

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΙΖΗΜΑΤΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΡΑΤΗΡΩΝ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΑΕΡΙΩΝ (POCKMARKS), ΩΣ ΜΕΣΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΕΝΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΟΥΣ, ΣΤΟ Β.Α-ΙΚΟ ΠΑΤΡΑΪΚΟ ΚΟΛΠΟ.¹

ΜΗΤΣΗΣ¹ Χ., ΠΑΠΑΘΕΟΔΩΡΟΥ Γ., ΡΑΒΑΣΟΠΟΥΛΟΣ Ι., ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ Δ., ΦΕΡΕΝΤΙΝΟΣ Γ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μέθοδοι πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης εφαρμόστηκαν σε ψηφιακά βυθομετρικά δεδομένα ενός πεδίου κρατήρων διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων στον Πατραϊκό κόλπο. Η στατιστική επεξεργασία των μορφομετρικών παραμέτρων των κρατήρων οδήγησε στον καθορισμό δύο τύπων κρατήρα, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν διαφορετικά στάδια εξέλιξης τους, ενώ η μορφολογία των κρατήρων φαίνεται να ελέγχεται περισσότερο από την παρουσία ενεργού ρήγματος παρά από τις επικρατούσες υδροδυναμικές συνθήκες της περιοχής. Η στατιστική επεξεργασία ιζηματολογικών δεδομένων που συλλέχθηκαν εντός των κρατήρων, υπέδειξε τους περισσότερο ενεργούς κρατήρες του πεδίου.

ABSTRACT

A detailed marine geophysical survey was carried out in the southeastern part of the Gulf of Patras, where a pockmark field had been discovered. A large number (33×10^3) of soundings was used to construct a detailed bathymetric map and a number of single and composite pockmarks were recognized. Based on the above bathymetric data, each single pockmark (circular or elongated in plan view) morphologically reconstructed using Trend Surface analysis. Five morphometric parameters (total area, average slope, relative depth, eccentricity, and direction of long axis) have been identified for each single pockmark. The application of the Discriminant and Q-mode Factor analyses on the above-mentioned data set (5 parameters X 25 pockmarks) revealed that the field of pockmarks in the Gulf of Patras is characterized by two main morphological types of pockmarks. These two types and their areal distribution seems to be related with the processes of growth of this pockmark field. Q-mode factor analysis of sedimentological data, which was collected inside the pockmarks, shows that the silt-sand-gravel increase is a record of local pockmark activity.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Κρατήρες διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων, Πατραϊκός κόλπος, πολυμεταβλητή στατιστική ανάλυση.

KEY WORDS: Pockmarks, Gulf of Patras, multivariate statistical analysis.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρουσία κυκλικών και ελλειπτικών κοιλωμάτων στην επιφάνεια του πυθμένα δεν είναι ένα σπάνιο φαινόμενο, καθώς έχει εντοπιστεί σε πολλές θαλάσσιες περιοχές ανά τον κόσμο αλλά ακόμη και σε λιμναία όσο και σε λιμνοθαλάσσια περιβάλλοντα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτά τα κοιλώματα είναι διαβρωσιγενούς προέλευσης, σχετίζονται με τη διαφυγή αερίων υδρογονανθράκων από υποκείμενα στρώματα ιζημάτων και καλούνται "κρατήρες διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων" (pockmarks) (Hovland and Judd, 1988). Στον Ελληνικό θαλάσσιο χώρο, κρατήρες έχουν εντοπιστεί στον Πατραϊκό κόλπο (Paratheodorou et al 1993, Hasiotis et al 1996), στο Ιόνιο πέλαγος (ανοικτά της Κυλλήνης) (Hasiotis et al 2002), στον Κορινθιακό κόλπο (Hovland 1998, Soters 1999), στο Βόρειο Αιγαίο (Θάσος) (Newton et al 1980) και στην λιμνοθάλασσα του Αιτωλικού (Παπαθεοδώρου κ.α. 2001).

Ο καθορισμός του σταδίου εξέλιξης ενός κρατήρα ή ενός πεδίου κρατήρων, η μελέτη της δραστηριότητας ενός κρατήρα και η επίδραση των υδροδυναμικών και γεωλογικών παραμέτρων στη διαμόρφωση του σχήματος του κρατήρα είναι θέματα που απασχολούν την επιστημονική κοινότητα. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής γίνεται

1: A MULTIVARIATE STATISTICAL APPROACH TO THE INVESTIGATION OF POCKMARKS GROWTH AND ACTIVITY. AN EXAMPLE FROM A POCKMARK FIELD IN THE GULF OF PATRAS (W. GREECE).

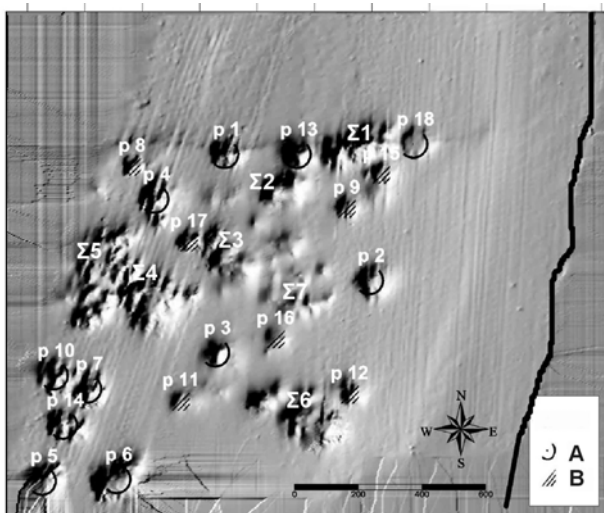
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΦΥΣΙΚΗΣ ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΑΣ, 26500 Πάτρα, email: ethagefo@upatras.gr

προσπάθεια να προσεγγιστούν τα παραπάνω θέματα με μέσο τη στατιστική επεξεργασία μορφομετρικών παραμέτρων των κρατήρων ενός πεδίου του Πατραϊκού κόλπου. Παρόμοιες μεθοδολογικές προσεγγίσεις δεν συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία, με εξαίρεση τη στατιστική μελέτη κρατήρων στη Βόρεια Θάλασσα από τους Honland και Judd (1988), εξαιτίας κυρίως της έλλειψης μεγάλου όγκου ψηφιακών βυθομετρικών δεδομένων.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η περιοχή έρευνας περιορίζεται στο Β.Α-ικό άκρο του πεδίου κρατήρων που εντοπίστηκε στον ανατολικό Πατραϊκό κόλπο, ανοικτά της πόλης της Πάτρας (Hasiotis et al 1996). Το πεδίο κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου είναι ενεργό καθώς διαφυγές αερίων διαπιστώθηκαν πριν και μετά το σεισμό 5.4R της 14ης Ιουλίου 1993 (Hasiotis et al 1996). Οι κρατήρες σχηματίστηκαν στις ολοκαινικές αμμοίλυσες του πυθμένα και παρουσιάζουν μεγέθη που κυμαίνονται από 25 έως 250m σε διάμετρο και από 0.5 έως 15m σε βάθος (Hasiotis et al 1996).

Το Β.Α-ικό άκρο του πεδίου, που ερευνήθηκε λεπτομερώς στα πλαίσια της εργασίας αυτής, εντοπίζεται μεταξύ των βαθών των 20 κ



Εικ. 1. Λεπτομερής βυθομετρικός χάρτης στον οποίο έχουν αποτυπωθεί απλοί (P) και σύνθετοι (Σ) κρατήρες διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων στον Πατραϊκό κόλπο. Επιπλέον εμφανίζεται η διάκριση των απλών κρατήρων στους δύο μορφολογικούς τύπους (ομάδα Α και Β)
Fig. 1. bathymetric map of single and composite rockmarks in Gulf of Patras. A and B indicate the morphological types of rockmark (Group A and B).

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΟΡΓΑΝΑ

Α) Εργασίες πεδίου

Η λεπτομερής βυθομετρία του πεδίου κρατήρων εκτελέστηκε με ηχοβολιστικό βυθόμετρο ODOM ECHOTRAC (200kHz/2.75°) με βάση ένα πυκνό δίκτυο γραμμών πλεύσης, οι οποίες απείχαν μεταξύ τους 20m. Για τη συλλογή των πυρήνων ιζήματος χρησιμοποιήθηκε πυρηνολήπτης βαρύτητας Benthos μήκους 3m. Για τον προσδιορισμό της θέσης των ερευνητικών σκαφών χρησιμοποιήθηκε Διαφορικό Δορυφορικό Σύστημα (DGPS) TRIMBLE 4000 II RL-DL με ακρίβεια RMS 1m.

Β) Εργαστηριακές αναλύσεις

Από κάθε πυρήνα ιζήματος συλλέχθηκαν υποδείγματα ιζήματος ανά 10cm μήκους του πυρήνα. Συνολικά 54 υποδείγματα ιζήματος αναλύθηκαν κοκκομετρικά σύμφωνα με τη μέθοδο του Folk (1974). Για κάθε υποδείγμα υπολογίστηκε το % ποσοστό των κύριων κοκκομετρικών τάξεων (κροκάλες-άμμος-πηλός-άργιλος).

Γ) Στατιστική επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των βυθομετρικών δεδομένων (32963 βυθομετρικά σημεία) με σκοπό την κατασκευή του ψηφιακού βυθομετρικού χάρτη στο σύστημα UTM(WGS84) και του ψηφιακού χάρτη κλίσεων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MICRODEM.

Τρεις μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης πολυμεταβλητών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν για τη στατιστική επεξεργασία των ιζηματολογικών και βυθομετρικών δεδομένων: (i) Η Παραγοντική Ανάλυση (Factor analysis), (ii) η Ανάλυση Επιφανειών Τάσης (Trend surface analysis) και (iii) η Ανάλυση Διακριτότητας (Discriminant analysis).

Η Q-τύπου παραγοντική ανάλυση εφαρμόστηκε στα ιζηματολογικά δεδομένα τα οποία συγκρότησαν ένα πίνακα δεδομένων διαστάσεων 3x54. Στόχος της ανάλυσης είναι η διάκριση των δειγμάτων σε κύριες υποομάδες σύμφωνα με την κοκκομετρική τους σύσταση. Το τυπικό παραγοντικό μοντέλο εφαρμόστηκε σύμφωνα με τα στάδια που προτείνονται από τον Davis (1986).

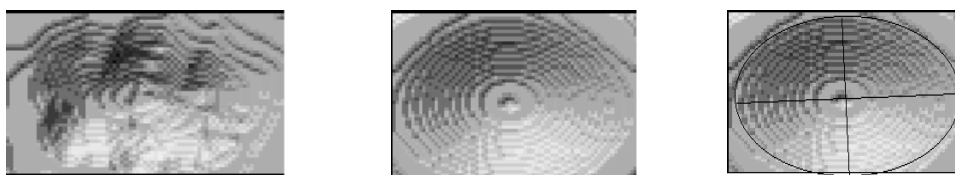
Για τη στατιστική επεξεργασία των βυθομετρικών δεδομένων ακολουθήθηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις, καθώς οι πολυμεταβλητές στατιστικές μέθοδοι εφαρμόστηκαν σε δύο ομάδες δεδομένων: (i) στα ψηφιακά βυθομετρικά δεδομένα όλου του πεδίου των κρατήρων και (ii) στα ψηφιακά βυθομετρικά δεδομένα κάθε κρατήρα ξεχωριστά.

Γ1. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΡΑΤΗΡΩΝ ΩΣ ΣΥΝΟΛΟΥ

Η ανάλυση Επιφανειών Τάσης εφαρμόστηκε στα βυθομετρικά δεδομένα του πεδίου κρατήρων χωρίς να αποδώσει αποτελέσματα σε αντίθεση με την εφαρμογή της στα δεδομένα κλίσεων του πεδίου όπου απέδωσε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Μία επιφάνεια τάσης 4ου βαθμού επιλέχθηκε για να περιγράψει τα δεδομένα κλίσεων του πεδίου κρατήρων.

Γ2. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΡΑΤΗΡΩΝ ΩΣ ΔΙΑΚΡΙΤΑ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η μέτρηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών των κρατήρων δεν είναι δυνατόν να γίνει απευθείας στον βυθομετρικό χάρτη καθώς η επιλογή των θέσεων μέτρησης των μορφολογικών χαρακτηριστικών δεν μπορεί να καθοριστεί με ασφαλή κριτήρια. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η μέθοδος της προσομοίωσης των κρατήρων με ασφαλή γεωμετρικά σχήματα και στη συνέχεια η ακριβής μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους (Εικ. 2). Ως μέθοδος προσομοίωσης των κρατήρων επιλέχθηκε η Ανάλυση Επιφανειών Τάσης (Εικ. 2) και είχε ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό ενός πολυωνύμου ανωτέρου βαθμού που αποδίδεται σχηματικά με τη μορφή μίας αντεστραμμένης κωνικής επιφάνειας με ελλειπτική βάση. Σε κάθε κωνική επιφάνεια κάθε κρατήρα μετρήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της: (α) η μέση κλίση των πρανών της, (β) η ελλειπτικότητα της βάσης, (γ) η επιφάνεια της βάσης, (δ) η διεύθυνση του μέγιστου άξονα (-a-), (ε) το σχετικό βάθος μετρούμενο από την ελλειπτική βάση και (στ) το απόλυτο βάθος του κρατήρα μετρούμενο από την επιφάνεια της θάλασσας.



(α)

(β)

(γ)

Εικ. 2. (α) Λεπτομερής βυθομετρία του κρατήρα P1, (β) η κωνική επιφάνεια 4^{ου} βαθμού, όπως προέκυψε από την ανάλυση επιφανειών τάσης του κρατήρα P1 και (γ) μέτρηση μορφομετρικών παραμέτρων του κρατήρα P1.

Fig. 2. (a) Detailed bathymetric map of rockmark P1 and (b) 4th trend surface for rockmark P1 and (c) morphometric measurements on rockmark P1.

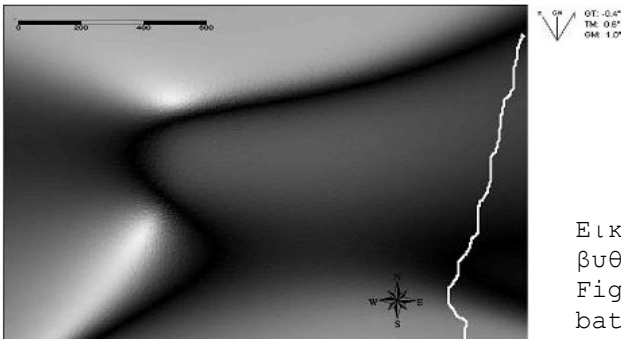
Η μέθοδος της προσομοίωσης των κρατήρων εφαρμόστηκε σε 18 απλούς κρατήρες του πεδίου χωρίς να καταστεί δυνατή η εφαρμογή της στους σύνθετους κρατήρες. Για τους σύνθετους κρατήρες επιχειρήθηκε μια απλή εκτίμηση του σχετικού και απόλυτου βάθους και της επιφάνειας της ελλειπτικής βάσης. Στη βάση δεδομένων που σχηματίστηκε από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των 18 κρατήρων, εφαρμόστηκε η μέθοδος της Ανάλυσης Διακριτότητας. Η Ανάλυση Διακριτότητας στόχο έχει την ομαδοποίηση των κρατήρων σε επιμέρους ομάδες με βάση τα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους. Η εφαρμογή της ανάλυσης απαιτεί την ύπαρξη ενός αρχικού διαχωρισμού των κρατήρων σε υποομάδες. Η αναγκαία αυτή ομαδοποίηση επιτεύχθηκε μέσω της ιεραρχικής συστάδα ανάλυσης (cluster observations analysis). Η διαδικασία αυτή αποτελεί μία ιεραρχική μέθοδο ταξινόμησης των αρχικών δεδομένων με βάση τους συντελεστές συσχέτισης που αυτά παρουσιάζουν. Μετά τον καθορισμό δύο υποομάδων κρατήρων, εφαρμόστηκε η Ανάλυση Διακριτότητας για: (i) να ελέγξει τη σωστή ένταξη των κρατήρων στις υποομάδες και (ii) να εντάξει στις δύο υποομάδες, κρατήρες που πιθανόν δεν κατέστη δυνατόν να ενταχθούν με την ιεραρχική συστάδα ανάλυσης. Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της Διακριτής Ανάλυσης και τον καθορισμό των τυπικών κρατήρων (end-members) κάθε ομάδος εφαρμόστηκε στη βάση δεδομένων των 18 κρατήρων η Q-τύπου παραγοντική ανάλυση.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η κατασκευή του λεπτομερούς βυθομετρικού χάρτη στο ΒΑ-ικό άκρο του πεδίου, έδειξε την παρουσία 18 απλών και 7 σύνθετων κρατήρων (Εικ. 1). Οι σύνθετοι κρατήρες έχουν προέλθει από τη συνένωση γειτονικών απλών κρατήρων.

Η συνευθειακή διευσθέτηση των κρατήρων Νο. 18, Σ1, 13, 1 και 8 φαίνεται να είναι αποτέλεσμα της διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων διαμέσου ενεργού ρήγματος διεύθυνσης Α.Δ-ικής, όπως διαπιστώνεται σε τομογραφία 3.5kHz. Ο σχηματισμός κρατήρων κατά μήκος του ίχνους ρηγμάτων είναι μια διεργασία που έχει αναφερθεί και από άλλους ερευνητές (Hovland and Judd 1988, Papatheodorou et al 1993, Hasiotis et al 2002).

Η εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυσης Επιφανειών Τάσης 4ου βαθμού στα δεδομένα κλίσεων του πεδίου, οδήγησε στον καθορισμό μιας γραμμικής περιοχής μεγίστων κλίσεων (Εικ.3). Αυτή η καμπύλη γραμμική περιοχή ιχνηθετεί το ρήγμα Α.Δ-ικής διεύθυνσης ενώ στη συνέχεια στρέφεται σε μια Β.ΒΑ-Ν.ΝΔ-ική διεύθυνση, η οποία δεν αντιστοιχεί σε ρήγμα. Η γραμμική περιοχή μεγίστων κλίσεων αποτελεί το όριο του πεδίου κρατήρων προς τα βόρεια και δυτικά, καθώς ο μεγαλύτερος αριθμός των κρατήρων του πεδίου περιορίζεται μεταξύ αυτής της γραμμικής περιοχής και της ακτογραμμής.



Εικ. 3. Τετάρτου βαθμού επιφάνεια τάσης των βυθομετρικών δεδομένων.

Fig. 3. Fourth degree trend surface for bathymetric data.

Η προσομοίωση 18 απλών κρατήρων του πεδίου με τη μέθοδο Ανάλυσης Επιφανειών Τάσης 4ου βαθμού οδήγησε στον υπολογισμό των μορφομετρικών παραμέτρων των κρατήρων (Πιν. 1). Επιπλέον έγινε η εκτίμηση της επιφάνειας, του σχετικού και απόλυτου βάρους των σύνθετων κρατήρων (Πιν. 1).

Η εφαρμογή της Ανάλυσης Διακριτότητας στις πέντε μορφομετρικές παραμέτρους των 18 απλών κρατήρων, τους διέκρινε σε δύο κύριες ομάδες με βάση τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά τους. Στην Ομάδα Α εντάσσονται οι κρατήρες P1,2,3,4,5,6,7,10,13,14 και 18, ενώ στην Ομάδα Β οι υπόλοιποι κρατήρες P8,9,11,12,15,16 και 17 (Εικ. 1). Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μορφομετρικών παραμέτρων για τις δύο ομάδες κρατήρων.

Στην Ομάδα Α εντάσσονται οι μεγαλύτεροι σε έκταση και σχετικό βάθος κρατήρες, οι οποίοι επιπλέον χαρακτηρίζονται από ελαφρά μικρότερες κλίσεις πρηνών από αυτούς της ομάδας Β, ενώ τείνουν περισσότερο σε ελλειπτικό σχήμα από τους τελευταίους (Πιν. 2). Οι κρατήρες της Ομάδας Β είναι μικρότερης έκτασης και βάρους και τείνουν περισσότερο προς το κυκλικό σχήμα (Πιν.2). Η έκταση και το σχετικό βάθος των κρατήρων έχει χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για την εκτίμηση της ηλικίας τους. Οι Hovland et al (1984) και Harrington (1985) υποστηρίζουν ότι υπάρχει μια γενετική συγγένεια μεταξύ μικρών κρατήρων (unit rockmarks) και κρατήρων μεγαλύτερου μεγέθους. Μικρής επιφάνειας και αβαθείς κρατήρες αντιπροσωπεύουν πρώιμα στάδια ανάπτυξης ενώ μεγάλης έκτασης και βαθείς κρατήρες αντιπροσωπεύουν πιο ώριμα στάδια εξέλιξης. Μπορεί λοιπόν να υποστηριχθεί ότι οι κρατήρες της ομάδας Β αντιπροσωπεύουν τους νεότερους κρατήρες του πεδίου ενώ αυτοί της Ομάδας Α είναι τα ωριμότερα μέλη του πεδίου. Οι επτά σύνθετοι κρατήρες του πεδίου, οι οποίοι δεν κατέστη δυνατόν να προσομοιωθούν με σαφές γεωμετρικό σχήμα, εντάσσονται στην Ομάδα Α, με βάση τις διαστάσεις τους (Πιν. 2). Συνολικά, το 28% των κρατήρων του πεδίου βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και το υπόλοιπο 72% των κρατήρων βρίσκεται σε περισσότερο ώριμο στάδιο ανάπτυξης.

Οι κρατήρες της Ομάδας Α παρουσιάζουν τους μέγιστους άξονες έλλειψης με κύρια διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ-ική, ενώ αυτοί της Ομάδας Β με κύρια διεύθυνση Α.ΝΑ-Δ.ΒΔ-ική. Αυτές οι διευθύνσεις είναι περίπου κάθετες προς τις ισοβαθείς της περιοχής. Συνολικά, το 75% των απλών κρατήρων και των δύο ομάδων παρουσιάζουν διευθύνσεις μέγιστων αξόνων έλλειψης σχεδόν κάθετους στις ισοβαθείς, ενώ μόνο το 25% των

κρατήρων σχεδόν παράλληλες με τις ισοβαθείς. Η ελλειπτικότητα στη μορφή των κρατήρων έχει αποδοθεί από πολλούς ερευνητές στη δράση ρευμάτων που δρουν κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα (Boe et al 1998, Hovland and Judd 1988, Baraza and Ercilla 1996). Στον Α.ΝΑ-ικό Πατραϊκό κόλπο έχει διαπιστωθεί μια σαφής κυκλωνική μεταφορά ιζημάτων λόγω ασθενών παρακτίων ρευμάτων, η οποία αναπτύσσεται παράλληλα προς τις ισοβαθείς (Παπαθεοδώρου και Κοντόπουλος, 1998). Αυτή η κυκλωνική μεταφορά ιζημάτων επιβεβαιώνεται με ρευματομετρήσεις (Παπαγεωργίου κ.α. 1987) καθώς και από τα δεδομένα αριθμητικού ομοιώματος της κυκλοφορίας των υδάτων, (Φερεντίνος κ.α 1993). Το μικρό ποσοστό (25%) των κρατήρων που παρουσιάζουν ελλειπτικότητα παράλληλα με τις ισοβαθείς, υποστηρίζει ότι η δράση των ρευμάτων δεν αποτελεί το κύριο αίτιο για τη διαμόρφωση της ελλειπτικότητας των κρατήρων. Αντίθετα, ο σημαντικός αριθμός κρατήρων που παρουσιάζουν ελλειπτικότητα κάθετη σχεδόν στις ισοβαθείς, υποδηλώνει τη δράση ενός άλλου αιτίου, το οποίο σχετίζεται με την ύπαρξη του ενεργού ρήγματος Α.Δ-ικης διεύθυνσης. Ο σχηματισμός ελλειπτικών κρατήρων κατά μήκος ενεργών ρηγμάτων ή και "ασθενών ζωνών" που σχετίζονται με ρήγματα, είναι μια διεργασία που προτείνεται από τους Hovland et al 1996 και Hasiotis et al 2002.

Πίνακας 1

Μορφομετρικοί παράμετροι απλών (P) και σύνθετων (Σ) κρατήρων

Κωδικός κρατήρα	Απόλυτο βάθος κρατήρα (m)	Μήκος άξονα a (m)	Μήκος άξονα b (m)	Ελλειπτικότητα κρήρα b/a	Διεύθυνση άξονα a (ο)	Έκταση ελλειπτικής επιφάνειας (m ²)	Μέση κλίση πρανών κρατήρα (%)	Σχετικό βάθος κρατήρα (m)
P1	42	35,5	24	0,68	91	2675	37,30	12,0
P2	29	31,5	31,5	1,00	89	3115	31,10	9,0
P3	38	26,5	26,5	1,00	84	2205	29,30	6,0
P4	47	33,5	29,5	0,88	190	3103	36,10	10,0
P5	45	43	30,5	0,71	213	4118	26,90	6,0
P6	46	49,5	43	0,87	215	6683	32,40	10,0
P7	51	33	27	0,82	181	2798	20,11	12,0
P8	42	18,5	18	0,97	94	1045	56,30	5,0
P9	30	18	18	1,00	82	1017	31,10	4,0
P10	48	34,5	28	0,81	113	3033	28,00	6,0
P11	34	24,5	17	0,69	83	1308	38,80	2,0
P12	27	20	17,5	0,88	177	1099	14,50	4,0
P13	40	30	25	0,83	186	2355	20,70	11,0
P14	48	31,5	22	0,70	109	2176	20,60	7,0
P15	31	16,5	15,5	0,94	172	803	34,70	4,0
P16	31	21,5	17,5	0,81	94	1181	18,10	2,0
P17	40	22	17,5	0,80	71	1209	31,90	5,0
P18	23	29,5	25	0,85	75	2316	20,10	2,5
Σ1	39	-	-	-	-	7179	-	20,0
Σ2	41	-	-	-	-	5087	-	16,0
Σ3	44	-	-	-	-	6547	-	15,0
Σ4	50	-	-	-	-	9068	-	19,0
Σ5	50	-	-	-	-	14921	-	15,0
Σ6	36	-	-	-	-	7840	-	21,0
Σ7	32	-	-	-	-	2602	-	10,0

Πίνακας 2

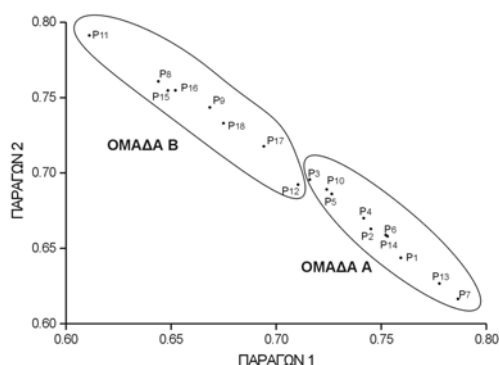
Μέσες τιμές μορφομετρικών παραμέτρων Ομάδων Α και Β των απλών κρατήρων

Ομάδα κρατήρων (κωδικοί κρατήρων)	Ελλειπτικότητα κρατήρα	Διεύθυνση άξονα a (ο)	Έκταση ελλειπτικής επιφάνειας (m ²)	Σχετικό βάθος κρατήρα (m)	Μέση κλίση πρανών Κρατήρα (%)
Ομάδα Α (P1,2,3,4,5,6,7,10,13,14,18)	0,83	140	12573,9872	8,3	27,5
Ομάδα Β (P8,9,11,12,15,16,17)	0,87	110	4378,95428	3,7	32,2

Η εφαρμογή της Q-τύπου παραγοντικής ανάλυσης στα μορφολογικά δεδομένα (Πιν. 1) των 18 απλών κρατήρων, οδήγησε σε ένα διμελές παραγοντικό μοντέλο, το οποίο επιβεβαίωσε τη διάκριση των κρατήρων σε δύο επιμέρους ομάδες όπως αυτή προέκυψε από την εφαρμογή της Ανάλυσης Διακριτικότητας. Ο πρώτος εκφράζει τους κρατήρες της ομάδας Α ενώ ο δεύτερος αυτούς της ομάδας Β (Εικ. 4). Εξάιρεση αποτελεί ο

κρατήρας P18, ο οποίος εντάσσεται στην ομάδα A σύμφωνα με την Ανάλυση Διακρίσιμότητας, ενώ εντάσσεται στην ομάδα B με βάση την Q-τύπου Παραγοντική Ανάλυση (Εικ. 4). Η γραφική αναπαράσταση των παραγοντικών φορτίσεων των δύο παραγόντων απέδωσε παραστατικά τη σχέση μεταξύ των δύο ομάδων, ενώ επιπλέον καθόρισε τον τυπικό κρατήρα για κάθε ομάδα (Εικ. 4). Ο κρατήρας P7 είναι τυπικός της ομάδας A και άρα των ώριμων κρατήρων του πεδίου ενώ ο κρατήρας P11 είναι τυπικός των κρατήρων που βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης (ομάδα B) (Εικ. 4). Οι υπόλοιποι κρατήρες του πεδίου διατάσσονται μεταξύ των δύο αυτών ακραίων μορφολογικά κρατήρων (Εικ. 4).

Οι πυρήνες ιζημάτων συλλέχθηκαν από απλούς κρατήρες της ομάδας A (P4,6,10 και 18) και σύνθετους κρατήρες (Σ1,4,5 και 6). Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των ποσοστών (%) των κύριων κοκκομετρικών τάξεων των επιφανειακών (0-1.5m) ιζημάτων που καλύπτουν τον πυθμένα των κρατήρων.



Εικ. 4. Διάγραμμα του διμελούς παραγοντικού μοντέλου των μορφομετρικών δεδομένων, στο οποίο διακρίνονται οι δύο μορφολογικές ομάδες κρατήρων (ομάδα A και B).

Fig. 4. Plot of the first two factor axes for morphometric data, showing the two morphological groups of rockmarks (group A and B).

Η εφαρμογή της Q-τύπου παραγοντικής ανάλυσης στα ιζηματολογικά δεδομένα (Πιν. 3) των τεσσάρων απλών και τεσσάρων σύνθετων κρατήρων, οδήγησε σε ένα διμελές παραγοντικό μοντέλο, το οποίο διέκρινε τους κρατήρες σε δύο ομάδες. Ο πρώτος παράγων εκφράζει κρατήρες (Σ4,Σ5, P10 και P6) που καλύπτονται από λεπτόκοκκα ιζήματα, των οποίων το αθροιστικό ποσοστό της αργίλου και του πηλού κυμαίνεται από 94 έως 99% (Εικ. 5, Πιν.3). Ο δεύτερος παράγων εκφράζει κρατήρες (P4,Σ1,Σ6 και P18) που καλύπτονται από ιζήματα αξιοσημείωτα αδρομερέστερα αυτών του πρώτου παράγοντα (Εικ. 5, Πιν.3). Σε αυτούς τους κρατήρες, το αθροιστικό ποσοστό του πηλού, της άμμου και των ψηφίδων κυμαίνεται από 63.7 έως 73% έναντι χαμηλότερων αντιστοίχων αθροιστικών ποσοστών (52-56%) των κρατήρων του πρώτου παράγοντα (Πιν. 3).

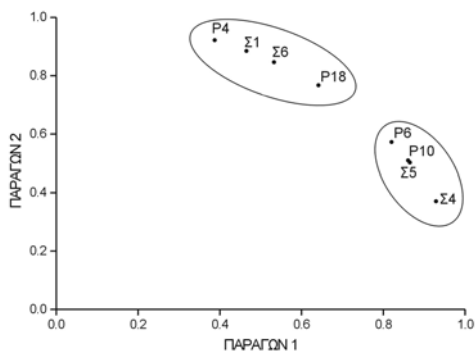
Πίνακας 3

Μέσες τιμές κύριων κοκκομετρικών τάξεων επιφανειακών ιζημάτων (0-1.5m) απλών και σύνθετων κρατήρων

Κωδικός κρατήρα (αριθμός κοκκομετρικών αναλύσεων)	Άργιλος (Clay) (%)	Πηλός (Silt) (%)	Άμμος + Ψηφίδες (Sand + gravels) (%)
P4 (n=11)	27.0	61.0	12.0
P6 (n=3)	44.4	54.6	1.0
P10 (n=5)	46.5	52.4	1.1
P18 (n=5)	35.9	60.4	3.7
Σ1 (n=12)	28.0	70.2	1.8
Σ4 (n=5)	48.0	45.7	6.3
Σ5 (n=6)	45.5	50.4	4.1
Σ6 (n=7)	32.0	54.5	13.5

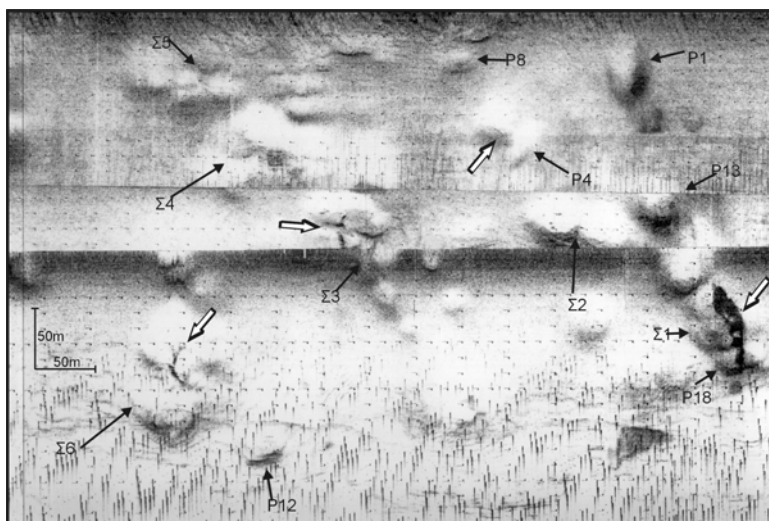
Η αυξημένη παρουσία πηλού και άμμου και η μειωμένη παρουσία της αργίλου στα επιφανειακά ιζήματα του πυθμένα εντός των κρατήρων, μπορεί να αποτελέσει ένα αξιόπιστο κριτήριο για τον καθορισμό των κρατήρων που παρουσίασαν δραστηριότητα στο πρόσφατο παρελθόν. Οι Hovland και Judd (1988) απέδωσαν την αυξημένη παρουσία πηλού στα επιφανειακά ιζήματα (0-2m) εντός των κρατήρων συγκριτικά με ιζήματα εκτός κρατήρων, ως αποτέλεσμα της διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων από τους κρατήρες. Η διαφυγή αερίων συμπαρασύρει προς την υδάτινη στήλη το λεπτομερέστερο κλάσμα των ιζημάτων, δηλαδή την άργιλο, εμπλουτίζοντας έτσι τα ιζήματα που παραμένουν στον πυθμένα των κρατήρων σε αδρομερέστερα κλάσματα (πηλό, άμμο και

ψηφίδες). Σύμφωνα με τα πιο πάνω, οι κρατήρες P4, Σ1, Σ6 και P18 μπορεί να θεωρηθούν ως περισσότερο ενεργοί στο πρόσφατο παρελθόν συγκριτικά με τους Σ4, Σ5, P10 και P6. Αυτή η άποψη ισχυροποιείται από το μωσαϊκό ηχογραφιών της Εικόνας 6, στο οποίο καταγράφηκε το υπό μελέτη πεδίο κρατήρων, αμέσως μετά το σεισμό 5.4R της 14ης Ιουλίου 1993 (Εικ. 6). Οι ζώνες υψηλής ανακλαστικότητας (σκουρόχρωμες) που έχουν αποτυπωθεί εντός των κρατήρων P4, P18, Σ1 και Σ6 αντιπροσωπεύουν διαφυγές αερίων από τον πυθμένα των κρατήρων (Εικ. 6). Το γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι κρατήρες ήταν τα μοναδικά μέλη του πεδίου που δραστηριοποιήθηκαν στο σεισμό της 14ης/7/1993, ισχυροποιεί το προαναφερθέν ιζηματολογικό κριτήριο ενεργότητας κρατήρων.



Εικ. 5. Διάγραμμα του διμελούς παραγοντικού μοντέλου των ιζηματολογικών δεδομένων, στο οποίο διακρίνονται δύο ομάδες κρατήρων.

Fig. 5. Plot of the first two factor axes for sedimentological data, showing two groups of pockmarks.



Εικ. 6. Μωσαϊκό ηχογραφιών ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης στο οποίο έχουν καταγραφεί απλοί (P) και σύνθετοι (Σ) κρατήρες. Οι ακανόνιστες σκουρόχρωμες ζώνες αντιπροσωπεύουν αιώρηση ιζήματος και φυσαλλίδες αερίου που διαφεύγουν από ενεργούς κρατήρες. Οι σκουρόχρωμες ζώνες σημειώνονται με λευκά βέλη.

Fig. 6. Side-scan sonar mosaic showing single (P) and composite (Σ) pockmarks. Irregular black marks on records represent suspended sediment and gas bubbles

rising in the water column from active pockmarks (white arrows indicate the irregular black marks).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή στατιστικής ανάλυσης σε μορφομετρικές και ιζηματολογικές παραμέτρους του πεδίου κρατήρων διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων στον ΒΑ-ικό Πατραϊκό κόλπο οδήγησε με στατιστικά αξιόπιστο τρόπο:

- Στον καθορισμό δύο ομάδων κρατήρων. Στην ομάδα Α εντάσσονται οι μεγαλύτεροι, βαθύτεροι και περισσότερο ελλειπτικοί κρατήρες, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν ώριμα στάδια ανάπτυξης. Στην ομάδα Β εντάσσεται ένας μικρός αριθμός κρατήρων (~28%) που αντιπροσωπεύουν πρώιμα στάδια ανάπτυξης.
- Η μορφολογική εξέλιξη των κρατήρων επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από την ύπαρξη ενός ενεργού ρήγματος διεύθυνσης Α-Δ και λιγότερο από την δράση παράκτιων ρευμάτων όπως αυτό διαπιστώνεται από την διεύθυνση των μεγίστων αξόνων των ελλείψεων που αναπαριστούν τους κρατήρες.
- Οι περισσότερο ενεργοί κρατήρες, κατά το πρόσφατο παρελθόν, χαρακτηρίζονται από την παρουσία αδρομερέστερων ιζημάτων σε σχέση με τους λιγότερο ενεργούς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Baraza J and Ercilla G (1996) Gas-charged sediments and large pockmark-like features on the Gulf of Cadiz slope (SW Spain). *Marine and Petroleum Geology* 13(2): 253-261
- [2] Boe R, Rise L and Ottesen D (1998) Elongate depressions on the southern slope of the Norwegian Trench (Skagerrak): morphology and evolution. *Marine Geology* 146: 191-203.
- [3] Davis J. C. (1986) 'Statistics and data analysis in geology' 2nd edition, J. Willey & Sons, New York, 646 pp.
- [4] Folk R.L. (1974): "Petrology of sedimentary rocks" Hemphill Publishing Co. Texas.
- [5] Harrington P.K. (1985) Formation of pockmarks by pore-water escape. *Geo-marine Letters* 5: 193-194.
- [6] Hasiotis T, Papatheodorou G, Kastanos N and Ferentinos G (1996) A pockmarks field in the Patras Gulf (Greece) and its activation during the 14/7/93 seismic event. *Marine Geology* 130: 333-344.
- [7] Hasiotis T., Papatheodorou G., and Ferentinos G. (2002): A string of large and deep gas-induced depressions (pockmarks) offshore of Killini Peninsula, Western Greece. *Geo-Marine Letters* (in press).
- [8] Hovland M, Judd A and King L.H. (1984) Characteristic features of pockmarks on the North Sea floor and Scotian Shelf. *Sedimentology* 31: 471-480.
- [9] Hovland M (1998) Seabed pockmarks on the Helike delta front. In: Katsanopoulou D, Soter S, Schildardi D (Eds.), *Ancient Helike and Aegialeia. Helike History*, Athens, pp. 471-477
- [10] Hovland M and Judd A (1988) Seabed pockmarks and seepages. Impact on geology, biology and the marine environment. *Graham and Trotman*, pp. 293
- [11] Hovland M, Vasshus S and Heggland R (1996) Pockmarks in the Norwegian Trench - some new observations. 4th Int. Conf. Gas in Marine Sediments, September 1996, Varna, pp. 28-30.
- [12] Newton R, Cunningham R and Schubert C (1980) Mud volcanoes and pockmarks: seafloor engineering hazards or geological curiosities? 12th Annual Offshore Technology Conference, Texas, May 5-8, paper 3729.
- [13] Papatheodorou G, Hasiotis T and Ferentinos G (1993) Gas charged sediments in the Aegean and Ionian Seas, Greece. *Marine Geology* 112: 171-184
- [14] Soters S (1999) Macroscopic seismic anomalies and submarine pockmarks in the Corinth-Patras rift, Greece. *Tectonophysics* 308: 275-290
- [15] Παπαγεωργίου Ε., Παπαδόπουλος Β. και Χαραλαμπίκης Α (1987): "Παρατηρήσεις θαλασσίων ρευμάτων στο Ανατολικό Ιόνιο πέλαγος: Πατραϊκός κόλπος". *Β' Πανελλήνιο Συνέδριο Ωκεανογραφίας & Αλιείας*. Αθήνα 11-15 Μαΐου 1987, σελ. 242-253.
- [16] Παπαθεοδώρου Γ. και Κοντόπουλος Ν. (1998): "Καθορισμός των διευθύνσεων 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.
- [17] Παπαθεοδώρου Γ., Λαυρεντάκη Μ., Μουρελάτος Π., Βουτσινάς Κ. και Εένος Κ. (2001). "Κρατήρες διαφυγής αερίων (?) στον πυθμένα της λιμνοθάλασσας του Αιτωλικού." *Αλιευτικά Νέα*, τεύχος 238, Απρίλιος 2001, σελ. 73-87.
- [18] Φερεντίνος Γ., Κάστανος Ν. & Ζαχαρίας Ι. (1993): "Ωκεανογραφικές έρευνες για την τοποθέτηση του υποθαλάσσιου αγωγού λυμάτων της Πάτρας" *Τεχνική Έκθεση ΔΕΥΑΠ*.