower Congo Basin. *Marine Geology* 226(1-2):81-95.
- Geletti R., Del Ben A., Busetti M., Ramella R., Volpi V., 2008. Gas seeps linked to salt structures in the central Adriatic Sea. *Basin Research* 20(4):473-487.
- Géli L., Henry P., Zitter T., Dupré S., Tryon M., Çağatay M.N., de Lépinay B.M., Le Pichon X., Şengör A.M.C., Görür N., Natalin B., Uçarkuş G., Özeren S., Volker D., Gasperini L., Burnard P., Bourlange S., the Marnaut Scientific Party, 2008. Gas emissions and active tectonics within the submerged section of the North Anatolian Fault zone in the Sea of Marmara. *Earth and Planetary Science Letters* 274(1-2):34-39.
- Geodekyan A.A., Berlin YA, Bolshakov A.M., Trotsyuk V.Ya., 1991. Distribution of methane in sediments and bottom water of the southern Baltic Sea. *Oceanology* 31:54-59.
- Giurgea V., Rettenmaier D., Pizzin L., Unkel I., Hotzl H., Forster A., Quattrocchi F., 2004. Preliminary hydrogeological interpretation of the Aigion area from the AIG10 borehole data. *C. R. Geoscience* 336:467-475.
- Glasby G.P., 1971. Direct observations of columnar scattering associated with geothermal gas bubbling in the Bay of Plenty, New Zealand. *NZ Journal Marine and Freshwater Research* 5:483-496.
- Gold T. and Soter S., 1980. The deep- earth- gas hypothesis. *Scientific American* 242(6):154-161.
- Gold T., 1999. *The Deep Hot Biosphere*. New York, Copernicus Books.
- Grim M.S., Drake C.L., Heirtzler J.R., 1970. Sub-bottom study of Long Island Sound. *Geological Society of America Bulletin* 81:649-666.
- Haflidason H., Sejrup H.P., Nygard A., Mien Architecture, geometry and slide development. *Marine Geology* 213(1-4):291-321.
- Hagen R.A. and Vogt P.R., 1998. Seasonal variability of shallow biogenic gas in Chesapeake Bay. *Marine Geology* 158:75-88.
- Halliday E.J., Barrie J.V., Chapman N.R., Rohr K.M.M., 2008. Structurally controlled hydrocarbon seeps on a glaciated continental margin, Hecate Strait, offshore British Columbia. *Marine Geology* 252(3-4):193-206.
- Hammer Ø., Webb K.E., Depreiter D., 2009. Numerical simulation of upwelling currents in pockmarks, and data from the Inner Oslofjord, Norway. *Geo-Marine Letters* 29(4):269-275.
- Hampton L.D. and Anderson A.L., 1974. *Acoustics and gas in sediments*: Applied Research Laboratories (ARL) experience. *Natural Gases in Marine Sediments*, pp. 249-273.
- Hampton M.A. and Kvenvolden K.A., 1981. Geology and geochemistry of gas-charged sediment on Kodiak Shelf, Alaska. *Geo-Marine Letters* 1:141-147.
- Hampton M.A., 1983. Geology of the Kodiak Shelf, Alaska: environmental considerations for resource development. *Continental Shelf Research* 1:253-281.
- Hampton M.A., Bouma A.H., Puplan H., von Huene R., 1979. Geo-environmental assessment of the Kodiak Shelf, Western Gulf of Alaska. In: *Proc 11th Offshore Technology Conf*, 30 April-3 May 1979, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, pp 365-376.
- Harrington, P.K., 1985. Formation of pockmarks by pore-water escape. *Geo-Marine Letters* 5 (3), pp. 193-197.
- Hart B.S. and Hamilton T.S., 1993. High-resolution acoustic mapping of shallow gas in unconsolidated sediments beneath the strait of Georgia, British Columbia. *Geo-Marine Letters* 13:49-55.
- Hasiotis T., Papatheodorou G., Ferentinos G., 2002. A string of large and deep gas-induced depressions (pockmarks) offshore of Killini Peninsula, western Greece. *Geo-Marine Letters*, 22:142-149.
- Hasiotis T., Papatheodorou G., Ferentinos G., 2005. A high resolution approach in the recent sedimentation processes at the head of Zakynthos Canyon, western Greece. *Marine Geology* 214(1-3):49-73.
- Hasiotis T., Papatheodorou G., Kastanos N. Ferentinos G., 1996. A pock-mark field in the Patras Gulf (Greece) and its activation during the 14/7/1993 seismic event. *Marine Geology* 130:333-344.

- Hempel P., Spieß V., Schreiber R., 1994. Expulsion of Shallow Gas in the Skagerrak-Evidence from Sub-bottom Profiling, Seismic, Hydroacoustical and Geochemical Data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 38(6):583-601.
- Henriet J.P., Mienert J., 1998. Gas hydrates, relevance to world margin stability and climate change. *Geological Society Special Publication* (137)
- Hicks S.R., Kibblewhite A.C., 1976. Seismic reflection profiling in very shallow waters in the upper Waitemata Harbour, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 19:213-231
- Hill J.M., Halka J.P., Conkwright R., Koczut K., Coleman S., 1992. Distribution and effects of shallow gas on bulk estuarine sediment properties. *Continental Shelf Research* 12:1219-1229
- Hill T.M., Brooks G.R., Duncan D.S., Medioli F.S., 2003. Benthic foraminifera of the Holocene transgressive west-central Florida inner shelf: Paleoenvironmental implications. *Marine Geology* 200(1-4):263-272.
- Hinz K., Kögler F.C., Richter I., Seibold E., 1971. Reflexionsseismische Untersuchungen mit einer pneumatischen Schallquelle und einem Sedimentecholot in der westlichen Ostsee. Teil II, Untersuchungsergebnisse und geologische Deutung. *Meyniana* 21:17-24
- Hochstein M.P., 1970. Seismic measurements in Suva Harbour (Fiji). *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 13:269-281
- Holder G.D. and Bishnoi P.R., 2000. Gas hydrates, challenges for the future. *Annals of the New York Academy of Sciences* 912
- Holmes M.L. and Thor D.R., 1982. Distribution of gas-charged sediment in Norton Sound and Chirikov Basin, northeastern Bering Sea. *Geologie en Mijnbouw* 61:79-89.
- Hornafius J.S., Quigley D., Luyendyk B.P., 1999. The world's most spectacular marine hydrocarbon seeps (Coal Oil Point, Santa Barbara Channel, California): quantification of emissions. *Journal of Geophysical Research* 104:20703-11.
- Horoza S., Lee G.H., Yi B.Y., Yoo D.G., Park K.P., Lee H.Y., Kim W., (...), Lee K., 2009. Seismic indicators of gas hydrate and associated gas in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications of heat flows derived from depths of the bottom-simulating reflector. *Marine Geology* 258(1-4):126-138.
- Horvitz L., 1989. Near-surface evidence of hydrocarbon movement from depth. *Problems of Petroleum Migration* 10:241-269.
- Houghton J., 2005. The global warming. *Reports on progress in Physics* 68:1343-1403.
- Hovland M. and Curzi P.V., 1989. Gas seepage and assumed mud diapirism in the Italian central Adriatic Sea. *Marine and Petroleum Geology* 6:161-169
- Hovland M. and Judd A.G., 1988. *Seabed pockmarks and seepages*. Graham and Trotman, London
- Hovland M. and Judd A.G., 1992. The global production of methane from shallow submarine sediments. *Continental Shelf Research* 12:1231-1238
- Hovland M. and Sommerville J.H., 1985. Characteristics of two natural gas seepages in the North Sea. *Marine and Petroleum Geology* 2:319-326
- Hovland M. and Svensen H., 2006. submarine pingoes: Indicators of shallow gas hydrates in a pockmark at Nyegga, Norwegian Sea. *Marine Geology* 228(1-4):15-23.
- Hovland M. and Thomsen E., 1989. Hydrocarbon-based communities in the North Sea? *Sarsia* 74:29-42.
- Hovland M. and Thomsen E., 1997. Cold-water corals - are they hydrocarbon seep related? *Marine Geology* 137:159-164
- Hovland M., 1981. Characteristics of pockmarks in the Norwegian Trench. *Mar Geol* 39:103-117
- Hovland M., 1982. Pockmarks and the Recent geology of the central section of the Norwegian Trench. *Marine Geology* 47:283-301
- Hovland M., 1983. Elongated depressions associated with pockmarks in the western slope of the Norwegian Trench. *Marine Geology* 51:35-36
- Hovland M., 1990. Suspected gas-associated clay diapirism on the seabed off mid Norway. *Marine and Petroleum Geology* 7:267-276.
- Hovland M., 1992. Pockmarks and gas-charged sediments in the eastern Skagerrak. *Continental Shelf Research* 12:1111-1119.
- Hovland M., 2003. Geomorphological, geophysical, and geochemical evidence of fluid flow through the seabed. *Journal of Geochemical Exploration* 78-79:287-291.

- Hovland M., Judd A.G., Burke R.A., 1993. The global flux of methane from shallow submarine sediments. *Chemosphere* 26:559-578
- Hovland M., Judd A.G., King L.H., 1984. Characteristic features of pockmarks on the North Sea floor and Scotian shelf. *Sedimentology* 31:471-480
- Hovland M., Svensen H., Forsberg C.F., Johansen H., Fichler C., Fosså J.H., Jonsson R., Rueslåtten H., 2005. Complex pockmarks with carbonate-ridges off mid-Norway: Products of sediment degassing. *Marine Geology* 218(1-4):191-206.
- Hovland M., Vasshus S., Heggland R., 1996. Pockmarks in the Norwegian Trench— Some new observations: *4th International Conference: Gas in Marine Sediments*, September 1996.
- Howells K. and McKay A.G., 1977. Seismic profiling in Miramichi Bay, New Brunswick. *Canadian Journal of Earth Sciences* 14:2909-2927
- Hübscher C. and Borowski C., 2006. Seismic evidence for fluid escape from Mesozoic cuesta type topography in the Skagerrak. *Marine and Petroleum Geology* 23(1):17-28.
- Hunt J.M., 1996. *Petroleum geochemistry and geology*. New York, W.H. Freeman and Co. 743 p.
- ICAP, 2001. *Petroleum products, in The energy market in Greece*. Athens, ICAP SA & Delos Communications SA, 287 p.
- Iglesias J. and García-Gil S., 2007. High-resolution mapping of shallow gas accumulations and gas seeps in San Simón Bay (Ría de Vigo, NW Spain). Some quantitative data. *Geo-Marine Letters* 27(2-4):103-114.
- Iglesias J., Ercilla G., García-Gil S., Judd A.G., 2009. Pockforms: an evaluation of pockmark-like seabed features on the Landes Plateau, Bay of Biscay. *Geo-Marine Letters* (in press).
- Jamtveit B., Svensen H., Podladchikov Y.Y., Planke S., 2004. Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins. *Geological Society Special Publication* (234):233-241.
- Jenden P.D., Hilton D.R., Kaplan I.R., Craig H., 1993. Abiogenic hydrocarbons and mantle helium in oil and gas fields. *U.S.G.S Professional Paper* 1570:31-56.
- Jensen J.B., Kuijpers A., Bennike O., Laier T., Werner F., 2002. New geological aspects for freshwater seepage and formation in Eckernförde Bay, western Baltic. *Continental Shelf Research* 22(15):2159-2173.
- Jeong K.S., Cho J.H., Kim S.R., Hyun S., Tsunogai U., 2004. Geophysical and geochemical observations on actively seeping hydrocarbon gases on the south-eastern Yellow Sea continental shelf. *Geo-Marine Letters* 24(1):53-62.
- Johnson J.E., Goldfinger C., Suess E., 2003. Geophysical constraints on the surface distribution of authigenic carbonates across the Hydrate Ridge region, Cascadia margin. *Marine Geology* 202(1-2):79-120.
- Jones G.B., Floodgate G.D., Bennell J.D., 1986. Chemical and microbiological aspects of acoustically turbid sediments: preliminary investigations. *Marine Geotechnology* 6:315-322
- Jørgensen N.O., 1992. Methane-derived carbonate cementation of Holocene marine sediments from Kattegat, Denmark. *Continental Shelf Research* 12:1209-1218
- Josenhans H.W., King L.H., Fader G.B., 1978. A side-scan mosaic of pockmarks on Scotian Shelf. *Canadian Journal of Earth Sciences* 15:831-840
- Jouzel J., Barkov N.I., Barnola J.M., Bender M., Chappellaz J., Genthon C., Kotlyakov V.M., Lipenkov V., Lorius C., Petit J.R., Raynaud D., Raisbeck G., Ritz C., Sowers T., Stievenard M., Yiou F., Yiou P., 1993. Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period. *Nature* 364(6436):407-412.
- Judd A.G., Davies G., Wilson J., Holmes R., Baron G., Brydon I., 1997. Contributions to atmospheric methane by natural gas seepages on the UK continental shelf. *Marine Geology* 137:165-189.
- Judd A.G., Hovland M., Dimitrov, L.I., García Gil S., Jukes V., 2002. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change. *Geofluids* 2(2):109-126.
- Judd A.G. and Hovland M., 1992. The evidence of shallow gas in marine sediments. *Continental Shelf Research*. 12(10):1081-1096.
- Judd A.G., 1990. Shallow gas and gas seepages: a dynamic process? In Ardur D.A. and Green C.D. (eds) *Safety in offshore drilling: the role of shallow gas surveys*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers 27-50.

- Judd A.G. and Hovland M., 2007. *Seabed fluid flow. The impact on Geology, Biology and the Marine Environment*. Chambridge University Press, 475 pp.
- Judd A.G., 2004. Natural seabed gas seeps as sources of atmospheric methane. *Environmental Geology* 46(8):988-996
- Kalogeras I., Loukatos D., Stavrakakis G., 2008. Preliminary report for the strong motion data of the 8 June 2008 Earthquake (Mw 6.4) in Achaia - Elia, Western Greece. Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών <http://www.gein.noa.gr/services/achiaia/achiaia-main.htm>.
- Kamberis E., Rigakis N., Tsaila-Monopolis S., Ioakim C., Sotiropoulos S., 2000a. Shallow biogenic gas-accumulations in late Cenozoic sands of Katakolon Peninsula, western Greece. *Geological Society of Greece Special Publication* 9:121-138.
- Kamberis E., Ioakim C., Tsaila-Monopolis S., Marnelis F., Sotiropoulos S., 2000b. Geodynamic and palaeogeographic evolution of the Ionian area (W. Greece) during upper Cenozoic. *Geological Society of Greece Special Publication* 9:109-120.
- Καμπέρης Ε., 1987. Γεωλογική και πετρελαιογεωλογική μελέτη ΒΔ Πελοποννήσου. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Μεταλλείων – Μεταλλουργών, ΕΜΠ.
- Karpen V., Thomsen L., Suess E., 2004. A new 'schlieren' technique for fluid flow visualization at cold seeps. *Marine Geology* 204:145-159.
- Κατριβέσης Ν., 2003. Τεχνικογεωλογικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή της πόλεως των Πατρών. Κωδικοποίηση και στατιστική επεξεργασία των στοιχείων. Χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (G.I.S.). Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Κατσάνου Κ., 2007. Περιβαλλοντική υδρογεωλογική μελέτη των υδρολογικών λεκανών της ευρύτερης περιοχής του Αιγίου με τη χρήση υδροχημικών μεθόδων. Διατριβή Ειδίκευσης Μ.Δ.Ε. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Kang H.J. and Chough S.K., 1982. Gamagyang Bay, southern coast of Korea: sedimentation on a tide-dominated rocky embayment. *Marine Geology* 48:197-214
- Karisiddaiah S.M. and Veerayya M., 1994. Methane-bearing shallow gas-charged sediments in the eastern Arabian Sea: a probable cause for greenhouse gas. *Continental Shelf Research* 14:1361-1370
- Karisiddaiah S.M., Veerayya M., Vora K.H., Wagle B.G., 1993. Gas-charged sediments on the inner continental shelf off western India. *Marine Geology* 110:143-152
- Keen M.J. and Piper D.J.W., 1976. Kelp, methane, and an impenetrable reflector in a temperate bay. *Canadian Journal of Earth Sciences* 13:312-318
- Keller E.A., Duffy M., Kennett J.P., Hill T., 2007. Tectonic geomorphology and hydrocarbon induced topography of the Mid-Channel Anticline, Santa Barbara Basin, California. *Geomorphology* 89(3-4):274-286.
- Kelley J.T., Dickson S.M., Belknap D.F., Barnhardt W.A., Henderson M., 1994. Giant sea-bed pockmarks: evidence for gas escape from Belfast Bay, Maine. *Geology* 22:59-62
- Kepkay P.E., 1977. *Preliminary investigation of free gas as a control of a sub-bottom acoustic reflector in the fine-grained sediments of Halifax Harbour and St. Margaret's Bay, Nova Scotia*. MSc Thesis, Dalhousie University
- Kim D.C., Lee G.H., Seo Y.K., Kim G.Y., Kim S.Y., Kim J.C., Park S.C., Wilkens R., 2004. Distribution and acoustic characteristics of shallow gas in the Korea Strait shelf mud off SE Korea. *Marine Georesources and Geotechnology* 22 (1-2):21-31.
- King L.H. and MacLean B., 1970. Pockmarks on the Scotian Shelf. *Geological Society of America Bulletin* 81:3141-3148.
- Kitidis V., Tizzard L., Uher G., Judd A., Upstill-Goddard R.C., Head I.M., Gray N.D., Taylor G., Durán R., Díez R., Iglesias J., García-Gil, S., 2007. The biogeochemical cycling of methane in Ria de Vigo, NW Spain: Sediment processing and sea-air exchange. *Journal of Marine Systems* 66(1-4):258-271.
- Klaucke I., Sahling H., Bürk D., Weinrebe W., Bohrmann G., 2005. Mapping deep-water gas emissions with sidescan sonar. *EOS* 86(38):341-343.
- Klaucke I., Sahling H., Weinrebe W., Blinova V., Bürk D., Lursmanashvili N., Bohrmann G., 2006. Acoustic investigation of cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea. *Marine Geology* 231(1-4):51-67
- Klein M. and Edgerton H.E., 1968. Sonar - a modern technique for ocean exploration. *IEEE Spectrum* 5:40-46

- Klusman R.W., Jakel M.E., LeRoy M.P., 1998. Does microseepage of methane and light hydrocarbons contribute to the atmospheric budget of methane and to global climate change? *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*. 11:1-56.
- Klusman R.W., Leopold M.E., LeRoy M.P., 2000. Seasonal variation in methane fluxes from sedimentary basins to the atmosphere: Results from chamber measurements and modeling of transport from deep sources. *Journal of Geophysical Research*. 105D(24):661-670.
- Knebel H.J. and Scanlon K.M., 1985. Sedimentary framework of Penobscot Bay, Maine. *Marine Geology* 65:305-324
- Kögler F.-C. and Larsen B., 1979. The West Bornholm Basin in the Baltic Sea: geological structure and Quaternary sediments. *Boreas* 8:1-22
- Koukouvelas I., Kokkalas S., Xypolias P., 2009. Surface deformation during the Mw 6.4 (8 June 2008) Movri Mountain earthquake in the Peloponnese, and its implications for the seismotectonics of western Greece. *International Geology Review* (in press).
- Koukouvelas I., Mpresiakas A., Sokos E., Doutsos T., 1996 The tectonic setting and earthquake ground hazards of the 1993 Pyrgos earthquake, Peloponnese, Greece. *Journal of Geological Society (London)* 154:39-49.
- Koukouvelas I.K., 1998. The Egion Fault, earthquake-related and long-term deformation, Gulf of Corinth, Greece. *Journal of Geodynamics* 26(2-4):501-513.
- Krastel S., Spiess V., Ivanov M., Weinrebe W., Bohrmann G., Shashkin P., Heidersdorf F., 2003. Acoustic investigations of mud volcanoes in the Sorokin Trough, Black Sea. *Geo-Marine Letters* 23(3-4):230-238.
- Kuşçu İ., Okamura M., Matsuoka H., Gökaşan E., Awata Y., Tur H., Şimşek M., Keçer M., 2005. Seafloor gas seeps and sediment failures triggered by the August 17, 1999 earthquake in the Eastern part of the Gulf of İzmit, Sea of Marmara, NW Turkey. *Marine Geology* 215:193-214.
- Kvenvolden K.A. and Field M.E. 1981. Thermogenic hydrocarbons in unconsolidated sediment of Eel River Basin, offshore northern California. *AAPG Bulletin* 65:1642-1646
- Kvenvolden K.A., 1998. A primer on the geological occurrence of gas hydrate. In: Henriot J-P, Mienert J (eds) Gas hydrates, relevance to world margin stability and climate change. *Geological Society Special Publication* 137:9-30.
- Kvenvolden K.A., 2000. Natural gas hydrate: introduction and history of discovery. In: Max M.D. (ed.) *Natural Gas hydrate in oceanic and permafrost environments*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers: 9-16.
- Kvenvolden K.A., Ginsburg G.D., Soloviev V.A., 1993. Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates. *Geo-Marine Letter* 13:32-40
- Kvenvolden K.A., Nelson C.H., Thor D.R., Larsen M.C., Redden G.D., Rapp J.B., Marais D.J.D., 1979a. Biogenic and thermogenic gas in gas-charged sediment of Norton Sound, Alaska. In: *Proc 11th Offshore Technology Conf*, 30 April-3 May 1979, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 3412, pp 479-486
- Kvenvolden K.A., Weliky K., Nelson C.H., Marais D.J.D., 1979b. Submarine seep of carbon dioxide in Norton Sound, Alaska. *Science* 205:1264-1266
- Kvenvolden, K.A., Lorenson, T.D., Reeburgh, W., 2001. Attention turns to naturally occurring methane seepage. *EOS* 82, 457.
- Laier T., 1992. Shallow gas in northern Kattegat and southern Skagerrak. *Geol Förening Förhandl* 144:244-245
- Laier T., Jørgensen N.O., Buchardt B., Cederberg T., Kuipers A., 1992. Accumulation and seepages of biogenic gas in northern Denmark. *Continental Shelf Research* 12:1173-1186
- Lascaratos A., Salusti E., Papageorgaki G., 1989. Wind-induced upwellings and currents in the gulfs of Patras, Nafpaktos and Korinthos, Western Greece. *Oceanologica Acta* 12(3):159-164
- Lashof D.A. and Ahuja D.R., 1990. Relative contribution of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature* 344:529-531
- Lastras G., Canals M., Amblas D., Ivanov M., Dennielou B., Droz L., Akhmetzhanov A., 2006. Eivissa slides, western Mediterranean Sea: Morphology and processes. *Geo-Marine Letters* 26(4):225-233.
- Lekkas E., Fountoulis I., Papanikolaou D., 2000. Intensity distribution and neotectonic macrostructure Pyrgos earthquake data (26 March 1993, Greece). *Natural Hazards* 21:19-33.

- León R., Somoza L., Medialdea T., Hernández-Molina F.J., Vázquez J.T., Díaz-del-Río V., González, F.J., 2009. Pockmarks, collapses and blind valleys in the Gulf of Cádiz. *Geo-Marine Letters* (in press).
- León R., Somoza L., Medialdea T., Maestro A., Díaz-del-Río V., Fernández-Puga M.C., 2006. Classification of sea-floor features associated with methane seeps along the Gulf of Cádiz continental margin. *Deep-Sea Research II* 53:1464-1481
- Levin F.K., 1962. The seismic properties of Lake Maracaibo. *Geophysics* 27:35-47
- Levy E.M. and Lee K., 1988. Potential contribution of natural hydrocarbon seepage to benthic productivity and the fisheries of Atlantic Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 45(2):349-352.
- Lewis K.B. and Mildenhall D.C., 1985. The Late Quaternary seismic, sedimentary and palynological stratigraphy beneath Evans Bay, Wellington Harbour. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 28:129-152
- Lewis L.F., 1966. *Speed of sound in unconsolidated sediments of Boston Harbor*. Massachusetts. MSc Thesis, Massachusetts Institute of Technology
- Link W.K., 1952. Significance of oil and gas seeps in world oil exploration. *AAPG Bulletin* 36(8):1505-1540
- Loncke L. and Mascle J., 2004. Mud volcanoes, gas chimneys, pockmarks and mounds in the Nile deep-sea fan (Eastern Mediterranean): Geophysical evidences. *Marine and Petroleum Geology* 21(6):669-689.
- Long D., 1992. Devensian Late-glacial gas escape in the central North Sea. *Continental Shelf Research* 12:1097-1110
- Lykousis V., Roussakis G., Sakellariou D., 2009. Slope failures and stability analysis of shallow water prodeltas in the active margins of Western Greece, northeastern Mediterranean Sea. *International Journal of Earth Sciences* 98(4):807-822.
- Lykousis V. and Chronis G., 1989. Mechanisms of sediment transport and deposition: sediment sequences and accumulation during the Holocene on the Thermaikos Plateau, the continental slope, and basin (Sporadhes Basin), northwestern Aegean Sea, Greece. *Marine Geology* 87:15-26.
- Λυκούσης Β., 2000. *Προδελταϊκές αποθέσεις: Σεισμική στρωματογραφία – Ιζηματολογία – Ευστάθεια πρηνών*. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- MacDonald I.R., 1998. Natural oil spills *Scientific American* 279:56-61.
- Maestro A., Barnolas A., Somoza L., Lowric A., Lawton T., 2002. Geometry and structure associated to gas-charged sediments and recent growth faults in the Ebro Delta (Spain). *Marine Geology* 186(3-4):351-368.
- Mahfoud R.F. and Beck J.N., 1995. Why the Middle East fields may produce oil forever. *Offshore* 55(4):56-62, 106.
- Mallet R., 1854. Third report on the facts of earthquake phenomena. *Report of the British Association for the Advancement of Science* 24, 113.
- Manheim F.T., 1967. Evidence for submarine discharge of water on the Atlantic continental slope of the southern United States, and suggestions for further research. *Transactions New York Academy of Science* 29 (29), pp. 839-853.
- Margaris B., Papaioannou C., Theodoulidis N., Savvaidis A., Klimis N., Makra K., Demosthenus, M., Karakostas C., Lekidis V., Makarios T., Salonikios T., Athanasopoulos G., Mylonakis G., Papantonopoulos C., Efthymiadou V., Kloukinas P., Ordonez I., Vlachakis V., Stewart J. (2008). Preliminary Report on the Principal Seismological and Engineering Aspects of the Mw=6.5 Achaia-Ilia (Greece) Earthquake on 8 June 2008. *Report for Web Dissemination Geotechnical Earthquake Engineering Reconnaissance*, GEER Association Report No. GEER-013.
- Marinaro G., Etiope G., Gasparoni F., Calore D., Cenedese S., Furlan F., Masson M., Favali P., Blandin J (2004) GMM—a gas monitoring module for long-term detection of methane leakage from seafloor. *Environmental Geology* 46:1053–1058
- Marinaro G., Etiope G., Lo Bue N., Favali P., Papatheodorou G., Christodoulou D., Furlan F., Gasparoni F., Ferentinos G., Masson M., Rolin J-F., 2007. A cabled monitoring module for gas seepage: the first experiment in a pockmark (Patras Gulf, Greece). *IEEE/CNF* 343-348.
- Marinaro G., Etiope G., Lo Bue N., Favali P., Papatheodorou G., Christodoulou D., Furlan F., Gasparoni F., Ferentinos G., Masson M., Rolin J-F., 2006. Monitoring of a methane-seeping pockmark by cabled benthic observatory (Patras Gulf, Greece). *Geo-Marine letters* 26:297-302.

- Martens C.S. and Berner R.A., 1977. Interstitial water chemistry of anoxic Long Island Sound sediments. 1. Dissolved gases. *Limnology and Oceanography* 22:10-25
- Martens C.S. and Klump J.V., 1980. Biogeochemical cycling in an organic rich coastal marine basin. 1. Methane sediment-water exchange processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 44:471-490
- Martens C.S., 1976. Control of methane sediment-water bubble transport by macroinfaunal irrigation in Cape Lookout Bight, North Carolina. *Science* 192:998-1000
- Martens CS, Albert DB, Alperin MJ (1998) Biogeochemical processes controlling methane in gassy coastal sediments. Part 1. A model coupling organic matter flux to gas production, oxidation and transport. *Cont Shelf Res* 18:1741-1770
- Martin J.B., Kastner M., Henry P., Le Pinchon X., Lallement S., 1996. Chemical and isotopic evidence for sources of fluids in a mud volcano field seaward of the Barbados accretionary wedge *Journal of Geophysical Research* 101:20325-20345
- Masson D.G., Bett B.J., Billett D.S.M., Jacobs C.L., Wheeler A.J., Wynn R.B., 2003. The origin of deep-water, coral-topped mounds in the northern Rockall Trough, Northeast Atlantic. *Marine Geology* 194(3-4):159-180.
- Mattson M.D. and Likens G.E., 1990. Air pressure and methane fluxes. *Nature* 347(6295):718-719.
- McCartney B.S. and Bary B.M., 1965. Echo-sounding on probable gas bubbles from the bottom of Saanich Inlet, British Columbia. *Deep-Sea Research* 12:285-294
- McClennen C.E., 1989. Microtopography and surficial sediment patterns in the central Gulf of Maine: a 3.5 kHz survey and interpretation. *Marine Geology* 89:69-85.
- McIver R.D., 1981. Gas Hydrate. In Meyer R.F. and Olson J.C. (eds) *Long-term energy resources*. Boston MA Pitman Publishing, 713-726.
- McMaster R.L., 1984. Holocene stratigraphy and depositional history of the Narragansett Bay System, Rhode Island, U.S.A. *Sedimentology* 31:777-792.
- McNeill L.C., Cotterill C.J., Henstock T.J., Bull J.M., Stefatos A., Collier R.E.L., Papatheodorou G., Ferentinos G., Hicks S.E., 2005. Active faulting within the offshore western Gulf of Corinth, Greece: Implications for models of continental rift deformation. *Geology* April 2005 33:241-244.
- McQuaid J. and Mercer A., 1991. Air pressure and methane fluxes. *Nature* 351(6327):528.
- Melis N.S., Brooks M., Pearce R.G., 1989. A microearthquake study in the Gulf of Patras region, western Greece, and its seismotectonic interpretation. *Geophysical Journal International* 98(3):515-524.
- Merlivat L. and Memery L., 1983. Gas exchange across an air-water interface: Experimental results and modeling of bubble contribution to transfer. *Journal of Geophysical Research* 88:707-724.
- Μήτσης Χ., Παπαθεοδώρου Γ., Ραβασόπουλος Ι., Χριστοδούλου Δ., Φερεντίνος Γ., 2002. Στατιστική ανάλυση μορφομετρικών και ιζηματολογικών παραμέτρων υποθαλάσσιων κρατήρων διαφυγής αερίων (rockmarks), ως μέσο μελέτης της εξέλιξης ενός ενεργού πεδίου τους, στο ΒΑ-ικο Πατραϊκό κόλπο. *Πρακτικά του Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου της Ε.Γ.Ε, Θεσσαλονίκη, 3-6 Οκτωβρίου 2002, Τόμος Ι, σελ. 194-201.*
- Milkov A.V. and Sassen R., 2003. Preliminary assessment of resources and economic potential of individual gas hydrate accumulations in the Gulf of Mexico continental slope. *Marine and Petroleum Geology* 20(2):111-128
- Miller D.C. and Ullman W.J., 2004. Ecological consequences of ground water discharge to Delaware Bay, United States. *Ground Water* 42(7):959-970.
- Milliman J.D., Qin Y.S., Butenko J., 1985. Geohazards in the Yellow Sea and East China Sea. In: *Proc 17th Offshore Technology Conf*, 5-8 May 1985, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 4965, pp 73-81
- Monopolis D. and Bruneton A., 1982. Ionian Sea (western Greece): Its structural outline deduced from drilling and geophysical data. *Tectonophysics* 83:227-242.
- Moody D.W. and Van Reenan E.D., 1967. High-resolution subbottom seismic profiles of the Delaware Estuary and Bay mouth. *U.S.G.S. Professional Paper* 575-D:247-252.
- Mullins H.T. and Nagel D.K., 1982. Evidence for shallow hydrocarbons offshore northern Santa Cruz County, California. *AAPG Bulletin* 66:1130-1140.
- Murthy K.S.R. and Rao T.C.S., 1990. Acoustic wipeouts over the continental margins off Krishna, Godavari and Mahanadi River Basins, East Coast of India. *Journal of the Geological Society of India* 35:559-568

- Naudts L., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Borowski C., Batist M.D., 2008. Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleo-delta, NW Black Sea. *Marine Geology* 251(3-4):253-267.
- Nelson C.S. and Healy T.R., 1984. Pockmark-like structures on the Poverty Bay seabed - possible evidence for submarine mud volcanism. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 27:225-230
- Newman K.R., Cormier M.-H., Weissel J.K., Driscoll N.W., Kastner M., Solomon E.A., Robertson G., (...), Eustice, R., 2008. Active methane venting observed at giant pockmarks along the U.S. mid-Atlantic shelf break. *Earth and Planetary Science Letters* 267(1-2):341-352.
- Newton R.S., Cunningham R.C., Schubert C.E., 1980. Mud volcanoes and pock-marks: seafloor engineering hazards or geological curiosities? In: *Proc 12th Offshore Technology Conf*, 4-7 May 1980, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 3729, pp 425-436.
- Νίκας Κ., 2004. Υδρογεωλογικές συνθήκες Β-1 τμήματος νομού Αχαΐας. Διδακτορική διατριβή Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Norman J.M., Kucharik C.J., Gower S.T., Baldocchi D.D., Crill P.M., Rayment M., Savage K., Striegl R.G., 1997. A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres* 102(24):28771-28777.
- Noth S., 1997. High H₂S contents and other effects of thermochemical sulfate reduction in deeply buried carbonate reservoirs: A review. *Geologische Rundschau* 86:275-287.
- Okyar M. and Ediger V., 1999. Seismic evidence of shallow gas in the sediments on the shelf off Trabzon, southeastern Black Sea. *Continental Shelf Research* 19:575-587
- Orange D.L., García-García A., McConnell D., Lorenson T., Fortier G., Trincardi F., Can E., 2005. High-resolution surveys for geohazards and shallow gas: NW Adriatic (Italy) and Iskenderun Bay (Turkey). *Marine Geophysical Researches* 26(2-4):247-266.
- Orange D.L., Yun J., Maher N., Barry J., Greene G., 2002. Tracking California seafloor seeps with bathymetry, backscatter and ROVs. *Continental Shelf Research* 22(16):2273-2290.
- Ori G.G., 1989. Geological history of the extensional basin of the Gulf of Corinth (?Miocene Pleistocene), Greece. *Geology* 17:918-921.
- Østmo S.R., Butenko G., Bryn P., 1988. Shallow gas in the Oseberg, Brage and Troll fields North Sea, 60°30' N. In: *Proc 20th Offshore Technology Conf*, 4-7 May 1988, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 5714, pp 293-300.
- Pacchiani F. and Lyon-Caen H., 2010. Geometry and spatio-temporal evolution of the 2001 Agios Ioannis earthquake swarm (Corinth Rift, Greece). *Geophysical Journal International* 180(1):59-72.
- Παπανικολάου, Δ., Χρόνης, Γ., Λυκούσης, Δ., Σακελλαρίου, Δ., Παπούλια, Ι., 1997. Νεοτεκτονική δομή του Δ. Κορινθιακού κόλπου και γεωδυναμικά φαινόμενα του σεισμού του Αιγίου. *Πρακτικά 5ου Πανελληνίου Συμποσίου Ωκεανογραφίας & Αλιείας*, 1997, Τόμος Ι, 415-418.
- Papathodorou G., Christodoulou D., Ferentinos G., 2007. Gas charged sediments and associated seabed morphological features in the Aegean and Ionian seas, Greece. *Contribution 13 (in Powerpoint format)*. In: "Seabed Fluid Flow. The impact on Geology, Biology and the Marine Environment" by Alan Judd and Martin Hovland, Cambridge University Press, Cambridge CB2 2RU, UK, p. 475.
- Papathodorou G., Christodoulou D., Geraga M., Etiope G., Ferentinos G., 2007. The pockmark field of the Gulf of Patras: An ideal natural laboratory for studying seabed fluid flow" In: ZELILIDIS, A., PAPATHEODOROU, G. and GERAGA, M. (eds.): *Sedimentology of western and central Greece from recent to Triassic*. 25th IAS Meeting of Sedimentology, Patras, 2007, Field Trip Guidebook, p. 43-62.
- Papathodorou G., Hasiotis T., Ferentinos G., 1993. Gas charged sediments in the Aegean and Ionian Seas, Greece. *Marine Geology* 112:171-184.
- Παπαθεοδώρου Γ. και Κοντόπουλος Ν., 1998. Καθορισμός των διευσθύνσεων μεταφοράς των επιφανειακών ιζημάτων του Πατραϊκού και Αμβρακικού κόλπου με τη μέθοδο McLaren". *Πρακτικά 8ου Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρεία με έμφαση στην Περιβαλλοντική Γεωλογία*, Πάτρα 27-29 Μαΐου, σελ. 145-155.
- Παπαθεοδώρου Γ., Λαυρεντάκη Μ., Μουρελάτος Π., Βουτσινάς Κ. και Ξένος Κ. (2001). "Κρατήρες διαφυγής αερίων (?) στον πυθμένα της λιμνοθάλασσας του Αιτωλικού." *Αλιευτικά Νέα* 238 Απρίλιος 2001, σελ. 73-87.
- Παπαθεοδώρου Γ., Χασιώτης Θ., Φερεντίνος Γ., Βογιατζάκης Ι., 1995. Θαλάσσιες Γεωλογικές και ανθρωπογενείς επικινδυνότητες και επίδρασή τους στην πόντιση αγωγών και καλωδίων. Γεωφυσικές έρευνες για τον εντοπισμό τους και την επιλογή της ασφαλέστερης οδού πόντισης. Εκδ. ΕΘΑΓΕΦΩ, Πάτρα.

- Παπαζάχος, Β. και Παπαζάχου Κ (1989) Οι σεισμοί της Ελλάδας. Εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Park S.C., Jang K.M., Lee S.D., 1990. High-resolution seismic study of modern fine-grained deposits: inner shelf off the southeastern coast of Korea. *Geo-Marine Letters* 10:145-149
- Park S.C., Lee S.D., Song Y.I., 1995. Acoustic characters and distribution pattern of modern fine-grained deposits in a tide-dominated coastal bay: Jinhae Bay, southeast Korea. *Geo-Marine Letters* 15:77-84
- Paull C.K., Brewer P.G., Ussler III W., Peltzer E.T., Rehder G., Clague D., 2002. An experiment demonstrating that marine slumping is a mechanism to transfer methane from seafloor gas-hydrate deposits into the upper ocean and atmosphere. *Geo-Marine Letters* 22(4):198-203.
- Paull C.K., Ussler III W., Maher N., Greene H.G., Rehder G., Lorenson T., Lee H., 2002. Pockmarks off Big Sur, California. *Marine Geology* 181(4):323-335.
- Paull C.K., Ussler III W., Holbrook W.S., Hill T.M., Keaten R., Mienert J., Haflidason H., (...), Lorenson T.D., 2008. Origin of pockmarks and chimney structures on the flanks of the Storegga Slide, offshore Norway. *Geo-Marine Letters* 28(1):43-51.
- Pavlidis S., Koukouvelas I., Kokkala S., Stamatopoulos, L., Keramydas I., Tsodoulos I., 2004. Late Holocene evolution of the east Eliki fault, Gulf of Corinth (central Greece). *Quaternary International* 115-116:139-154.
- Perissoratis C., Piper D.J.W., Lykousis V., 2000. Alternating marine and lacustrine sedimentation during late Quaternary in the Gulf of Corinth rift basin, central Greece. *Marine Geology* 167:391-411.
- Pilcher R. and Argent J., 2007. Mega-pockmarks and linear pockmark trains on the West African continental margin. *Marine Geology* 244(1-4):15-32.
- Ploessel M.R., Crissman S.C., Rudat J.H., Son R., Lee C.F., Randall R.G., Norton M.P., 1979. Summary of potential hazards and engineering constraints, proposed OCS lease sale no. 48, offshore southern California. In: *Proc 11th Offshore Technology Conf*, 30 April-3 May 1979, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 3398, pp 355-363
- Poulimenos G., Zelilidis, A., Kontopoulos, N. & Doutsos T., 1993. Geometry of trapezoidal fan deltas and their relationship to extensional faulting along the south-western active margins of the Corinth rift, Greece. *Basin Research*. 5:179-192.
- Pouqueville F., 1826. *Voyage de la Grece*. Vol. 4, ch. 8.
- Premchitt J., Rad N.S., To P., Shaw R., James J.W.C., 1992. A study of gas in marine sediments in Hong Kong. *Continental Shelf Research* 12:1251-1264.
- Quigley D.C., Hornafius J.S., Luyendyk B.P., Francis R.D., Clark J., Washburn L., 1999. Decrease in natural marine hydrocarbon seepage near Coal Oil Point, California, associated with offshore oil production. *Geology* 27:1047-1050.
- Ravasopoulos I., 2000. *Geochemistry of sediments of an active pockmark field, Gulf of Patras, Greece*. MSc Thesis Bangor, University of Wales, UK.
- Ravasopoulos J., Christodoulou D., Papatheodorou G., Ferentinos G., 2006. Sedimentological and geochemical processes of an active pockmark field, Gulf of Patras, Greece: a multivariate statistical approach. *17th International Sedimentological Congress*, Fukuoka, Japan.
- Ravasopoulos J., Papatheodorou G., Kapos J., Geraga M., Koliadima A., Xenos K., 2002. A promising methodology for the detection of pockmarks activation in nearshore sediments. *Instrumentation Science & Technology* 30(2):139-155.
- Rawson S., 1976. An investigation into the occurrence of acoustic turbidity in marine sediments in the UK continental shelf. *Mar Geophys Unit Inst Geol Sci Edinburgh* Rep No 65
- Raynaud D., Jouzel J., Barnola J.M., Chappellaz J., Delmas R.J., Lorius C., 1993. The ice record of greenhouse gases. *Science* 259(5097):926-934.
- Reeburgh W.S. and Heggie D.T., 1974. Depth distribution of gases in shallow water sediments. In: *Kaplan IR (ed) Natural gases in marine sediments*. Plenum, New York, pp 27-45
- Reeburgh W.S., 1969. Observation of gases in Chesapeake Bay sediments. *Limnology and Oceanography* 14:368-375.
- Rehder G., Keir R.S., Suess E., Pohlmann T., 1998. The multiple sources and patterns of methane in North Sea waters. *Aquatic Geochemistry* 4(3-14):403-427.
- Rice D.D., 1992. Controls, habitat, and resource potential of ancient bacterial gas. *Bacterial gas. Proc. conference, Milan 1989*, 91-118.

- Richardson M.D. and Davis A.M. (eds), 1998. Modeling gassy sediment structure and behavior. *Continental Shelf Research* 18(14-15):1669-1964
- Richardson M.D. and Davis A.M., 1999. Modeling methane-rich sediments of Eckernförde Bay. *Continental Shelf Research* 18:1671-1688
- Richmond W.C. and Burdick D.J., 1981. Geologic hazards and constraints of offshore northern and central California. In: *Proc 13th Offshore Technology Conf*, 4-7 May 1981, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 4117, pp 9-17
- Rigakis N. and V. Karakitsios, 1998. The source rock horizons of the Ionian Basin (MW Greece). *Marine and Petroleum Geology* 15:593-617.
- Rintoul B., 1982. ARCO caps Santa Barbara seep. *Pacific Oil World* 75(11):6-9
- Rogers J.N., Kelley J.T., Belknap D.F., Gontz A., Barnhardt W.A., 2006. Shallow-water pockmark formation in temperate estuaries: A consideration of origins in the western gulf of Maine with special focus on Belfast Bay. *Marine Geology* 225(1-4):45-62.
- Rollet N. and Logan G.A., 2005. Geoscience Australia's program for the detection of hydrocarbon seepage on the Yampi Shelf and Arafura Sea. *PESA News* 76:38-40
- Rollet N., Logan G.A., Kennard J.M., O'Brien P.E., Jones A.T., Sexton M., 2006. Characterisation and correlation of active hydrocarbon seepage using geophysical data sets: An example from the tropical, carbonate Yampi Shelf, Northwest Australia. *Marine and Petroleum Geology* 23(2):145-164.
- Rollet N., Logan G.A., Ryan G., Judd A.G., Totterdell J.M., Glenn K., Jones A.T., Kroh F., Struckmeyer H.I.M., Kennard J.M., Earl K.L., 2009. Shallow gas and fluid migration in the northern Arafura Sea (offshore Northern Australia). *Marine and Petroleum Geology* 26(1):129-147.
- Rollet N., Logan G.A., Ryan G., Judd A.G., Totterdell J.M., Glenn K., Jones A.T., (...), Earl K.L., 2009. Shallow gas and fluid migration in the northern Arafura Sea (offshore Northern Australia). *Marine and Petroleum Geology* 26(1):129-147.
- Sahling H., Bohrmann G., Spiess V., Bialas J., Breitzke M., Ivanov M., Kasten S., (...), Schneider R., 2008. Pockmarks in the Northern Congo Fan area, SW Africa: Complex seafloor features shaped by fluid flow. *Marine Geology* 249(3-4):206-225.
- Sandstrom M.W., Meredith D., Kaplan I.R., 1983. Hydrocarbon geochemistry in surface sediments of Alaskan outer continental shelf. Part 2. Distribution of hydrocarbon gases. *AAPG Bulletin* 67:2047-2052
- Sarmiento R. and Kirby R.A., 1962. Recent sediments of Lake Maracaibo. *Journal of Sedimentary Petrology* 32:698-724
- Savini A., Malinverno E., Etiope G., Tessarolo C., Corselli C., 2009. Shallow seep-related seafloor features along the Malta plateau (Sicily channel - Mediterranean Sea): Morphologies and geo-environmental control of their distribution. *Marine and Petroleum Geology* 26(9):1831-1848.
- Scanlon K.M. and Knebel H.J., 1989. Pockmarks in the floor of Penobscot Bay, Maine. *Geo-Marine Letters* 9:53-58.
- Schumacher D., 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. In Schumacher D. and Abrams M. (eds) *Hydrocarbon Migration and its near-surface expression* American Association of Petroleum Geologists Memoir 66:71-89.
- Schroot B.M., Klaver G.T., Schüttenhelm R.T.E., 2005. Surface and subsurface expressions of gas seepage to the seabed - Examples from the Southern North Sea.. *Marine and Petroleum Geology* 22: 499-515.
- Schubel J.R. and Schiemer E.W., 1973. The cause of the acoustically impenetrable, or turbid, character of Chesapeake Bay sediments. *Marine Geophysical Research* 2:61-71
- Schubel J.R., 1974. Gas bubbles and the acoustically impenetrable, or turbid, character of some estuarine sediments. In: *Kaplan I.R. (ed) Natural gases in marine sediments*. Plenum, New York, pp 275-298
- Schüler F., 1952. Untersuchungen über die Mächtigkeiten von Schlickschichten mit Hilfe des Echographen. *Deutsch Hydrogr Z* 5:220-231
- Seliverstov N.I., Torokhov P.I., Egorov Y.O., Dubrovsky V.N., Taran Y.A., Kokarev S.G., 1994. Active seeps and carbonates from the Kamchatsky Gulf (East Kamchatka). *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 41:50-54
- Selley R., 1998. *Elements of Petroleum Geology*. 2nd Edition, London, Academic Press.

- Shankar U., Thakur N.K., Ashalatha B., 2006. Fluid flow related features as an indicator of potential gas hydrate zone: Western continental margin of India. *Marine Geophysical Researches* 27(3):217-224.
- Sibuet M. and Olu K., 1998. Biogeography, biodiversity and fluid dependence of deep-sea cold-seep communities at active and passive margins. *Deep-Sea Res. II* 352.
- Siddiquie H.N., Rao D.G., Veerayya M., Wagle B.G., 1980. Acoustic masking due to gases in shallow seismic profiling on the shelf off Bombay. *Indian Journal of Marine Sciences* 9:51-54
- Siddiquie H.N., Rao D.G., Vora K.H., 1985. An appraisal of the seabed conditions on the northwestern continental shelf of India. In: *Proc 17th Offshore Technology Conf*, 5-8 May 1985, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 4966, pp 83-92
- Siddiquie H.N., Rao D.G., Vora K.H., Topgi R.S., 1981. Acoustic masking in sediments due to gases on the western continental shelf of India. *Marine Geology* 39:M27-M37
- Sills G.C. and Wheeler, S.J., 1992. The significance of gas for offshore operations. *Continental Shelf Research* 12(10):1239-1250.
- Sills G.C., Nageswaran, S., 1984. Compressibility of gassy soils. *Proceedings of Oceanology International, Society for Underwater Technology*, Brighton, England, pp 26-118.
- Söderberg P. and Flodén T., 1992. Gas seepages, gas eruptions and degassing structures in the seafloor along the Strömman tectonic lineament in the crystalline Stockholm Archipelago, east Sweden. *Continental Shelf Research* 12:1157-1171
- Solheim A. and Elverhøi A., 1985. A pockmark field in the central Barents Sea: gas from a petrogenic source? *Polar Research* 3:11-19
- Solheim A. and Larson F.R., 1987. Seismic indications of shallow gas in the northern Barents Sea. *Norw Polar Res Inst Rep* 36
- Soter S., 1999. Macroscopic seismic anomalies and submarine pockmarks in the Corinth–Patras rift, Greece. *Tectonophysics* 308:275–290
- Stefanon A., 1980. The acoustic response of some gas-charged sediments in the northern Adriatic Sea. In: *Kuperman W.A., Jensen FB (eds) Bottom-interacting ocean acoustics*. Plenum, New York, pp 73-84.
- Stefatos, A., Papatheodorou, G., Ferentinis, G., Leeder, M., Collier, R., 2002. Seismic reflection imaging of active offshore faults in the Gulf of Corinth: Their seismotectonic significance. *Basin Research* 14(4):487-502.
- Στεφάτος Α., 2005. Μελέτη ιζηματογενών διεργασιών και τεκτονικών δομών στον κορινθιακό κόλπο με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Stiles N.T., Breslau L.R., Beeston M.D., 1969. The riverbed roughness and sub-bottom structure of the main shipping channel to Sai Gon, RVN (Nga Bay, Long Tau, Nha Be, and Sai Gon Rivers). *Naval Oceanogr Off Washington DC Informal Rep* IR No 69-42
- Suess E. and Massoth G.J., 1984. Evidence for venting of pore waters from subducted sediments of the Oregon continental margins. *EOS*, 65, 1089.
- Suess E., Bohrmann G., von Huene R., Linke P., Wallmann K., Lammers S., Sahling H., G.Winckler, Lutz R., Orange D., 1998. Fluid venting in the eastern Aleutian subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 103(B2):2597-2614.
- Sultan N., Cochonat P., Cayocca F., Boirillet J.-F., Colliat J.L., 2004. Analysis of submarine slumping in the Gabon continental slope. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 88(6):781-799.
- Sultan N., Voisset M., Marsset T., Vernant A.M., Cauquil E., Colliat J.L., Curinier V., 2007. Detection of free gas and gas hydrate based on 3D seismic data and cone penetration testing: An example from the Nigerian Continental Slope. *Marine Geology* 240(1-4):235-255.
- Sumida P.Y.G., Yoshinaga M.Y., Madureira L.A.S.-P., Hovland M., 2004. Seabed pockmarks associated with deepwater corals off SE Brazilian continental slope, Santos Basin. *Marine Geology* 207(1-4):159-167.
- Ταβλά Χ., 2005. Μελέτη της επίδρασης της εκφόρτισης του Υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στο σχηματισμό υποθαλάσσιων κρατήρων (pockmarks) στον Κόλπο του Ελαιώνα, με τη χρήση υδροχημικών και ισοτοπικών αναλύσεων. Διατριβή Ειδικεύσης Μ.Δ.Ε., Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Taniguchi M., Burnett W.C., Cable J.E., Turner J.V., 2002. Investigation of submarine groundwater discharge. *Hydrological Processes* 16(11):2115-2129.

- Tarasov V.G., Gebruk A.V., Shulkin V.M., Kamenev G.M., Fadeev V.I., Kosmynin V.N., Malakhov V.V., Starynin D.A., Obzhirov A. I., 1998. Effect of shallow-water hydrothermal venting on the biota of Matupi Harbour (Rabaul Caldera, New Britain Island, Papua New Guinea). *Continental Shelf Research*, 19(1):79-116.
- Taylor D.I., 1992. Nearshore shallow gas around the U.K. coast. *Continental Shelf Research* 12:1135-1144
- Thiele R., 1983. Measured dependence of transmission loss and reverberation from the sea-bottom at the Fladen Ground Experiment. In: Pace N.G. (ed) *Acoustics and the sea-bed*. Bath University, Bath, pp 207-213
- Trotsyuk V.Y. and Avilov V.I., 1988. Disseminated flux of hydrocarbon gases from the sea bottom and a method of measuring it. *Doklady Earth Sciences* 291:218-220.
- Τσαρπαλής Π., 2008. Μελέτη πεδίου κρατήρων Ελαιώνα Διακορυβή. Διατρυβή Ειδικευσης Μ.Δ.Ε. Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Tselentis G., 1998. Fault lengths during the Patras 1993 earthquake sequence as estimated from the pulse width of initial P wave. *Pure and Applied Geophysics* 152(1):75-89
- Tselentis G., Melis N., Sokos E., 1994. The Patras (July 14, 1993; Ms=5.4) earthquake sequence. *Bulletin of the Geological Society of Greece* XXX/5:159-165.
- U.S.G.S., 1975. Map showing oil and gas fields, leased areas, and seeps in the Santa Barbara Channel. US Geol Surv Miscellaneous Geologic Investigations Map I-974
- Uchupi E., Swift S.A., Ross D.A., 1996. Gas venting and late Quaternary sedimentation in the Persian (Arabian) Gulf. *Marine Geology* 129:237-269.
- Ullman W.J., Chang B., Miller D.C., Madsen J.A., 2003. Groundwater mixing, nutrient diagenesis, and discharges across a sandy beachface, Cape Henlopen, Delaware (USA). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57 (3):539-552
- Ussler III, W., Paull, C.K., Boucher, J., Friederich, G.E., Thomas, D.J., 2003. Submarine pockmarks: A case study from Belfast Bay, Maine. *Marine Geology* 202(3-4):175-192.
- Valentine D.L., Blanton D.C., Reeburgh W.S., Kastner M., 2001. Water column methane oxidation adjacent to an area of active hydrate dissociation, Eel River Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65(16):2633-2640.
- Van Weering T.C.E., Jansen J.H.F., Eisma D., 1973. Acoustic reflection profiles of the Norwegian Channel between Oslo and Bergen. *Netherlands Journal of Sea Research* 6:241-263
- Van Weering T.C.E., Klaver G.T., Prins R.A. (eds), 1997. Gas in marine sediments. Selected Papers 3rd Int Conf Gas in Marine Sediments, 25-28 September 1994, Texel. *Marine Geology* 137(1/2):1-190
- Vogel T.M., Oremland R.S., Kvenvolden K.A., 1982. Low-temperature formation of hydrocarbon gases in San Francisco Bay sediment (California, U.S.A.). *Chemical Geology* 37:289-298
- Vogt P.R., Cherkashev G., Ginsburg G., Ivanov G., Milkov A., Crane K., Lein A., Sundvor E., Primenov N., Egorov A., 1997. Haakon Mosby mud volcano provides unusual example of venting. *EOS Transactions, American Geophysical Union* 78:549,556-557
- Von Rath G., 1882. Über eine Schwefelwasserstoff-Exhalation im Meere unfern Mesolongi. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie* pt1:233-236.
- Wanninkhof R., 1992. Relationship Between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean. *Journal of geophysical research* 97(C5):7373-7382.
- Washburn L., Johnson C., Gotschalk C.C., Eglund E.T., 2001. A gas capture buoy for measuring bubbling gas flux in oceans and lakes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18:1411-1420.
- Webb K.E., Hammer Ø., Lepland A., Gray J.S., 2009. Pockmarks in the Inner Oslofjord, Norway. *Geo-Marine Letters* 29:111-124
- Werner F., 1978. Depressions in mud sediments (Eckernförde Bay, Baltic Sea), related to sub-bottom and currents. *Meyniana* 30:99-104
- Wever T.F. and Fiedler H.M., 1995. Variability of acoustic turbidity in Eckernförde Bay (southwest Baltic Sea) related to the annual temperature cycle. *Marine Geology* 125:21-27
- Whelan T., Coleman J., Suhayda J., Roberts H., 1977a. Acoustical penetration and shear strength in gas-charged sediment. *Marine Geotechnology* 2:147-159
- Whelan T., Purvis D., Hart G., Albright J., Smith H., 1977b. Seismic, fluorimetric and chromatographic studies of reservoir leakage. In: *Proc 9th Offshore Technology Conf*, 2-5 May 1977, Houston, TX. Offshore Technology Conference, Richardson, TX, OTC Pap 2937, pp 453-458

- Whiticar M.J. and Werner F., 1981. Pockmarks: submarine vents of natural gas or freshwater seeps? *Geo-Marine Letters* 1:193-199
- Whiticar M.J., 1982. The presence of methane bubbles in the acoustically turbid sediments of Eckernförde Bay, Baltic Sea. In: *Fanning KA, Manheim FT (eds) The dynamic environment of the ocean floor*. Lexington Books, Lexington, MA, pp 219-235
- Whiticar M.J., 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology* 161:291–314.
- Whiticar M.J., 2002. Diagenetic relationships of methanogenesis, nutrients, acoustic turbidity, pockmarks and freshwater seepages in Eckernförde Bay. *Marine Geology* 182(1-2):29-53.
- Whiticar M.J., Faber E. Schoell, M., 1986. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO₂ reduction vs. acetate fermentation-Isotope evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 50(5):693-709.
- Wiesenburg D.A. and Guinasso N.L., 1979. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide, hydrogen in water and seawater. *Journal of Chemical & Engineering Data* 24:356-360.
- Wiese K. and Kevolden K.A., 1993. Introduction to microbial and thermal methane. The future of energy gases. *USGS Professional paper* 1570:13-20.
- Wilkins R.H. and Richardson M.D., 1998. The influence of gas bubbles on sediment acoustic properties: In situ, laboratory, and theoretical results from Eckernforde Bay, Baltic Sea. *Continental Shelf Research* 18(14-15):1859-1892.
- Wilkinson E.R., 1972. *California offshore oil and gas seeps*. Rep Div Oil Gas State of California, Sacramento.
- World Health Organization (W.H.O.), 2003. *Hydrogen sulfide: Human health aspects*. Concise international chemical assessment document, 53.
- Worden R.H. and Smalley P.C., 1996. H₂S-producing reactions in deep carbonate gas reservoirs: Khuff Formation, Abu Dhabi. *Chemical Geology* 133:157–171.
- Worden R.H., Smalley P.C., and Oxtoby N.H., 1995. Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 140°C. *AAPG Bulletin* 79:854–863.
- Ye Y., 1986. Analyses of instability of seabed and substrate in the East China Sea. In: *Advances in underwater technology, ocean science and offshore engineering, Vol 6. Oceanology. Proc Oceanology Int Conf*, 4-7 March 1986, Brighton. Graham and Trotman, London, pp 333-338
- Yuan F., Bennell J.D., Davis A.M., 1992. Acoustic and physical characteristics of gassy sediments in the western Irish Sea. *Continental Shelf Research* 10:1121-1134
- Yun J.W., Orange D.L., Field M.E., 1999. Subsurface gas offshore of northern California and its link to submarine geomorphology. *Marine Geology* 154(1-4):357-368.
- Zhang G., Zhang J., Liu S., Ren J., Xu J., Zhang F., 2008. Methane in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its adjacent marine area: Riverine input, sediment release and atmospheric fluxes. *Biogeochemistry* 91(1):71-84.
- Zelilidis A. and Kontopoulos N., 1996. Significance of fan deltas without toe-sets within rift and piggy-back basins: examples from the Corinth graben and the Mesohellenic trough, Central Greece. *Sedimentology* 43:253-262.
- Zelilidis A., Kontopoulos N., Avramidis P., Piper P., 1998. Tectonic and sedimentological evolution of the Pliocene–Quaternary basins of Zakynthos island, Greece: Case study of the transition from compressional to extensional tectonics. *Basin Research* 10(4):393-408.
- Zelilidis A., Koukouvelas I., Doutsos T., 1988. Neogene paleostress changes behind the forearc fold belt in the Patraikos Gulf area, Western Greece. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Monatshefte* 5(5):311-325.
- Zonenshayn L.P., Murdmaa I.O., Baranov B.V., Kuzentov A.P., Kuzin V.S., Kuzmin M.I., Avdeyko G.P., Stunzhas P.A., Lukashin V.N., Barash M.S., Valyashko G.M., Demina A.A., 1987. An underwater gas source in the Sea of Okhotsk west of Paramushir Island. *Oceanology* 27:598-602

Παράρτημα II. Παγκόσμια εξάπλωση διαφυγών ρευστών

ΠΙΙ. 1. Γεωλογικό περιβάλλον και διαφυγές ρευστών

ΠΙΙ. 1.1. Ωκεανογραφικό καθεστώς

ΠΙΙ. 1.1.1. Παράκτιες Περιοχές

Σε πολλές παράκτιες περιοχές η ιζηματογένεση έχει επηρεαστεί από τοπικές ή ευστατικές μεταβολές της στάθμης της θάλασσας. Οι περιοχές των σημεινών διαφυγών ρευστών δεν είναι σταθερές και ιζήματα που αποτέθηκαν σε παλαιότερες συνθήκες μπορούν να συνεχίζουν να επηρεάζουν τις σύγχρονες διαφυγές ρευστών.

Η διαφυγή γλυκού νερού από τον πυθμένα εντοπίζεται παγκόσμια στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα (Faure et al., 2002). Το νερό διαφεύγει από τον πυθμένα από μη περιορισμένους υδροφόρους σε παράκτιες περιοχές και ως αρτεσιανές πηγές από περιορισμένους υδροφόρους που εμφανίζονται στην ηπειρωτική κρηπίδα.

Σε μικρούς κλειστούς κόλπους και σε δαντελωτές ακτές όπου οι κινήσεις του νερού είναι περιορισμένες, οι σχετικά ήρεμες ωκεανογραφικές συνθήκες βοηθούν στη συγκέντρωση λεπτόκοκκων ιζημάτων και στην μικροβιακή γένεση μεθανίου. Οι συγκεκριμένες συνθήκες είναι κυρίως κατάλληλες για σύγχρονη μεθανογένεση.

Οι *ποταμόκολποι (estuaries)* δέχονται την επίδραση των ποταμών και της προσφοράς ιζημάτων καθώς επίσης παγιδεύουν ιζήματα που μετακινούνται κατά μήκος των ακτών από τα παράκτια ρεύματα.

Τα *Rias* είναι κοιλάδες που έχουν σχηματιστεί από αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Έχουν επηρεαστεί από μεγάλη ιζηματογένεση κατά τη διάρκεια της επίκλυσης της θάλασσας μετά την τελευταία παγετώδη περίοδο.

Τα *φιορδ (fjord)* είναι βαθιοί ποταμόκολποι σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και έχουν επηρεαστεί από τους παγετώνες. Δέχονται μεγάλες ποσότητες ιζημάτων από τους ποταμούς. Πολλά fjord περιέχουν ανοξικά νερά που σε συνδυασμό με τον υψηλό ρυθμό ιζηματογένεσης αποτελούν ένα πολύ καλό περιβάλλον για μεθανογένεση.

Τα *δέλτα* σχηματίζονται από την γρήγορη συγκέντρωση χερσογενών ιζημάτων. Τα δέλτα χαρακτηρίζονται από ιζήματα πλούσια σε οργανικό υλικό, με αποτέλεσμα να συνοδεύονται από μεθανογένεση και διαφυγές ρευστών.

Καταβυθισμένες *παράκτιες πεδιάδες* οι οποίες καταβυθίστηκαν με την Ολοκαινική επίκλυση και είχαν μεγάλη φυτοκάλυψη. Η φυτοκάλυψη που καλύφθηκε από ιζήματα μετά την καταβύθιση σήμερα μετατρέπεται σε τύρφη που μπορεί να είναι πηγή για μικροβιακό μεθάνιο.

Παράκτιοι ποταμόκολποι οι οποίες προστατεύονται από την ανοιχτή θάλασσα, αποτελούν ένα κατάλληλο περιβάλλον για συγκέντρωση ιζημάτων πλούσιων σε οργανικό υλικό και κατά συνέπεια για παραγωγή μικροβιακού μεθανίου.

ΠΙΙ. 1.1.2. Ηπειρωτική Υφαλοκρηπίδα

Η ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα είναι η συνέχεια των ηπείρων και ως τέτοιο μοιράζεται τις γεωλογικές

διακυμάνσεις του χερσαίου περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα κάποιες περιοχές να είναι πιο πιθανόν να συνοδεύονται από διαφυγές ρευστών. Οι πιο σημαντικές περιοχές είναι οι ιζηματογενείς λεκάνες όπου το οργανικό υλικό στα ιζήματα αποικοδομείται από μικροβιακές και θερμογενείς διεργασίες. Είτε σχηματιστεί πετρέλαιο είτε όχι σε μία ιζηματογενή λεκάνη, είναι πιθανό ότι κάποια ιζήματα περιέχουν αρκετό οργανικό άνθρακα ώστε να πραγματοποιηθεί μεθανογένεση.

ΠΙ. 1.1.3. Ηπειρωτική κατωφέρεια και ύψωμα

Τα ιζήματα μεταφέρονται από την ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα με κατολισθήσει, ροές μαζών και τουρβιδιτικά ρεύματα και συγκεντρώνονται στο ηπειρωτικό ύψωμα και στις αβυσσινικές πεδιάδες. Οι μεταφορά των ιζημάτων γίνεται μέσα από canyon τα οποία αλλάζουν θέση με το χρόνο. Εγκαταλειμμένα κανάλια μπορεί να γεμίσουν ιζήματα και κρατήρες μέσα σε αυτά δείχνουν διαφυγές ρευστών. Οι διαφυγές ρευστών όμως κυρίως εντοπίζονται στα ηπειρωτικά υψώματα όπου βαθιά ριπίδια σχηματίζονται. Τα βαθιά ριπίδια σχετίζονται με ποτάμια που κυρίως κατά τις παγετώδους περιόδους έρεαν και διάβρωναν την σημερινή ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα και απόθεταν υλικό στα ριπίδια. Στη δυτική Αφρική τα βαθιά ριπίδια περιέχουν πετρέλαιο και παρουσιάζουν διαφυγές ρευστών ενώ τα ριπίδια στο βόρειο Ατλαντικό αποτελούνται από παγετώδη ιζήματα με λίγο οργανικό υλικό και δεν παρουσιάζουν διαφυγές ρευστών.

ΠΙ. 1.1.4. Αβυσσινικές Πεδιάδες

Στις αβυσσινικές πεδιάδες διαφυγές ρευστών έχουν βρεθεί σε αποθέσεις κοντουριτών. Τα contour ρεύματα δημιουργούνται από διαφορές πυκνότητας και ακολουθούν την τοπογραφία του πυθμένα, και μεταφέρουν λεπτόκοκκο υλικό από την αβυσσινή πεδιάδα το οποίο αποθέτουν όταν μειωθεί η ταχύτητα τους. Οι αποθέσεις κοντουριτών μπορεί να φτάσουν και το ένα χιλιόμετρο πάχος και να υπάρχουν διαφυγές ρευστών όπως στην λεκάνη της Αργεντινής και στο Black Ridge.

ΠΙ. 1.2. Γεωτεκτονικό Καθεστώς

Διαφυγές ρευστών εντοπίζονται τόσο στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών όσο και εντός αυτών. Διαφυγές ρευστών υπάρχουν στα όρια αποκλίνουσων λιθοσφαιρικών πλακών κυρίως λόγω των υδροθερμικών συστημάτων αλλά και λόγω της μαγματικής απελευθέρωσης αερίων.

Στα όρια συγκλινόντων λιθοσφαιρικών πλακών διαφυγές ρευστών εντοπίζονται στο πρίσμα προσαύξησης λόγω της συμπίεσης των ιζημάτων (Suess and Massoth, 1984). Σε λεκάνες προ του τόξου συγκεντρώνονται ιζήματα από τη διάβρωση του νησιωτικού τόξου και του πρίσματος προσαύξησης, στα οποία συγκεντρώνονται αέρια με αποτέλεσμα διαφυγές ρευστών (Yun et al., 1999). Στα νησιωτικά τόξα οι διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα προέρχονται τόσο από υποθαλάσσιες υδροθερμικές πηγές όσο και υποθαλάσσια ηφαίστεια.

Στα περιθώρια οριζόντιας μετατόπισης πλακών όπου παράλληλα ρήγματα οριοθετούν τις ζώνες αυτές, τα ιζήματα στην ρηξιγενείς ζώνες συμπίεζονται με αποτέλεσμα να απελευθερώνονται ρευστά από τα ιζήματα και προκλούνται διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα. Διαφυγές ρευστών εντοπίζονται επίσης και στο εσωτερικό λιθοσφαιρικών πλακών όπου παρατηρείται μαγματική δραστηριότητα με αποτέλεσμα υδροθερμική δραστηριότητα (Jamtveit et al., 2004), στα υποθαλάσσια όρη.

ΠΙΙ. 2. Πίνακας περιοχών όπου έχουν εντοπιστεί διαφυγές ρευστών ή αερίων υδρογονάνθρακες στα επιφανειακά ιζήματα.

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
1	Norton Sound, Θάλασσα Bering, Αλάσκα, Η.Π.Α.	64.00N	165.00 W	Ανοιχτός κόλπος κοντά στο δίαυλο Bering	Μεθάνιο συνοδευόμενο με θαμμένο στρώμα τύρφης, Κρατήρες Διαφυγής Ρευστών (Κ.Δ.Ρ.) στο ηπειρωτικό περιθώριο	Μικροβιακό, θερμογενές CO ₂	Διάφοροι τύποι σεισμικών προφίλ, Αρπάγες Van Veen, πυρηνολήπτες βαρύτητας, αναλύσεις με αέριο χρωματογράφο.	Kvenvolden et al. (1979a, 1979b), Holmes and Thor (1982), Sandstrom et al. (1983)
2	Λεκάνη Chirikov, Θάλασσα Bering, Αλάσκα, Η.Π.Α.	64.00N	168.00 W	Υφαλοκρηπίδα <40-m βάθος νερού	Έντονοι αναλαστήρες, λαμπερές κηλίδες	Κυρίως Μικροβιακό από τις αποθέσεις τύρφης, μικρή παρουσία θερμογενούς αερίου	Όλοι οι τύποι ρηχών και βαθιών σεισμικών προφίλ.	Holmes and Thor (1982)
3	Θάλασσα Bering, Αλάσκα, Η.Π.Α.	61.00N	176.80 W	Λεκάνη / ηπειρωτικό περιθώριο Navarin, υφαλοκρηπίδα	Αργιούχος πηλός με υψηλές συγκεντρώσεις αερίων και σεισμικονιασμένες σεισμικές καταγραφές	Κυρίως Μικροβιακό, και λιγότερο θερμογενές	Airgun, minisparker, uniboom, 3.5 kHz, πυρηνολήπτες βαρύτητας: κοκκομετρία και αέρια χρωματογραφία	Carlson et al. (1985)
4	Υφαλοκρηπίδα Kodiak, Αλάσκα, Η.Π.Α.	56.50N	153.00 W	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα και κατωφέρεια του νησιού Kodiak	Σεισμικονιασμένη καταγραφή, παρουσία αερίων στα τεταρτογενή παγετώδη και μετα - επιλυσεγενή ιζήματα	Μικροβιακό	Σεισμικά προφίλ, πυρηνολήπτες βαρύτητας, vibracores: μοριακή και ισοτοπική ανάλυση αερίων	Hampton et al. (1979), Hampton and Kvenvolden (1981), Hampton (1983)
5	Λεκάνη Ποταμού Eel, Καλιφόρνια, ΗΠΑ	41.80N	124.65 W	Λεκάνη ηπειρωτικού περιθωρίου Βόρειας Καλιφόρνιας, σε βάθος νερού 600 μέτρα	Διάπυρα που περιλαμβάνουν τα σύγχρονα ιζήματα	Θερμογενές συνδεδεμένο με ανώτερους υδρογονάνθρακες	Σεισμικά προφίλ, πυρήνες βαρύτητας, αέρια χρωματογραφία, ισοτοπική ανάλυση, ROV	Kvenvolden and Field (1981), Yun et al. (1999), Orange et al. (2002)
6	Δέλτα ποταμού Klamath, Καλιφόρνια, ΗΠΑ	41.50N	124.25 W	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα	Διαφυγές αερίων, ακουστικές ανωμαλίες που αυξήθηκαν μετά από σεισμικό γεγονός	Μικροβιακό, πιθανότητα παρουσίας θερμογενούς	Σεισμικά προφίλ, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, φωτογράφιση	Field and Jennings (1987)
7	Βόρεια Καλιφόρνια, ΗΠΑ	40.30N	124.62 W	Υφαλοκρηπίδα ανοιχτά του ποταμού Eel	Αέριοι υδρογονάνθρακες στα ιζήματα και λαμπερές κηλίδες.	Μικροβιακό με πιθανή παρουσία θερμογενούς	3.5-kHz τομογράφος υποδομής πυθμένα, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Richmond and Burdick (1981)
8	Βόρεια Καλιφόρνια, ΗΠΑ	39.25N	124.01 W	Υφαλοκρηπίδα στην περιοχή του Point Arena	Αέριοι υδρογονάνθρακες στα ιζήματα και λαμπερές κηλίδες.	Μικροβιακό με πιθανή παρουσία θερμογενούς	.5-kHz τομογράφος υποδομής πυθμένα, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Richmond and Burdick (1981)
9	Όρμος San Francisco, Καλιφόρνια, ΗΠΑ	37.75N	122.50 W	Μεγάλος Ποταμόκολπος	Μεθάνιο δημιουργείται σε παλιρροιακούς λασπούχους υφάλους	Μικροβιακό	Δειγματοληψία ιζημάτων, αέρια χρωματογραφία	Vogel et al. (1982)
10	Ηπειρωτική Υφαλοκρηπίδα στο Monterey, Καλιφόρνια, ΗΠΑ	37.00N	122.25 W	Υφαλοκρηπίδα και ανώτερη κατωφέρεια	Σεισμικονιασμένες καταγραφές, λαμπερές κηλίδες σε σεισμικές καταγραφές δείχνουν την ύπαρξη φουσάλιδων στην υδάτινη στήλη, στα επιφανειακά και στα υποεπιφανειακά ιζήματα, βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα MDAC	Θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα Sparker, δειγματοληψία αερίων, αέρια χρωματογραφία, ROV	Richmond and Burdick (1981), Mullins and Nagel (1982), Orange et al. (2002)
11	Κεντρική Καλιφόρνια, ΗΠΑ	34.70N	120.75 W	Υφαλοκρηπίδα της Santa Maria	Αέριοι υδρογονάνθρακες στα ιζήματα (λαμπερές κηλίδες)	Μικροβιακό με πιθανή παρουσία θερμογενούς	3.5-kHz τομογράφος υποδομής πυθμένα, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Richmond and Burdick (1981)

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
12	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	34.00N	120.00 W	Κανάλι Santa Barbara	Παράκτια λεκάνη, υφαλοκρηπίδα, κατωφέρεια και νησιά. Ανώμαλες ανακλάσεις, φυσική παρουσία διαφυγών αερίων και πετρελαίου.	Μικροβιακό και θερμογενές	Τομογράφοι υποδομής πυθμένα υψηλής διακριτικής ικανότητας, οπτική παρατήρησηση	Wilkinson (1972), Ploessel et al. (1979)
13	Κανάλι Santa Barbara, Καλιφόρνια, ΗΠΑ	34.40N	119.80 W	Εσωτερική Ηπειρωτική Υφαλοκρηπίδα	Κ.Δ.Ρ., Φυσική παρουσία διαφυγών αερίων και πετρελαίου.	Θερμογενές	Πολυδευσμικό Βυθόμετρο, Διάφορες μεθοδολογίες, οπτική παρατήρησηση	Wilkinson (1972), USGS (1975), Rintoul (1982), Keller et al. (2007)
14	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	33.70N	118.50 W	Υφαλοκρηπίδα Santa Monica- San Pedro	Παράκτια υφαλοκρηπίδα, φυσική παρουσία διαφυγών αερίων και πετρελαίου.	Θερμογενές	Διάφορες μεθοδολογίες, οπτική παρατήρησηση	Wilkinson (1972)
15	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	33.50 N	120.30 W	Santa Rosa Ράχη	Παράκτιο περιβάλλον, ανώμαλοι ανακλαστήρες	Μικροβιακό με πιθανή παρουσία θερμογενούς	Τομογράφοι υποδομής πυθμένα υψηλής διακριτικής ικανότητας	Ploessel et al. (1979)
16	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	33.25N	117.75 W	San Pedro- Coronado Υφαλοκρηπίδα και Κατωφέρεια	Παράκτια υφαλοκρηπίδα και κατωφέρεια, ανώμαλοι ανακλαστήρες	Μικροβιακό με πιθανή παρουσία θερμογενούς	Τομογράφοι υποδομής πυθμένα υψηλής διακριτικής ικανότητας	Ploessel et al. (1979)
17	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	33.10N	119.00 W	Santa Barbara εσωτερική πλατφόρμα	Παράκτιο περιβάλλον, ανώμαλοι ανακλαστήρες	Μικροβιακό με πιθανή παρουσία θερμογενούς	Τομογράφοι υποδομής πυθμένα υψηλής διακριτικής ικανότητας	Ploessel et al. (1979)
18	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	32.50N	119.10 W	Tanner and Cortes banks	Παράκτιο περιβάλλον, ανώμαλοι ανακλαστήρες	Μικροβιακό με πιθανή παρουσία θερμογενούς	Τομογράφοι υποδομής πυθμένα υψηλής διακριτικής ικανότητας	Ploessel et al. (1979)
19	Βόρειο Τμήμα του κόλπου του Μεξικού	28.00N	93.00W	Ηπειρωτική Υφαλοκρηπίδα και Κατωφέρεια στον κόλπο του Μεξικού	Δελταικά και ιζηματά υφαλοκρηπίδας, Παρουσία αερίων στα 100 m επιφανειακά ιζηματά, σε ορίζοντες πάχους μερικών μέτρων, πλούσιες αερίων στην υδάτινη στήλη	Μικροβιακό και θερμογενές	Airgun, minisparker, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Whelan et al. (1977a, 1977b), Bernard et al. (1978), Addy and Worzel (1979), Anderson and Bryant (1987, 1989, 1990), Beukelaer et al., 2003
20	Cape Lookout Bight, NC, ΗΠΑ	34.65N	76.54W	Ημιβλίστος κόλπος στο φραγματοειδές νήσι	Μαλακή υλός με φυσικές μεθάνιου να διαφεύγουν	Μικροβιακό	Οπτική παρατήρησηση, ανάλυση ιζημάτων, χημική ανάλυση	Martens (1976), Martens and Klump (1980)
21	Κόλπος Chesapeake, ΗΠΑ	38.00N	76.25W	Μεγάλος ποταμόκολπος μήκους 300 km	Σεισμικονιασμένη καταγραφή, αέρια στα ανώτερα ιζήματα και γεμίματα των παλαιοκαναλιών	Μικροβιακό	Τομογράφοι υποδομής πυθμένα, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης πυρήνες βαρύτητας, ανάλυση X-ray, ανάλυση φυσικών και χημικών παραμέτρων ιζημάτων	Reeburgh (1969), Schubel and Zabawa (1972), Schubel and Schiemer (1972, 1973), Schubel (1974), Reeburgh and Heggie (1974), Hill et al. (1992), Hagen and Vogt (1998)
22	Κόλπος Delaware Bay, ΗΠΑ	39.00N	75.00W	Μεγάλος ποταμόκολπος μήκους 150 km	Φυσαλίδες αερίου σε πλούσια σε οργανικό υλικό ιζήματα του ποταμόκολπου Delaware (ανάντη συνέχεια του κόλπου)	Μικροβιακό	Τομογράφοι υποδομής πυθμένα υψηλής διακριτικής ικανότητας, boomer	Moody and Van Reenan (1967)
23	Long Island Sound, Νέα Υόρκη, ΗΠΑ	41.00N	73.00W	Ρηχός κλειστός ποταμόκολπος (sound)	Σεισμικονιασμένη καταγραφή στα πρόσφατα επιφανειακά λεπτόκοκκα ιζήματα	Πιθανόν Μικροβιακό	minisparker, χημικές αναλύσεις νερού	Grim et al. (1970), Martens and Berner (1977)
24	Όρμος Narragansett, ΗΠΑ	41.75N	71.67W	Ποταμόκολπος	Σεισμικονιασμένη καταγραφή στα Ολοκαινικά λεπτόκοκκα ιζήματα	Μικροβιακό	Uniboom και τομογράφος υποδομής πυθμένα 7.5-kHz	McMaster (1984)
25	Λιμάνι Βοστώνης, ΗΠΑ	42.40N	71.00W	Ημιβλίστος κόλπος	Πηλός, άμμος και υλός με παρουσία αερίων	Μικροβιακό	Επί τόπου μέτρησηση ταχύτητας σεισμικών κυμάτων, πυρήνες βαρύτητας, φυσικές ιδιότητες ιζημάτων	Lewis (1966), Klein and Edgerton (1968)

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
26	Κόλπος Maine ΗΠΑ	43.20N	69.00W	Λεκάνη Wilkinson, λεκάνη υφαλοκρηπίδας	Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz	McClennen (1989)
27	Βόρεια Ακτή Maine ΗΠΑ	44.60N	68.40W	Ποταμόκολποι, περιλαμβανομένων του και του κόλπου Penobscot	Ακουστική σιαά, Κ.Δ.Ρ. σε Ολοκαινικές υλίες	Κυρίως Μικροβιακό, πιθανά θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Knebel and Scanlon (1985), Scanlon and Knebel (1989), Fader (1991), Kelly et al. (1994)
28	Δυτική ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα, ΗΠΑ	36.50N	74.40W	Υφαλόριο	Μεγάλοι Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα, AUV με METS και CTD	Newman et al., 2008
29	Ηπειρωτικό Περιθώριο Ατλαντικού, Η.Π.Α.	36.50N	74.40W	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα	Κ.Δ.Ρ. Σεισμοκονιασμένη καταγραφή, μεθάνιο στην υδάτινη στήλη στο υφαλόριο	Πιθανώς Μικροβιακό ?	Τομογράφος Υποδομής πυθμένα, AUV με CTD και METS	Newman et al., 2008
30	Βόρεια Θάλασσα, Νορβηγία	64.45N	4.5E	Υφαλοκρηπίδα με αποθέσεις της κατολισθησης Storrega	Κ.Δ.Ρ., στηλοειδείς διαταράξεις, MDAC	?	Πολυδесμικό Βυθόμετρο, πολυκάναλα σεισμικά, πυρήνες ιζήματος, γεωχημικές και χρονολογικές αναλύσεις	Hovland et al. (2006) Paull et al. (2008)
31	Κόπος Maine ΗΠΑ	44.3N	69W	Όρμος Belfast	Κ.Δ.Ρ., έντονοι ανακλαστήρες, σεισμοκονιασμένη καταγραφή σε Ολοκαινικές υλίες	Μικροβιακό	Τομογράφος υποδομής πυθμένα boomer, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, γεωχημικές αναλύσεις	Kelley et al.(1994), Ussler et al. (2003) Rogers et al (2006)
32	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	35.40N	121.5E	Λεκάνη Sur	Κ.Δ.Ρ.	Καμία ένδειξη αερίων	Πολυδесμικό βυθόμετρο, ROV, γεωχημικές αναλύσεις νερού και ιζημάτων	Paull, et al. (2002)
33	Διάυλος Hecate, British Columbia, Καναδάς	52.55N	131.20 W	Ανοιχτά του Juan Perez Sound, Νησιά Queen Charlotte Islands	Ολοκαινικές άμμοι και χάλκιες υπερχείνεται παγετοθαλάσσιες υλίες, υλός και άμμοι συχνά με παρουσία αερίων υδρογονανθράκων	Μικροβιακό	Σεισμικά προφίλ υψηλής διακριτικής ικανότητας, EM system: τιμές πορώδους, πυρήνες ιζήματος: μετρήσεις πορώδους	Cheesman et al. (1993)
34	Διάυλος Georgia, British Columbia, Καναδάς	49.20N	123.50 W	Δέλτα ποταμού Fraser, στο στενό της Georgia	Περιοχές δέλτα και προδέλτα, παρουσία αερίου κοντά στην επιφάνεια και κοντά στο στόμιο του ποταμού. Κ.Δ.Ρ. που συνδέονται με ρήγματα	Κυρίως Μικροβιακό, πιθανή η παρουσία θερμογενούς από τα τριτογενή πετρώματα	3.5-kHz τομογράφος υποδομής πυθμένα, Airgun, πολυδесμικό βυθόμετρο	Hart and Hamilton (1993), Barrie and Hill (2004)
35	Saanich Inlet, British Columbia, Καναδάς	48.60N	123.50 W	Μικρός (σαν ψιόρδ) ποταμόκολπος στη Βικτώρια, British Columbia	Φυσαλίδες στην υδάτινη στήλη από τον πυθμένα (190 m), προερχόμενες από ιζήματα πλούσια σε οργανική ύλη.	Μικροβιακό	Ηχοβολιστικές παρατηρήσεις στην υδάτινη στήλη	McCartney and Bary (1965)
36	Όρμος Fundy, Καναδάς	45.10N	66.90W	Όρμος Paddamaquoddy	Ακουστική σιαά, διαφυγές ρευστών	Κυρίως Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
37	Όρμος Fundy, Καναδάς	45.20N	64.20W	Λεκάνη Minas	Ακουστική σιαά, διαφυγές ρευστών	Κυρίως Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
38	Όρμος Fundy, Καναδάς	45.80N	64.40W	Όρμος Chignecto	Ακουστική σιαά, διαφυγές ρευστών	Κυρίως Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
39	Ακτή Nova Scotia, Καναδάς	44.50N	64.40W	Όρμος St. Margaret's	Ακουστική σιαά	Μικροβιακό	Sparker, ανάλυση αερίων	Keen and Piper (1976), Kepkay (1977)
40	Λιμάνι Halifax, Nova Scotia, Καναδάς	44.50N	64.00W	Ποταμόκολπος	Ακουστική σιαά	Μικροβιακό	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Kepkay (1977), Fader (1991)

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
41	Υφαλοκρηπίδα Scotian, Καναδάς	44.00N	62.00W	Υφαλοκρηπίδα Roseway, Λεϊκάνες La Have, Emerald	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	King and MacLean (1970), Josenhans et al. (1978), Hovland et al. (1984), Fader (1991)
42	Κόλπος St. Lawrence, Καναδάς	46.60N	61.30W	Ανατολικός κόλπος του St. Lawrence, κλειστός ρηχός κόλπος	Ακουστική σιιά	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
43	Κόλπος St. Lawrence, Καναδάς	46.10N	62.20W	κλειστός ρηχός κόλπος	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
44	Κόλπος St. Lawrence, New Brunswick, Καναδάς	47.60N	65.00W	Όρμος Miramichi, προστατευμένος ποταμόκολπος	Shallow gas reflector in inner bay muds, acoustic masking	Μικροβιακό	Huntech boomer, shallow seismic reflection profiles	Howells and McKay (1977)
45	Κόλπος St. Lawrence, Καναδάς	48.00N	64.10W	Δυτικός κόλπος, κλειστός ρηχός κόλπος	Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
46	Κόλπος St. Lawrence, Καναδάς	48.20N	65.40W	Baie de Chaleurs, μεγάλος ποταμόκολπος	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
47	Κανάλι Laurentian, Καναδάς	48.00N	65.00W	Βαθύ κανάλι υφαλοκρηπίδας και ποταμόκολπος του ποταμού St. Lawrence	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ., διαφυγές ρευστών	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Hovland et al. (1984), Fader (1991)
48	Κόλπος St. Lawrence, Καναδάς	49.60N	61.70W	Κεντρικός και βόρειος κόλπος, κλειστός ρηχός κόλπος	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
49	Κόλπος St. Lawrence, Καναδάς	49.80N	59.70W	βόρειος κόλπος, κλειστός ρηχός κόλπος	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
50	Κόλπος St. Lawrence, Καναδάς	48.70N	58.90W	Εσωτερικός κόλπος St. George's, Newfoundland	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
51	Ακτή Newfoundland, Καναδάς	47.00N	54.00W	Ποταμόκολποι	Ακουστική σιιά	Μικροβιακό	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
52	Grand Banks, Newfoundland, Καναδάς	46.40N	54.60W	Υφαλοκρηπίδα, St. Pierre Bank	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
53	Grand Banks, Newfoundland, Καναδάς	46.80N	50.60W	Λεϊκάνη Downing, Υφαλοκρηπίδα	Ακουστική σιιά, διαφυγές ρευστών	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
54	Υφαλοκρηπίδα Labrador, Καναδάς	54.40N	56.00W	Υφαλοκρηπίδα ανοιχτά του Hamilton inlet	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
55	Υφαλοκρηπίδα Labrador, Καναδάς	56.60N	60.00W	Nain Bank, Υφαλοκρηπίδα	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
56	Υφαλοκρηπίδα Labrador, Καναδάς	58.00N	61.20W	Skaglek Bank, Υφαλοκρηπίδα	Ακουστική σιιά, Κ.Δ.Ρ.	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Fader (1991)
57	Βόρεια Θάλασσα Barents Καναδάς	76.00N	23.00E	Υφαλοκρηπίδα και ανώτερη κατωφέρεια	Θαλάσσια παγετώδη ιζήματα με διάφορους ακουστικούς χαρακτήρες που δηλώνουν την παρουσία αερίων	Κυρίως Μικροβιακό με πιθανή παρουσία θερμογενούς	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες	Solheim and Larson (1987)
58	Κεντρική Θάλασσα Barents, Καναδάς	76.05N	27.00E	Υφαλοκρηπίδα	Μικροί Κ.Δ.Ρ. σχετιζόμενοι με Ολοκαινικές υλές σε αποτυπώματα παγώνων, σεισμοκονιασμένη καταγραφή	Πιθανά Μικροβιακό	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz	Solheim and Elverhoi (1985)

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
59	Θάλασσα Barents, Καναδάς	72.00N	21.00E	Υφαλόριο	Λασπύχα ηφαίστεια, βιογενή αποτυπώματα, υδρίτες, σε πάχους 3000 μέτρων παγετώδη θαλάσσια ιζήματα	Πιθανά Μικροβιακό	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz, φωτογράφιση	Vogt et al. (1997)
60	British Columbia, Καναδάς	52.20N	130.2W	Υφαλοκρηπίδα	Κ.Δ.Ρ. Λασπύχα ηφαίστεια, MDAC, λαμπρές κηλίδες, σεισμοκονιασμένη καταγραφή	?	Πολυδεσμικό Βυθόμετρο, Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα, πολυκάναλα σεισμικά	Halliday et al. (2008)
61	Δέλτα Αμαζόνιου	3.00N	50.50W	Υφαλοκρηπίδα ανοιχτά του ποταμού Αμαζόνιου	Καλύπτει 31,000 km ² , σε δελταικές αποθέσεις (Σεισμοκονιασμένες καταγραφές, λαμπρές κηλίδες)	Μικροβιακό	Τομογράφοι υποδομής πυθμένα 3.5 kHz και GeoPulse	Figueiredo et al. (1996)
62	Δέλτα Orinoco Βενεζουέλα	9.25N	60.50W	Δέλτα σε Υφαλοκρηπίδα	Πλός με αέρια στην εσωτερική κρηπίδα σε βάθος έως 50 μέτρα	Μικροβιακό	Τομογράφοι υποδομής πυθμένα υψηλής διακριτικής ικανότητας	Butenko and Barbot (1979)
63	Λίμνη Maracaibo, Βενεζουέλα	9.25N	71.50W	Μεγάλη Λίμνη που επικοινωνεί με την Καραϊβική θάλασσα	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή σε επιφανειακά ιζήματα	Μικροβιακό και θερμογενές ?	Μέτρηση ταχύτητας σεισμικών κυμάτων στα ιζήματα, πυρήνες ιζημάτων, ανάλυση αερίων και ιζημάτων.	Levin (1962), Sarmiento and Kirby (1962)
64	Τόξο Αντίλλων	13.80N	57.60W	Πρίσμα προσαύξησης Μπαρμπάντος	Λασπύχο ηφαίστεια σε 4950 μέτρα βάθος, αέριο που προέρχεται από λιώσιμο υδρίτη	Θερμογενές	Πυρήνες ιζημάτων, χημικές και ισοτοπικές αναλύσεις	Martin et al. (1996)
65	Νότιος Ατλαντικός, Βραζιλία	28.5S	45.95E	Ηπειρωτική κατωφέρεια	Κ.Δ.Ρ., βιοποικιλότητα που συνδέεται με διαφυγές	?	Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα, ανάλυση βιοποικιλότητας	Sumida et al. (2004)
66	ΝΑ Ειρηνικός Ωκεανός	44.40S	125W	Πρίσμα προσαύξησης Cascadia	Υδρίτες, κηλίδες υψηλής αναλαστικότητας λόγω MDAC, διαφυγών, υδριτών κοντά στην επιφάνεια	?	Βαθεία σεισμικά, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Johnson et al. (2003)
67	Δυτικό ηπειρωτικό πρεϊθώριο Νορβηγίας	64.75N	5.00E	Κατολισθηση Storegga, 500-2,000 m βάθος νερού	Ακουστική σιιά σε αυτόχθονα ιζήματα στο βόρειο τμήμα της περιοχής κατολισθησης,	Πιθανά από Υδρίτες ή ρηχό αέριο, η γένεση δεν αναφέρεται	τομογράφος υποδομής πυθμένα Boomer, επί τόπου μέτρηση πίεσης των πόρων	Baas et al. (1994), Evans et al. (1996)
68	Ηπειρωτικό πρεϊθώριο Νορβηγίας	64.50N	8.00E	150-350 m βάθος νερού	Θαλάσσιες παγετώδεις υλές παραμορφωμένες από διαφορικό διαπυρισμό λόγω παρουσίας αερίων, διαπυρικές δομές και διαφυγές ρευστών	Μικροβιακό και/ή θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Hovland (1990)
69	Ηπειρωτικό πρεϊθώριο Νορβηγίας	63.90N	8.7E	Ανώτερη κατωφέρεια; 250-290 m βάθος νερού	Κοραλλιογενείς ύφαλος κρύων νερών	?	ROV, τομογράφος υποδομής πυθμένα boomer	Hovland and Thomsen (1997)
70	Osberg, Brage, Troll Fields, Βόρεια Θάλασσα, Νορβηγία	60.60N	3.00E	Υφαλοκρηπίδα	Ακουστική σιιά 20 μέτρα κάτω από τον πυθμένα	?	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz, γεωτρήσεις	Østmo et al. (1988)
71	Διάυλος Νορβηγίας	60.50N	3.50E	Υφαλοκρηπίδα στη βόρειο θάλασσα, 200-400 m βάθος νερού	Διάυλος στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα παγετώδους προέλευσης, Κ.Δ.Ρ., ακουστική σιιά	Πιθανά θερμογενές	Τομογράφος υποδομής πυθμένα boomer, sparkler, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Van Weering et al. (1973), Hovland (1981, 1982, 1983), Hovland et al. (1984), Hovland and Judd (1988)
72	Witch Ground, Fladen Ground, Βόρεια Θάλασσα	58.50N	0.50E	Βόρειο τμήμα της Βόρειας θάλασσας, υφαλοκρηπίδα	Άμμοι και υλές υπερκείμενες μεγάλου πετρελαϊκού πεδίου, Κ.Δ.Ρ. και ακουστική σιιά	Θερμογενές	Διάφορες γεωφυσικές έρευνες, δειγματοληψία ιζημάτων	Thiele (1983), Hovland et al. (1984), Hovland and Sommerville (1985), Hovland and Judd (1988), Long (1992), Sills and Wheeler (1992)

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
73	Νορβηγικό Block 1/9, Βόρεια Θάλασσα	56.40N	2.80E	Περιοχή Ekofisk, κεντρική Βόρεια Θάλασσα	Διαφυγές αερίων σε αμμούχα και ιλύουχα ιζήματα, χαοτικές ανακλάσεις πάνω από αλατούχο διάπυρο.	Θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, αέρια χρωματογραφία και ισοτοπικές αναλύσεις ROV	Hovland and Sommerville (1985)
74	Κόλπος Oslofjord Νορβηγία	59.52N	10.36	Φιόρδ	Κ.Δ.Ρ.	?	Τομογράφος Υποδομής πυθμένα, πυρήνες ιζήματος, ROV, ρευματογράφοι	Webb et al. (2009); Hammer et al. (2009)
75	Βόρεια Θάλασσα Νορβηγία	66N	4.5E	Ηπειρωτική Κατωφέρεια	Κ.Δ.Ρ, έντονοι ανακλαστήρες, MDAC, βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα	Θερμογενές	Τομογράφος υποδομής πυθμένα, πολυκάναλα σεισμικά, ROV, ορυκτολογική και γεωχημική ανάλυση	Hovland et al. (2005)
76	Skagerrak, Δανία	57.85N	9.00E	Νότιο τμήμα του στενού προς τη Βαλτική Θάλασσα στην πλευρά της Βόρειας θάλασσας	Λέριο στα 10 m κάτω από τον πυθμένα με πάχος 23 m καλύπτει περιοχή 5,520 km ² ; Ημίλειστη λεκάνη	Κυρίως Μικροβιακό, πιθανή η παρουσία θερμογενούς	Τομογράφος υποδομής πυθμένα, πολυδεσμικό βυθόμετρο, κυβοτολήπτης, αέρια χρωματογραφία	Hovland (1992), Laier (1992), Hempel et al. (1994)
77	Kattegat, Δανία	57.50N	10.50E	Νότιο τμήμα του στενού Βαλτικής – Βόρειας θάλασσας	Ανθρακική σιμεντοποίηση των Ολοκαινικών ιζημάτων λόγω μεθανο- οξειδωτικών βακτηριών	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz , ισοτοπικές αναλύσεις	Jørgensen (1992), Laier (1992), Laier et al. (1992)
78	Όρμος Eckernförde, Γερμανία	54.50N	10.05E	Μικρός ποταμόκιλλπος στη Βαλτική θάλασσα , περιλαμβάνει τον όρμο του Κίελου και τον ποταμόκιλλπο Flensburger Förde	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή, σε βάθος 20-30 μέτρα. Λέρια σε Ολοκαινικές ιλύες που υπέρκεινται παγετών ιζημάτων, Κ.Δ.Ρ. που σχηματίστηκαν από διαφυγές γλυκού νερού και μεθανίου.	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 12-kHz, 30- kHz, πυρήνες ιζήματος, αέρια χρωματογραφία και ισοτοπικές αναλύσεις	Schüler (1952), Edgerton et al. (1966), Hinz et al. (1971), Werner (1978), Whiticar and Werner (1981), Whiticar (1982), Wever and Fiedler (1995), Abegg and Anderson (1997), Richardson and Davis (1999), Jensen et al. (2002), Whiticar (2002)
79	Βόρεια Θάλασσα, Ολλανδία	54.5N	4E	Λεκάνη σε πετρελαϊκό πέδιο	Κ.Δ.Ρ., σεισμοκονιασμένη καταγραφή, έντονοι ανακλαστήρες, Λέριοι υδρογονάνθρακες στα ιζήματα, διαφυγές στην υδάτινη στήλη	Μικροβιακό και πιθανώς θερμογενές	Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα, 3D πολυκάναλα σεισμικά, γεωχημική ανάλυση	Schroot et al (2005)
80	Νότια Βαλτική Θάλασσα	54.80N	13.60E	Κεντρική λεκάνη Arkona	Τεταρτογενείς ιλύες, ακουστικές ανωμαλίες	Θερμογενές?	αέρια χρωματογραφία και ισοτοπικές αναλύσεις, τομογράφος υποδομής πυθμένα	Geodekyan et al. (1991)
81	Νότια Βαλτική Θάλασσα	55.30N	15.00E	Δυτική λεκάνη Bornholm	Ολοκαινική ιλύς, ακουστική σιτιά όταν η ιλύς ξεπερνά τα 8 μέτρα πάχος, διαφυγές αερίων από δείγματα ιζήματος.	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 18-kHz	Kögler and Larsen (1979)
82	Λεκάνη Gdansk Βαλτική Θάλασσα	54.90N	19.20E	Νότια Λεκάνη Gdansk	Κ.Δ.Ρ. σε ιλύες στο κέντρο της λεκάνης	Πιθανά Μικροβιακό; Παρουσία θερμογενούς	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz, αέρια χρωματογραφία	Blazhchishin and Lange (1984), Geodekyan et al. (1991)
83	Νότια Βαλτική Θάλασσα	55.33N	19.75E	Βόρεια Λεκάνη Gdansk	Κ.Δ.Ρ. και ακουστικές ανωμαλίες σε Ολοκαινικές ιλύες	Μικροβιακό	αέρια χρωματογραφία τομογράφος υποδομής πυθμένα	Geodekyan et al. (1991)
84	Νότια Βαλτική Θάλασσα	56.00N	19.90E	Νότιο βύθισμα Gotland	Κ.Δ.Ρ. και ακουστικές ανωμαλίες σε Ολοκαινικές ιλύες	Μικροβιακό	αέρια χρωματογραφία τομογράφος υποδομής πυθμένα	Geodekyan et al. (1991)
85	Βαλτική Θάλασσα	55.20N	19.8E					

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
86	Αρχιπέλαγος Stockholm Σουηδία	59.30N	18.30E	Ανατολική ακτή Βαλτικής Θάλασσας	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή σε ιλύες και διαφυγές αερίων σχετιζόμενες με τεκτονικές γραμμές	Θερμογενές γραμμικά, Μικροβιακό στην μεγαλύτερη περιοχή	Σεισμική διάθλαση και ανάκλαση, τομογράφος υποδομής πυθμένα, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, ισοστοπικές αναλύσεις	Söderberg and Flodén (1992)
87	Ηπειρωτική Υφαλοκρηπίδα Ηνωμένου Βασιλείου	54.00N	2.00W	Βόρεια Θάλασσα, Ιρλανδική Θάλασσα, Κανάλι Αγγλίας και Ατλαντικός Ωκεανός	Διαφυγές αερίων στην υφαλοκρηπίδα	Μικροβιακό και θερμογενές	Ακουστικά προφίλ για εντοπισμό στόχων στην υδάτινη στήλη	Judd et al. (1997)
88	Firth of Forth, Ηνωμένο Βασίλειο	56.00N	3.00W	Μεγάλος ποταμόκολπος	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή	Μικροβιακό, άλλα η παρουσία θερμογενούς είναι συχνή στις ακτές του H.B.	τομογράφος υποδομής πυθμένα	Rawson (1976), Taylor (1992)
89	Firth of Clyde, Ηνωμένο Βασίλειο	55.75N	5.00W	Ποταμόκολπος και υφαλοκρηπίδα	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή	Μικροβιακό, άλλα η παρουσία θερμογενούς είναι συχνή στις ακτές του H.B.	τομογράφος υποδομής πυθμένα	Rawson (1976), Taylor (1992)
90	Νησί Man, Ηνωμένο Βασίλειο	54.50N	4.50W	Βορειοανατολική ή Ιρλανδική Θάλασσα	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή	Μικροβιακό, άλλα η παρουσία θερμογενούς είναι συχνή στις ακτές του H.B.	τομογράφος υποδομής πυθμένα	Rawson (1976), Taylor (1992)
91	Δυτική Ιρλανδική Θάλασσα	54.00N	5.50W	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα ανοιχτά της Ιρλανδικής Θάλασσας	Ιλυόχο κάλυμμα που αποτέθηκε σε διαβρωσιγενή παγετώδη επιφάνεια, δομές διαφυγής αερίων	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 5-kHz uniboom, sparker. Πυρήνες βαρύτητας, φυσικές ιδιότητες ιζημάτων, Vp και Vs μετρήσεις	Jones et al. (1986), Yuan et al. (1992)
92	Λιμάνι Holyhead, Anglesey, Ηνωμένο Βασίλειο	53.30N	4.75W	Λιμάνι	Ανοξικά επιφανειακά ιζήματα που περιέχουν αέρια	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5-και 7-kHz, αέρια χρωματογραφία, μελέτη μικροβίων	Jones et al. (1986)
93	Ποταμόκολπος Mersey, Ηνωμένο Βασίλειο	53.50N	3.00W	Ποταμόκολπος	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή	Μικροβιακό, άλλα η παρουσία θερμογενούς είναι συχνή στις ακτές του H.B.	τομογράφος υποδομής πυθμένα	Taylor (1992)
94	Εσωτερικοί ποταμόκολποι, Plymouth-Ακτή Falmouth, Ηνωμένο Βασίλειο	50.30N	4.50W	Μικροί ποταμόκολποι	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή	Μικροβιακό, άλλα η παρουσία θερμογενούς είναι συχνή στις ακτές του H.B.	τομογράφος υποδομής πυθμένα	Taylor (1992)
95	Ποταμόκολπος Thames, Ηνωμένο Βασίλειο	51.50N	1.00W	Ανοιχτός μεγάλος ποταμόκολπος	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή	Μικροβιακό, άλλα η παρουσία θερμογενούς είναι συχνή στις ακτές του H.B.	τομογράφος υποδομής πυθμένα	Taylor (1992)
96	Flemish Bight, Βόρεια Θάλασσα	52.50N	3.00E	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα μεταξύ Μεγάλης Βρετανίας και Ολλανδίας	Πηλούχες άργιλοι που περιέχουν αέρια	Μικροβιακό?	τομογράφος υποδομής πυθμένα	Cameron et al. (1984), Hovland and Judd (1988)
97	ΒΑ Ηνωμένο Βασίλειο	59.5N	7.5W	Λεκάνη	K.Δ.Ρ. MDAC	Νερό των πόρων	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Masson et al. (2003)

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
98	Ακτή Riat, Βορειοδυτική Ισπανία	42.50N	9.00W	Ποταμόκομποι τύπου Ria (Vigo, Pontevedra, Arousa, Muros)	Ολοκαινικές υλίες πλούσιες σε οργανικό υλικό, σεισμοικονιασμένη καταγραφή, πλούσιες αερίων, Κ.Δ.Ρ., βακτηριδιακά νώδη συσσωματώματα	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα Uniboom, 3.5- kHz, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, δειγματοληψία ιζημάτων	Acosta (1984), Garcia-Garcia et al. (1998), Garcia-Gil et al. (2000), Diez et al. (2007), Iglesias et al. (2007)
99	Κόλπος Cadiz, Ισπανία	36.67N	6.55W	Νότιοδυτική εσωτερική υφαλοκρηπίδα Ισπανίας	Ακουστικά διαφανείς Τεταρτογενείς υλίες	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz	Acosta (1984), Baraza and Ercilla (1996), Baraza et al. (1999)
100	Βορειοδυτική Μεσόγειος Θάλασσα, Ισπανία	42.17N	3.17E	Προδέλτα σε υφαλοκρηπίδα	Σεισμοικονιασμένη καταγραφή σε υλίες, 40-70 m βάθος νερού	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz	Diaz and Ercilla (1993)
101	Κόλπος Cadiz, Ισπανία	36N	7.5W	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα και κατωφέρεια	Κ.Δ.Ρ., λασπούχα ηφαιστεια, MDAC, που ελέγχονται από διαπυρισμό	Θερμογενές και μικροβιακό	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, Τομογράφος Υποδομής πυθμένα Sparkler, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, πυρήνες ιζήματος	Fernández-Puga (2007), León et al., 2006; 2009
102	Δυτική Μεσόγειος, Ισπανία	38.6N	0.8E	Κανάλι Eivissa με μεγάλες κατολισθήσεις	Κ.Δ.Ρ.,	?	Τομογράφος Υποδομής πυθμένα, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης,	Lastreas et al. (2006)
103	ΝΑ Ισπανία, Μεσόγειος Θάλασσα	40.4N	0.4E	Δέλτα ποταμού Ebro	Κ.Δ.Ρ., διαπυρικές δομές	Θερμογενές ή και μικροβιακό	Τομογράφος υποδομής πυθμένας, γεωτρήσεις	Maestro et al. (2002)
104	Κεντρική Αδριατική Θάλασσα	42.30N	14.50E	Ανοιχτά της Ortona, Κεντρική Ιταλία	Nearshore, 20-80 m water depths; Άμμοι που υπέρκεινται υλών, διάπυρα που συνοδεύονται από διαφυγές αερίων, Σεισμοικονιασμένη καταγραφή	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz	Hovland and Curzi (1989)
105	Κεντρική Αδριατική Θάλασσα	42.80N	14.75E	Λεκάνη Αδριατική	Κ.Δ.Ρ. σε υλίες, βάθος νερού 150-250 m	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz Uniboom, sparkler	Curzi and Veggiani (1985)
106	Βόρεια Αδριατική Θάλασσα, Αιτές Ιταλίας	43.40N	13.67E	Υφαλοκρηπίδα ανοιχτά του ποταμού Musone	Σεισμοικονιασμένη καταγραφή, οργανικές υλίες σε 10m βάθος νερού	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα Uniboom	Curzi (1992)
107	Βόρεια Αδριατική Θάλασσα	45.00N	13.00E	Δέλτα ποταμού Po, Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα, κεντρική λεκάνη	Σεισμοικονιασμένη καταγραφή, ακουστικά διαφανείς περιοχές, Κ.Δ.Ρ., λασπούχα διάπυρα	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz και Uniboom	Stephanon (1980), Curzi (1990)
108	ΒΔ Αδριατική Θάλασσα, Ιταλία	44.8N	12.6E	Δέλτα ποταμού Po	Σεισμοικονιασμένη καταγραφή και ακουστική σιαή, Μεθάνιο σε πυρήνες ιζήματος	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα, 2D πολυκάναλα σεισμικά, πυρήνες ιζήματος	Orange et al., 2005
109	Κεντρική Αδριατική Θάλασσα	43N	15E	Λεκάνη	Κ.Δ.Ρ., έντονοι ανααστροφές φάσης, σηηλοειδείς διαταράξεις που σχετίζονται με αλατούχο διαπυρισμό	Πιθανώς θερμογενείς	Πολυδεσμικό Βυθόμετρο, Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα, πολυκάναλα σεισμικά	Geletti et al. (2008)
110	Υφαλοκρηπίδα Κέρκυρας, Ελλάδα	39.75N	19.50E	Υφαλοκρηπίδα	Διαφυγές ρευστών, σεισμοικονιασμένη καταγραφή, σχετίζεται με διάπυρα	Πιθανά θερμογενές,, συνοδεύεται από αλατούχους δόμους	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Papathodorou et al. (1993)
111	Αμβρακικός κόλπος, Ελλάδα	39.00N	20.75E	Κλειστός κόλπος	Σεισμοικονιασμένη καταγραφή, θύλακες αερίων και διαφυγές στην υδάτινη στήλη	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz	Papathodorou et al. (1993)

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
112	Πατραϊκός Κόλπος, Ελλάδα	38.15N	21.35E	Κλειστός κόλπος και παράκτια περιοχή	Κ.Δ.Ρ. στην παράκτια περιοχή, διαφυγές αερίων, σεισμοκονιασμένη καταγραφή και έντονοι ανακλαστήρες	Βιογένες	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz, airgun, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Chronis et al. (1991) Papatheodorou et al. (1993), Hasiotis et al. (1996)
113	Βορειοδυτικό Αιγαίο Πέλαγος, Ελλάδα	40.00N	23.50E	Υφαλοκρηπίδα και λεκάνη Σποράδων	Πλειο-Τεταρτογενείς λεκάνες, σεισμοκονιασμένη καταγραφή, λασπούχα ηφαίστεια, διαφυγές στην υδάτινη στήλη	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz, airgun, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Lykousis and Chronis (1989), Papatheodorou et al. (1993)
114	Βόρειο Αιγαίο Πέλαγος, Ελλάδα	24.40N	40.80E	Όρμος Πρίνου, προστατευμένη υφαλοκρηπίδα	Κ.Δ.Ρ.	?	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, βυθόμετρο, καταδύσεις	Newton et al. (1980)
115	Δυτική Ελλάδα	37.85N	21.10E	Κατωφέρεια Κυλλήνης	Κ.Δ.Ρ., έντονοι ανακλαστήρες	?	Τομογράφοι Υποδομής Πυθμένα	Hasiotis et al. (2002; 2005)
116	Δυτική Ελλάδα	38.45N	21.3E	Λιμνοθάλασσα Αιτωλικού	Κ.Δ.Ρ.	Πιθανώς μικροβιακό	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Παπαθεοδώρου κα (2001)
117	Δυτική Ελλάδα	38.25N	22.2E	Κορινθιακός Κόλπος Αιγίο	Κ.Δ.Ρ.	?	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Soter (1999)
118	Δυτική Ελλάδα	38.20N	22.21E	Κορινθιακός Κόλπος Όρμος Ελαιώνα	Κ.Δ.Ρ.	?	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, τομογράφος Υποδομής Πυθμένα	Soter (1999)
119	Δυτική Μαύρη Θάλασσα, Βουλγαρία	42.80N	28.75E	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα, βάθος νερού 160-340 m	Κ.Δ.Ρ. Σεισμοκονιασμένη καταγραφή, ακουστικές ανωμαλίες, διαφυγές στην υδάτινη στήλη	Μικροβιακό και Θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα Sparker και βυθόμετρο, επί τόπου μετρήσεις αερίων, αέρια χρωματογραφία	Trotskyuk and Avilov (1988), Dimitrov and Dontcheva (1994)
120	Νότια Υφαλοκρηπίδα Κοιμιάς, Μαύρη Θάλασσα, Ρωσία	46.67N	35.00E	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα	Πετρελαϊκό πεδίο	Μικροβιακό και Θερμογενές	επί τόπου μετρήσεις αερίων, αέρια χρωματογραφία	Trotskyuk and Avilov (1988)
121	Νότιοανατολική Μαύρη Θάλασσα	41.00N	39.75E	Υφαλοκρηπίδα Τραπεζούντας, Βόρεια ακτή Ανατολίας	Ολοκαινικές υλές με σεισμοκονιασμένη καταγραφή και λαμπερές κηλίδες	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα	Okyar and Ediger (1999)
122	Μαύρη Θάλασσα, Γεωργία	41.50N	41.20E	Ηπειρωτική κατωφέρεια	Διαφυγές αερίων από τα πρηνή χαραδρώσεων, υδρίτες	Μικροβιακό και Θερμογενές	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, τομογράφος υποδομής πυθμένα, φυσικές ιδιότητες ιζημάτων, αέρια χρωματογραφία	Klaucke et al., 2006
123	Μαύρη Θάλασσα, Βουλγαρία	42.30N	28.00E	Υφαλοκρηπίδα	Διαφυγές αερίων στην υδάτινη στήλη	Μικροβιακό	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, φωτογράφιση, ανάλυση αερίων	Dimitrov, 2002
124	Ανατολική Μαύρη Θάλασσα	41.8N	41.2E	Λεκάνη που επηρεάζεται από διάπυρα	Διαφυγές αερίων σε ηχογραφίες, ακουστική σιγή σεισμικές τομές, υδρίτες και υδρογονάνθρακες στα ιζήματα	Θερμογενές	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, τομογράφος υποδομής πυθμένα, πυρήνες ιζήματος, γεωχημική ανάλυση	Klaucke et al., 2006
125	ΒΔ Μαύρη Θάλασσα	44.50N	32E	Εξωτερική υφαλοκρηπίδα και κατωφέρεια παλαιοδέλτα ποταμού Dnepr	Κ.Δ.Ρ., σεισμοκονιασμένη καταγραφή, διαφυγές στην υδάτινη στήλη, κηλίδες έντονης ανακλαστικότητας, βακτηριδιακά ινώδη συσσωματώματα, MDAC	Πιθανώς Θερμογενείς	Πολυδεσμικό Βυθόμετρο, Τομογράφος Υποδομής πυθμένα, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, ROV	Naudts et al. (2008)
126	ΝΑ Μαύρη Θάλασσα, Τουρκία	41.30N	37E	Υφαλοκρηπίδα, Δέλτα ποταμού Yesilirmak	Κ.Δ.Ρ. έντονοι ανακλαστήρες, ακουστική σιγή	?	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, Τομογράφος υποδομής πυθμένα, Ηχοβολιστής Πλευρικής Σάρωσης	Ergün et al. (2002) Cjfi et al (2003)
127	Θάλασσα του Μαζμαρά, Τουρκία	40.40N	28.40E	Τεκτονική Λεκάνη	Διαφυγές αερίων στην υδάτινη στήλη κατά μήκος του ρήγματος	Μικροβιακό	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, τομογράφος υποδομής πυθμένα, φωτογράφιση	Géli et al., 2008

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
128	Κόπος Iskenderun, ΝΑ Τουρκία	36.6N	35.8E	Τεκτονική Λεκάνη	Κ.Δ.Ρ. σε Ολοκαινικά ιζήματα	Πιθανώς Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα, 2D πολυκάναλα σεισμικά, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Garcia-Garcia et al., 2004; Orange et al., 2005
129	Ανατολική Μεσόγειος θάλασσα	35.5N	29E	Υποθαλάσσια Όρη Αναξιμανδρος	Λασπούχα ηφαιστεια, ΚΔΡ, υδρίτες		Πολυδεσμικό βυθόμετρο, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, τομογράφοι υποδομής πυθμένα πυρήνες ιζήματος	Dimitrov and Woodside (2003), Lykousis et al. (2009)
130	Ανατολική Μεσόγειος θάλασσα	32.5N	33.8E	Υποθαλάσσια Όρη Ερατοσθένης	Κ.Δ.Ρ., διάπυρα,		Πολυδεσμικό βυθόμετρο, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, τομογράφοι υποδομής πυθμένα,	Dimitrov and Woodside (2003),
131	Ανατολική Μεσόγειος θάλασσα	36N	20.5E	Περιοχή Cobblestone	Κ.Δ.Ρ., λασπούχα ηφαιστεια		Πολυδεσμικό βυθόμετρο, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης τομογράφοι υποδομής πυθμένα	Dimitrov and Woodside (2003),
132	Ανατολική Μεσόγειος θάλασσα	33.7N	24.5E	Λασπούχα ηφαιστεια Olimpi	Κ.Δ.Ρ., λασπούχα ηφαιστεια		Πολυδεσμικό βυθόμετρο, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης τομογράφοι υποδομής πυθμένα	Dimitrov and Woodside (2003),
133	Ανατολική Μεσόγειος θάλασσα	33.3N	25.3E	Υψωμα Ηνωμένων Εθνών	Κ.Δ.Ρ., λασπούχα ηφαιστεια		Πολυδεσμικό βυθόμετρο, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης τομογράφοι υποδομής πυθμένα	Dimitrov and Woodside (2003),
134	Ανατολική Μεσόγειος θάλασσα	33N	30E	Βαθύ υποθαλάσσιο ριπίδιο ποταμού Νείλου	Κ.Δ.Ρ., λασπούχα ηφαιστεια, διαφυγές υδρογονανθράκων στην υδάτινη στήλη	Κυρίως θερμογενές με πιθανή παρουσία μικροβιακού	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης τομογράφοι υποδομής πυθμένα	Loncke and Mascle (2004)
135	Κεντρική Μεσόγειος θάλασσα	36.45N	14.45E	Κανάλι Σικελίας	Λασπούχα ηφαιστεια, έντονοι αναλαστικές, διαφυγές στην υδάτινη στήλη, MDAC	?	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης τομογράφοι υποδομής πυθμένα, γεωχημικές αναλύσεις	Savini et al. (2009)
136	Θάλασσα Barents, Νορβηγία	71.3N	22E	Υφαλοκρηπίδα	Κ.Δ.Ρ., έντονοι αναλαστικές στα σεισμικά προφίλ	Θερμογενές	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, 3D σεισμικά	Chand et al. (2009)
137	Βορειοδυτική Αραβική Θάλασσα, Σαουδική Αραβία	28.00N	49.00E	Ρηχή παράκτια περιοχή, βάθος νερού <50 m	Σεισμικονισμένη καταγραφή, Κ.Δ.Ρ. σε πληούχα ιζήματα	Μικροβιακό ή Θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα Uniboom και Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Ellis and McGuinness (1986)
138	Περσικός Κόπος	27.00N	51.00E	Κεντρικό τμήμα του Περσικού κόπου και του στενού Hormuz	Στα βαθύτερα τμήματα του κόπου, Κ.Δ.Ρ.	Κυρίως θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz, πυρήνες ιζήματος	Uchupi et al. (1996)
139	Δυτική Ακτή Ινδίας	19.00N	72.00E	Ηπειρωτικό Περιθώριο Ινδίας	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα, >50-m βάθος νερού	Μικροβιακό και πιθανώς θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz και 5- kHz, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Siddiquie et al. (1980, 1981, 1985), Karisiddaiah et al. (1993), Karisiddaiah and Veeraya (1994)
140	Ανατολικό – κεντρικό ηπειρωτικό περιθώριο Ινδίας	16.00N	81.50E	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα και καταφύγεια ανοιχτά του ποταμού Mahanadi	Σεισμικονισμένη καταγραφή στην υφαλοκρηπίδα, και στην καταφύγεια	Μικροβιακό και πιθανά θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα sparker	Murthy and Rao (1990)
141	Ανατολικό – κεντρικό ηπειρωτικό περιθώριο Ινδίας	20.00N	86.50E	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα και καταφύγεια ανοιχτά των ποταμών Krishna και Godavari	Στηλοειδής διαταράξεις στην υφαλοκρηπίδα (100-150m), σεισμικονισμένη καταγραφή στην καταφύγεια που συνδέεται με ρήγματα	Μικροβιακό και πιθανά θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα sparker	Murthy and Rao (1990)

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
142	Δυτική Ινδία	13.5N	72.5E	Ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα Ινδίας	Κ.Δ.Ρ., έντονοι ανακλαστήρες	?	Βαθεία σεισμικά	Shankar et al. (2006)
143	Δέλτα Mekong Βιετνάμ	10.50N	107.00E	Κανάλι ναυσιπλοίας προς το Saigon	Λεπτόκοικα ιζήματα με μικρή διείσδυση λόγω παρουσίας αερίων	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 12-kHz	Stiles et al. (1969)
144	Hong Kong, Κίνα	22.25N	114.00E	Ρηχά εσωτερικά νερά κοντά στο Χονκ Κονγκ	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή, Ολοκαινικά ιζήματα	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα επί τόπου μετρήσεις αερίων, αέρια χρωματογραφία	Premchitt et al. (1992)
145	Ανατολική Κινέζικη Θάλασσα	31.00N	123.00E	Ηπειρωτική Υφαλοκρηπίδα ανοιχτά του ποταμού Changjiang	Κ.Δ.Ρ. στην εσωτερική υφαλοκρηπίδα, υπερβολικές ανακλάσεις βαθύτερα	Μικροβιακό και θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα uniboom, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Butenko et al. (1985)
146	Ανοιχτά Ποταμού Changjiang (Yangtze), Ανατολική Κινέζικη Θάλασσα	31.50N	123.00E	Δέλτα, Ρηχή υφαλοκρηπίδα	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή, Κ.Δ.Ρ. στην εσωτερική υφαλοκρηπίδα, υπερβολικές ανακλάσεις βαθύτερα	Μικροβιακό και θερμογενές	τομογράφος υποδομής πυθμένα uniboom και 3.5-kHz, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Butenko et al. (1985), Milliman et al. (1985), Ye (1986)
147	Ακτή Jiangsu, Κίτρινη Θάλασσα, Κίνα	34.00N	121.50E	Ρηχή υφαλοκρηπίδα	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή, υψηλός ρυθμός ιζηματογένεσης	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Milliman et al. (1985)
148	Νότια χερσόνησος Shandong, Κίτρινη Θάλασσα, Κίνα	36.75N	123.00E	Ρηχή υφαλοκρηπίδα	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή, υψηλός ρυθμός ιζηματογένεσης	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Milliman et al. (1985)
149	Ανατολική Θάλασσα Κορέα	36.7N	131E	Λεκάνη	Κ.Δ.Ρ. στειλοειδείς διαταράξεις, έντονοι ανακλαστήρες, υδρίτες	Πιθανώς θερμογενείς	Βαθεία σεισμικά, γεωτρήσεις	Horozal et al. (2009)
150	Νότια ακτή Κορέας	34.68N	127.68E	Όρμος Gamagyang	Ολοκαινικές ιλύες, σεισμοκονιασμένη καταγραφή	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα Uniboom	Kang and Chough (1982)
151	Νότια χερσόνησος Κορέας	35.75N	129.60E	Νοτιοανατολική υφαλοκρηπίδα από τον όρμο Jinhae έως το Pohang	Ολοκαινικές ιλύες, σεισμοκονιασμένη καταγραφή, διαφυγές στην υδάτινη στήλη	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα sparker και 3.5 kHz	Park et al. (1990), Choi et al. (1993), Park et al. (1995), Choi et al. (1997) Kim et al (2004)
152	NA Κίτρινη Θάλασσα Κορέα	33.5N	125.2E	Υφαλοκρηπίδα	Κ.Δ.Ρ., έντονοι ανακλαστήρες, διαφυγές στην υδάτινη στήλη, αέρια σε πυρήνες ιζήματος	Κυρίως θερμογενές με παρουσία μικροβιακού	Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα, γεωχημική ανάλυση	Jeong et al. (2004)
153	Ανατολική Θάλασσα του Okhotsk	49.50N	155.40E	Ανώτερη κατωφέρεια ανοιχτά των νήσων Kuril	Διαφυγές αερίου στην υδάτινη στήλη σε 770m βάθος νερού	Μικροβιακό Υδροθερμικό	Βυθόμετρο, παρατηρήσεις υποβρυχίου, χημικές αναλύσεις	Zonenshayn et al. (1987)
154	Ανατολική υφαλοκρηπίδα Kamchatka	56.00N	162.50E	Ανώτερη υποθαλάσσια χαράδρωση Kamchatsky	Διαφυγές αερίου στην υδάτινη στήλη, 40-250 m βάθος νερού	Μικροβιακό Υδροθερμικό	τομογράφος υποδομής πυθμένα sparker 12-kHz, sparker, ισοτοπικές αναλύσεις	Seliverstov et al. (1994)
155	Λεκάνη Sumba Basin, Ινδονησία	9.50S	122.00E	Εσωτερική λεκάνη Δυτικά του Τιμός, βάθος νερού ~2,500 m	Ζώνες σεισμοκονιασμένης καταγραφής σχετιζόμενες με ρήγματα και λασπούχα διάπυρα	Μικροβιακό ?	τομογράφος υποδομής πυθμένα sparker	Hovland and Judd (1988)
156	Λιμάνι Suva, Φίτζι	18.14N	178.40E	Εσωτερικό και εξωτερικό λιμάνι	20-100 m βάθος νερού, αέριο κυρίως CO ₂	Μικροβιακό	Σεισμική ανάκλαση, δειγματοληψία και αναλύσεις αερίων	Hochstein (1970)
157	Λιμάνι Waitemata, Auckland, Νέα Ζηλανδία	36.90S	174.90E	Λιμάνι Waitemata, εσωτερική τεκτονική εγκόλπωση	Σεισμοκονιασμένη καταγραφή 2 m κάτω από την επιφάνεια, 1-4 m βάθος νερού	Πιθανά Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα 3.5 kHz, πυρήνες ιζήματος	Hicks and Kibblewhite (1976)
158	Όρμος Plenty, Νέα Ζηλανδία	37.75N	177.00E	Ηπειρωτική Υφαλοκρηπίδα	Λέγριο σχετιζόμενο με γεωθερμικό πεδίο, φουαλίδες CO ₂ στην υδάτινη στήλη	Θερμογενές	Βυθόμετρο, ανάλυση νερού	Duncan and Pantin (1969), Glasby (1971)

ΑΑ	Περιοχή	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Περιγραφή περιοχής	Περιβάλλον και παρουσία αερίων	Προέλευση	Μεθοδολογία καταγραφής	Βιβλιογραφική Αναφορά
159	Βόρεια Υφαλοκρηπίδα Νέα Ζηλανδία	38.70S	178.10E	Όρμος Poverty, Υφαλοκρηπίδα	Κ.Δ.Ρ. σε πληλύνες άμμου, συνδιάζονται με υλούχα διάπυρα	Θερμογενείς	Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Nelson and Healy (1984)
160	Κόλπος Wellington, Νέα Ζηλανδία	42.30S	174.80E	Όρμος Evans, εσωτερική τεκτονική εγκόλπωση	Οργανικές άμμοι και ύλες καλυπόμενες από τύρφη, 10-20 m βάθος νερού	Μικροβιακό	τομογράφος υποδομής πυθμένα Uniboom	Lewis and Mildenhall (1985)
161	Θάλασσα Arafura, Βόρεια Αυστραλία	10S	134E	Υφαλοκρηπίδα	Κ.Δ.Ρ. έντονοι ανακλαστήρες, ακουστική σιιά, μεθάνιο στα ιζήματα	Μικροβιακό και πιθανώς θερμογενείς	Πολυδεσμικό Βυθόμετρο, Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, πυρήνες ιζήματος, γεωχημική ανάλυση	Rollet et al. (2009)
162	Θάλασσα Yampi, Βόρειοδυτική Αυστραλία	13.45S	124.5E	Υφαλοκρηπίδα	Κ.Δ.Ρ., κηλίδες υψηλής ανακλαστικότητας, αναθολώσεις πυθμένα διαφυγές ρευστών στην υδάτινη στήλη	? Πιθανώς θερμογενείς	Πολυδεσμικό Βυθόμετρο, Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης	Rollet et al.(2006)
163	ΒΔ Αφρική	29N	13W	Κανάλι των Κανάριων Νήσων	Κ.Δ.Ρ. Διάπυρα	Θερμογενείς	Πολυδεσμικό Βυθόμετρο, Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα, ROV	Acosta et al. (2003)
164	Ν. Ατλαντικός Δυτική Αφρική	4.8S	9.8E	Υποθαλάσσιο ριπιδίο ποταμού Congo	Κ.Δ.Ρ., εντοني ανακλαστήρες, ακουστική σιιά, υδρίτες σε πυρήνες ιζήματος	Μικροβιακό	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, τομογράφος υποδομής πυθμένα, Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης, R.O.V., πυρήνες ιζήματος	Sahling et al., 2007
165	Δυτική Αφρική, Νιγηρία	3N	6.5E	Δέλτα ποταμού Νιγηρα	Κ.Δ.Ρ., λασπούχα ηφαίστεια, MDAC	Θερμογενείς	Ορυκτολογικές και γεωχημικές αναλύσεις ιζημάτων	Bayon et al (2007)
166	Δυτική Αφρική, Νιγηρία	3.5N	7E	Δέλτα ποταμού Νιγηρα	Κ.Δ.Ρ., ακουστική σιιά αέριο και υδρίτες σε πυρήνες ιζημάτων,	? Θερμογενείς	3D σεισμικά, πυθόμετρο, πολυδεσμικά γεωτεχνικές αναλύσεις	Sultan et al. (2007)
167	Δυτική Αφρική ΝΑ Ατλαντικός	5.8S	9.7E	Λεκάνη Congo 3000-4000 m βάθος	Κ.Δ.Ρ., αέρια και υδρίτες στους πυρήνες ιζημάτων, υψηλές συγκεντρώσεις μεθανίου στην υδάτινη στήλη	Μικροβιακό	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, πολυδεσμικά σεισμικά, ρηχά σεισμικά, γεωχημικές αναλύσεις ιζημάτων και νερού	Gay et al (2006a), Charlou et al. (2004)
168	Δυτική Αφρική ΝΑ Ατλαντικός	5.3S	11E	Ηπειρωτική κατωφέρεια	Κ.Δ.Ρ., έντονοι ανακλαστήρες, στηλοειδείς διατράξεις, ακουστική σιιά, υδρίτες	Θερμογενείς και μικροβιακό	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, πολυδεσμικά σεισμικά, γεωχημικές αναλύσεις	Gay et al (2006b;c)
169	Δυτική Αφρική ΝΑ Ατλαντικός	1.7N	9E	Ηπειρωτικό περιθώριο, κατωφέρεια Ισημερινής Γουινέας	Αλυσίδες Κ.Δ.Ρ. σε υποθαλάσσιες χαράδρες	Πιθανώς Θερμογενείς	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, 3D σεισμικά	Pilcher and Argent (2007)
170	Δυτική Αφρική ΝΑ Ατλαντικός	0	8E	Ηπειρωτικό περιθώριο, υφαλοκρηπίδα και κατωφέρεια Γκαμπόν	Κ.Δ.Ρ. απομονωμένοι ή σε αλυσίδες σε χαράδρες	Πιθανώς Θερμογενείς	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, 3D σεισμικά	Pilcher and Argent (2007)
171	Δυτική Αφρική ΝΑ Ατλαντικός	0.45S	8.65E	Ηπειρωτικό περιθώριο, κατωφέρεια Γκαμπόν	Κ.Δ.Ρ. απομονωμένοι ή σε αλυσίδες σε χαράδρες	Πιθανώς Θερμογενείς	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, 3D σεισμικά	Pilcher and Argent (2007)
ID	Δυτική Αφρική ΝΑ Ατλαντικός	5S	10E	Ηπειρωτικό περιθώριο, ριπιδίο ποταμού Congo, 3000 μέτρα βάθος	Κ.Δ.Ρ., υδρίτες, έντονες ανακλάσεις, σεισμικονισμένη καταγραφή, MDAC, χημικοσυνθετικές βιοκωνιώσεις	Θερμογενείς και Μικροβιακό	Πολυδεσμικό βυθόμετρο, 3D σεισμικά, γεωχημικές αναλύσεις, ROV	Gay et al. (2007) Sahling et al. (2008)