

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΣΤΗΝ ΠΛΑΓΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΚΕΡΚΥΡΑΣ - ΠΑΞΩΝ (ΠΛΑ- ΓΙΑ ΔΥΤ. ΕΛΛΑΔΑΣ)*

Θ. ΧΑΣΙΩΤΗΣ¹, Γ. ΠΑΠΑΘΕΟΔΩΡΟΥ¹ & Γ. ΦΕΡΕΝΤΙΝΟΣ¹

ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μίας θαλάσσιας γεωφυσικής/γεωτεχνικής έρευνας που εκτελέστηκε στην πλαγιά μεταξύ Κέρκυρας-Παξών (πλαγιά Δυτικής Ελλάδας). Τα κυριότερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής αποτελούν οι εναλλαγές χαραδρώσεων και ράχων (υψηλών κλίσεων) και τα ποικίλα κατολισθητικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Η μελέτη των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των ιζημάτων έδειξε την παρουσία χαρακτηριστικών οριζόντων (οξειδωμένη ιλύς, σαπροπηλός) η παρουσία ή η απουσία των οποίων είναι ενδεικτική της δράσης βαρυτικών μετακινήσεων. Από την ανάλυση ευστάθειας προέκυψε ότι τα πρανά είναι ασταθή όχι μόνο σε δυναμικές αλλά και τοπικά σε στατικές συνθήκες και ότι τα βάθη ολίσθησης αναπτύσσονται σε βάθη 5-20m κάτω από τον πυθμένα.

ABSTRACT

This paper presents the results of a marine geophysical/geotechnical survey, which was carried out between Kerkyra and Paxi slope (part of the western Greek slope). The main bathymorphological features are numerous canyons and intercanon ridges that exhibit high slope gradients (up to 30°). The canyon flanks as well as the ridges are affected by numerous mass movements that include slides, rotated sediment blocks, well-exposed sediment detachment surfaces, mass flows and creeping. Most of the aforementioned movements present a retrogressive action of the failure mechanism. The unstable sediment masses are often transported through the canyons and are deposited in the adjacent basin creating a sequence of alternating mass flow deposits and turbiditic/hemipelagic sediments.

The gravity cores collected along two ridges, in the Kerkyra and Paxi slopes, revealed a certain sedimentary sequence consisting of calcareous ooze, oxidized mud and a sapropel layer overlaying hemipelagic mud. Along those sediment facies turbiditic muddy to sandy deposits usually appear. The main geotechnical characteristics of these lithofacies are the low undrained shear strength and high water content in the sapropel layer and the inverse relationship of the abovementioned properties in the oxidized mud. The water content of all the sediments is higher than the liquid limit indicating the very soft nature of the deposits and the possible destabilization upon disturbance (i.e. earthquake).

The stability of the sedimentary cover was evaluated using the infinite slope, the Bishop and the Janbu methods. The main results that stemmed from the analysis are that (i) the Kerkyra slope is unstable both in static and dynamic conditions and (ii) the Paxi slope is unstable in dynamic conditions, whilst the very surficial layers (<1.5m in thickness) can be also unstable under static conditions. The possible failure planes are located 5-20m under the seabed. The absence of the oxidized mud and sapropel layers in the Kerkyra slope as well as their presence in the Paxi slope, and the presence of an episapropelic layer in the Kerkira-Paxi basin are all indicative of the unstable nature of the seafloor.

Cyclic loading by earthquakes, high slope gradients and sediment bedding parallel to the slope are believed to be the predominant slope failure mechanisms in the surveyed area.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: υποθαλάσσια κατολισθητικά φαινόμενα, γεωτεχνικές ιδιότητες θαλάσσιων ιζημάτων, ανάλυση ευστάθειας πράνων

KEY WORDS: submarine mass movements, geotechnical properties of marine sediments, slope stability analysis

* SURFICIAL MASS MOVEMENTS AND SUBMARINE SLOPE STABILITY ANALYSIS BETWEEN KERKYRA AND PAXI SLOPE (WESTERN GREEK SLOPE)
Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

1. Εργαστήριο Θαλάσσιας Γεωλογίας & Φυσικής Ωκεανογραφίας (Ε.Θ.Α.Γ.Ε.Φ.Ω.), Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πλαίσιο μίας θαλάσσιας γεωφυσικής/γεωτεχνικής έρευνας εξετάστηκαν τα επιφανειακά κατολισθητικά φαινόμενα και η ευστάθεια των υποθαλάσσιων πρηνών σε τμήμα της πλαγιάς της ΒΔ Ελλάδας, μεταξύ των νήσων Κέρκυρας και Παξών. Η περιοχή αυτή τα τελευταία περίπου 13.10⁶ χρόνια βρίσκεται σε ένα καθεστώς συμπίεσης και χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμικότητα λόγω της ανάπτυξης ρηγμάτων BBA-NNA και BBA-NNA διεύθυνσης. Τα προαναφερθέντα συστήματα ρηγμάτων ορίζουν μία επιμήκη ζώνη έντονης σεισμικής δραστηριότητας, γνωστή σαν «σεισμική ζώνη των Ιονίων νήσων» (Papazachos and Papazachou 1989). Από καταλόγους σεισμών προκύπτει ότι ο ευρύτερος χώρος έχει δώσει σεισμούς μέχρι και 6.5R ενώ σύμφωνα με το χάρτη σεισμικότητας του Ελληνικού χώρου η περιοχή έρευνας μπορεί να δώσει σεισμούς από 5 έως 6.3R (Papazachos and Papazachou, 1989).

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η έρευνα εκτελέστηκε το Σεπτέμβριο του 1993 από το Ε.Θ.Α.Γ.Ε.Φ.Ω. και κατά τη διάρκεια της χρησιμοποιήθηκαν (α) υδρογραφικός ηχοβολιστής τύπου SIMRAD EA-300P, και (β) τομογράφος υποδομής πυθμένα τύπου 3.5kHz (O.R.E.) και τύπου Sparker (SIG). Επιπλέον συλλέχθηκαν 8 πυρήνες ιζηματοσμήκων μήκους 120-210cm για τη μελέτη των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των ιζημάτων. Ο προσδιορισμός της θέσης του σκάφους γίνονταν με το διαφορικό δορυφορικό σύστημα TRIMBLE 4000II RL-DL.

Η εργαστηριακή ανάλυση των πυρήνων περιελάβε αρχικά την ακτινογράφηση τους, τον προσδιορισμό της διαμητρικής αντοχής, της υγρής πυκνότητας και της φυσικής υγρασίας αμέσως μετά τη διάνοιξη τους και στη συνέχεια τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg, της κοκκομετρίας και του ποσοστού ανθρακικού ασβεστίου.

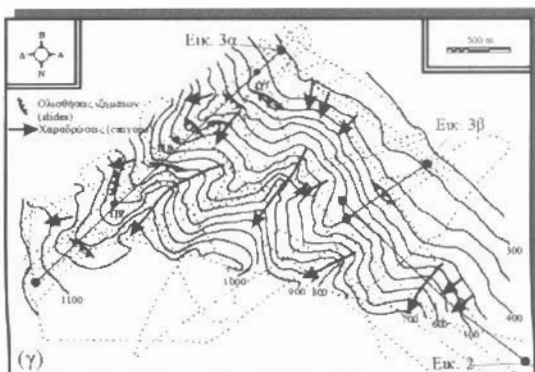
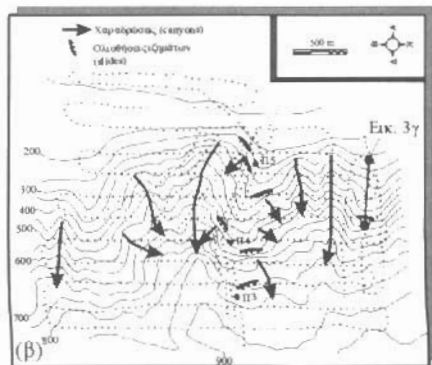
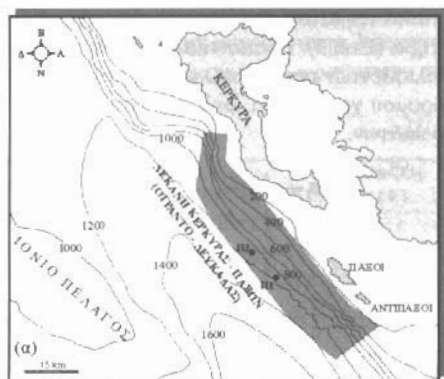
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Βυθομετρία-Μορφολογία: Από τη βυθομετρική αποτύπωση στη ζώνη έρευνας διαπιστώθηκε ότι η πλαγιά Κέρκυρας-Παξών οριοθετείται από την ισοβαθή των 160m στην περιοχή της Κέρκυρας ενώ προς τα νότια (περιοχή Παξών) από την ισοβαθή των 300m. Προς τα κατάντη η φυσιογραφική ενότητα της πλαγιάς, περιορίζεται μεταξύ των ισοβαθών των 900m και 1250m από βόρεια (Κέρκυρα) προς νότια (Παξοί). Η γενική μορφολογία της περιοχής έρευνας παρουσιάζεται ιδιαίτερα πολύπλοκη. Η πλαγιά διατέμενεται από μεγάλο αριθμό υποθαλάσσιων χαραδρώσεων και ράχων οι περισσότερες εκ των οποίων αναπτύσσονται από το υφαλόροιο και καταλήγουν στην περιοχή της λεκάνης Κέρκυρας-Παξών. Λεπτομερείς έρευνες που εκτελέστηκαν σε τμήματα της πλαγιάς της Κέρκυρας καθώς και NNA των Παξών (Εικ. 1) απέδειξαν ότι οι υποθαλάσσιες χαραδρώσεις έχουν ασύμμετρη διατομή με αποτέλεσμα οι πλευρές τους να παρουσιάζουν διαφορετικού βαθμού ανάγλυφο και κλίσεις. Το εύρος τους είναι γενικά μεγάλο και το ύψος των τοιχωμάτων κυμαίνεται από 60 έως και 270m (Εικ. 2). Οι μέγιστες κλίσεις των τοιχωμάτων των χαραδρώσεων είναι υψηλές και τοπικά, ξεπερνούν τις 30°. Στα δύο προαναφερθέντα τμήματα της πλαγιάς που μελετήθηκαν διεξοδικότερα διαπιστώθηκε ότι οι κλίσεις είναι υψηλότερες στην περιοχή της Κέρκυρας (μέγιστη 30°) σε σχέση με την περιοχή των Παξών (μέγιστη 25°). Οι μικρότερες τιμές κλίσεων (5-7°) παρατηρήθηκαν κοντά στη βάση της πλαγιάς, ενώ κατά μήκος του υφαλορίου διαπιστώθηκε ένα σημαντικό εύρος κλίσεων που κυμαίνεται από 8 έως 18.5°. Η λεκάνη Κέρκυρας-Παξών χαρακτηρίζεται από ομαλό ανάγλυφο με κλίσεις μικρότερες από 1.5° που τοπικά μόνο φτάνουν τις 4°.

Γεωφυσική διασκόπηση: Ο πυθμένας κατά μήκος του υφαλορίου καλύπτεται από μία ιζηματογενή ακολουθία Πλειο-Τεταρτογενούς ηλικίας πάχους 30-140m, που επικάθεται ασυμφώνως σε μία παλαιότερη ακολουθία, πιθανώς Μειοκαινικής ηλικίας. Ανάντη του υφαλορίου παρατηρήθηκαν ευρείες κοιλάτες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις κεφαλές υποθαλάσσιων χαραδρώσεων τα τοιχώματα των οποίων έχουν καλυφθεί από αποθέσεις λασποροών / ροών κορημάτων. Η υψηλής έντασης ανακλαστικότητα του πυθμένα ορισμένων χαραδρώσεων δηλώνει ότι είναι ενεργές, δηλαδή ότι αποτελούν σύγχρονες οδούς μεταφοράς ιζημάτων προς τα κατάντη, κυρίως υπό τη μορφή ροών, οι οποίες διαβρώνουν τον πυθμένα των καναλιών.

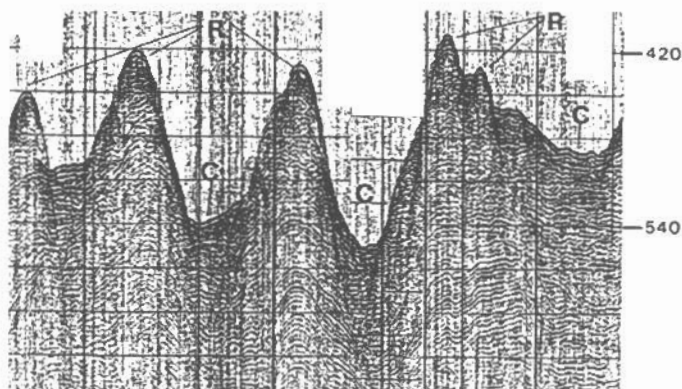
Στην περιοχή του υφαλορίου και της άνω πλαγιάς διαπιστώθηκαν αποκαλλήσεις ιζημάτων πάχους έως και 75m, τα οποία έχουν μεταφερθεί προς τα κατάντη, ενώ κατά θέσεις αποκαλύπτονται στρώματα της κατώτερης (Μειοκαινικής) ακολουθίας (Εικ. 3). Η παρουσία επικαλυπτόμενων αποθέσεων ροών μαζών κατάντη των μετώπων αποκόλλησης δηλώνει την υποχώρηση τους προς τα ανάντη λόγω διαδοχικών καταπτώσεων τμημάτων ιζημάτων (Εικ. 3β,γ). Η κλίση των στρωμάτων είναι παράλληλη έως υποπαράλληλη με τη γενική κλίση της πλαγιάς, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα αστάθειας του πρηνούς. Στην περιοχή της ανώτερης πλαγιάς διαπιστώθηκε επιπλέον, τοπικά, απολέπνωση και ελαφρά πτύχωση των ιζηματογενών στρωμάτων, γεγονός που υποδηλώνει τη δράση εφελκυστικών τάσεων στα επιφανειακά ιζήματα (ερπυσμός).

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.



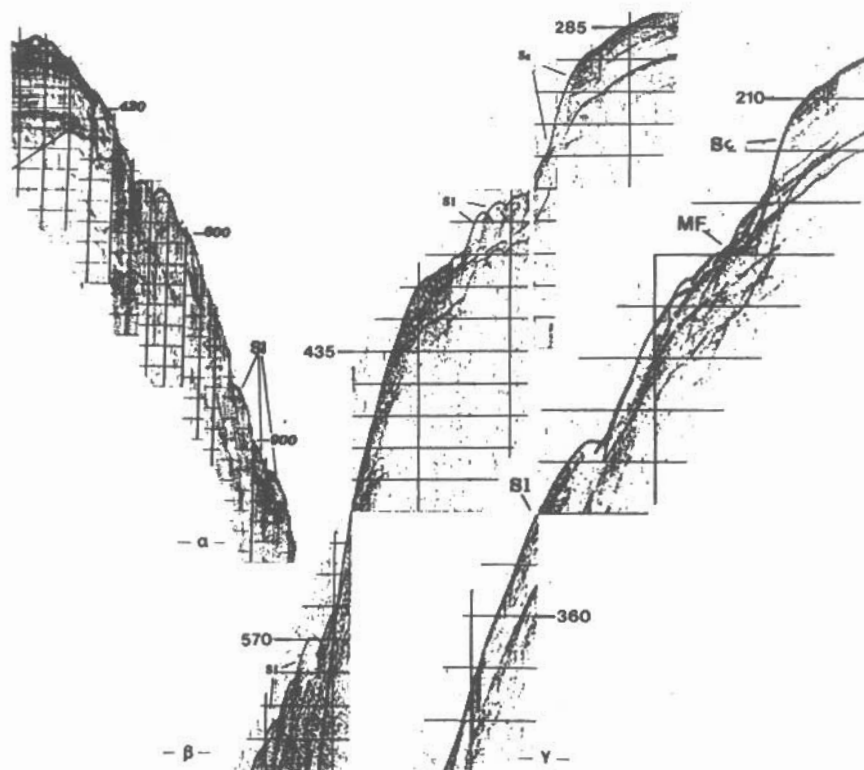
Εικ. 1: (α) Χάρτης στον οποίο φαίνεται η περιοχή έρευνας και η θέση των πυρήνων που ελήφθησαν από την περιοχή της λεκάνης. (β και γ) Χάρτες στους οποίους παρουσιάζεται η βυθομετρία, οι πορείες έρευνας (διακεκομμένες γραμμές), οι θέσεις των πυρήνων και των εικόνων στις πλαγιές της Κέρκυρας (β) και των ΝΝΔ-ικών Παξών (γ).

Fig. 1: (a) Map showing the location of the surveyed area and of the cores collected in the basin. (b and c) Maps showing the bathymetry, the survey lines (dotted lines), the core and the figure locations in the Kerkyra (b) and Paxi (c) slope.



Εικ. 2: Τομογραφία τύπου Sparker στην οποία φαίνονται οι εναλλαγές υποθαλάσσιων χαραδρώσεων (C) και ράχων (R) στην πλαγιά των ΝΝΔ-ικών Παξών.
Fig. 2: Sparker profile showing the alternations of canyon (C) and intercanion ridges (R) in the SSW Paxi slope.
Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Σε βάθος θάλασσας μεγαλύτερο από 500m τα επιφανειακά ιζημάτα (30-40m) της πλαγιάς επηρεάζονται επιπλέον από περιστροφικές ολισθήσεις ελαστικού χαρακτήρα (Εικ. 3). Η απουσία επιφανειακής εμφάνισης των επιπέδων ολίσθησης δηλώνει τη μικρή μετακίνηση των ολισθέντων τεμαχίων. Ο κύριος μηχανισμός ανάπτυξης των επιφανειακών κατολισθήσεων είναι μάλλον ανάδρομος χαρακτήρα, δηλαδή αναπτύσσεται προς τα ανάντη λόγω έλλειψης αντιστήριξης των υπερκείμενων στρωμάτων.



Εικ. 3: Τομογραφίες τύπου Sparker (α) και 3.5kHz (β) στην πλαγιά των ΝΝΔ-ικών Παξών και τύπου 3.5kHz στην πλαγιά της Κέρκυρας (γ) στις οποίες φαίνονται ολισθήσεις ιζηματογενών τεμαχίων (SI), επιφάνειες αποκόλλησης (Sc) και επικαλυπτόμενες αποθέσεις βαρυντικών ροών (MF).

Fig. 3: Sparker (a) and 3.5kHz (b) profiles along the SSW Paxi slope and 3.5kHz profile (c) along the Kerkyra slope showing slided sediment blocks (SI), sediment detachment surfaces (Sc) and overlapping mass flow deposits (MF).

Η ενότητα της λεκάνης Κέρκυρας-Παξών συνίσταται από εναλλαγές τουρβιδιτικών ή/και ημιπελαγικών ιζημάτων με αποθέσεις, οι οποίες είτε (i) προέρχονται από ολισθήσεις και έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση είτε (ii) είναι αποτέλεσμα ροών μαζών (κορημάτων / λαοποροών). Οι βαρυντικές αποθέσεις προέρχονται είτε από μετακινήσεις ιζηματογενών τεμαχίων από τα παρακείμενα ηφαίστεια είτε από μεταφορά ιζημάτων με τη μορφή ροών διαμέσου των χαραδρώσεων που τέμνουν την πλαγιά.

Γεωτεχνικές ιδιότητες: Για τη μελέτη των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των ιζημάτων του πυθμένα συλλέχθηκαν 8 πυρήνες ιζημάτων από τις φυσιογραφικές ενότητες της πλαγιάς και της λεκάνης. Από τις πλαγιές της Κέρκυρας και των ΝΝΔ-ικών Παξών συλλέχθηκαν 6 πυρήνες, ενώ από τη λεκάνη Κέρκυρας-Παξών 2 πυρήνες (Εικ. 1).

Από τη μακροσκοπική παρατήρηση και την εξέταση των ακτινογραφιών -X- διακρίθηκαν οι εξής λιθοφάσεις με την αύξηση του βάθους κάτω από τον πυθμένα: (Α1) ασβεστιτική ιλύς πάχους 15-28cm, (Α2) οξειδωμένη ιλύς πάχους 5-13cm, (Α3) σαπροπηλός πάχους 7-20cm, (Α4) ημιπελαγική ιλύς πάχους συνήθως μεγαλύτερου από 1m και (Α5) τουρβιδιτική ιλύς/άμμος πάχους 3-50cm. Η παραπάνω ανάπτυξη διαπιστώθηκε στην πλαγιά των Παξών ενώ απουσιάζει από την πλαγιά της Κέρκυρας. Η κατακόρυφη κατανομή των γεωτεχνικών ιδιοτήτων στην περιοχή έρευνας ελέγχεται από την παρουσία των συγκεκριμένων λιθοφάσεων. Οι διακυμάνσεις των τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων σε κάθε λήψη (Πιν. 1) καθώς και οι σημαντικότερες παρατηρήσεις παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

(α) Κατά μήκος της ημιπελαγικής υλός διαπιστώθηκε μείωση της περιεκτικότητας του νερού και αύξηση της υγρής πυκνότητας και της αστραγγιστής διαμητικής αντοχής, τάσεις τυπικές για ιζημάτα που προέρχονται από την καθίζηση λεπτόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

		S (%)	Z (%)	C (%)	CaCO ₃ (%)	γ (gr/cm ³)	w (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Su (kPa)
Δ1	Min	3.80	26.7	26.5	22	1.61	44.14	37	26	9	0.1
	Max	16.7	64.9	66.1	37	1.79	71.35	49	33	20	8.7
	Mean	7.54	38.66	53.8	30	1.69	56.40	45	30	15	2.9
Δ2	Min	3.56	27.8	44.1	28	1.59	47.4	47	28	15	4.2
	Max	7.74	51.6	66.6	33	1.72	65.78	54	38	20	11.2
	Mean	3.89	37.49	58.62	30	1.65	55.9	51	33	18	7.5
Δ3	Min	1.49	20.39	42.94	24	1.56	52.8	45	29	14	0.4
	Max	36.67	44.6	67.8	29	1.69	76.8	53	34	19	6.4
	Mean	6.19	36.02	57.79	26	1.61	63.1	48	31	17	2.9
Δ4	Min	0.54	30.49	28.26	14	1.60	35.9	32	23	5	0.8
	Max	18.04	59.6	62.9	27	1.92	85.1	53	33	20	7.8
	Mean	3.94	49.18	46.88	20	1.72	49.34	41	28	13	4.0
Δ5	Min	1.50	43.6	30.8	15	1.65	41.13	40	26	13	2.9
	Max	19.17	59.4	49.6	20	1.77	56.35	46	30	17	7.7
	Mean	7.25	50.51	42.24	19	1.72	49.82	43	27	16	5.1

S: άμμος, Z: πηλός, C: άργιλος, CaCO₃: ανθρακικό ασβέστιο, γ: υγρή πυκνότητα, w: περιεκτικότητα νερού, LL: όριο υδαρότητας, PL: όριο πλαστικότητας, PI: δείκτης πλαστικότητας, Su: αστραγγιστή διαμητική αντοχή.

(β) Οι υψηλότερες τιμές της περιεκτικότητας νερού σε σχέση με τις τιμές του ορίου υδαρότητας δηλώνει ότι τα ιζημάτα αυτά είναι υποστεροποιημένα, και σε περίπτωση δυναμικής αναμόχλευσης (π.χ. σεισμός) είναι πιθανό να χάσουν τη συνοχή τους και να ρευστούν.

(γ) Η οξειδωμένη υλός χαρακτηρίζεται από υψηλές σχετικά τιμές διαμητικής αντοχής, οι οποίες κυμαίνονται από 4.2-11.2kPa, και μάλλον οφείλονται στην παρουσία κιτρινο-κόκκινων οξειδίων σιδήρου. Οι υψηλές τιμές διαμητικής αντοχής διαταράσσουν τη συνήθη κατακόρυφη κατανομή κατά μήκος των πυρήνων αφού είναι σημαντικά αυξημένες έναντι των υπερκείμενων και υποκείμενων ιζημάτων.

(δ) Η σαπροπηλική λιθόφαση παρουσιάζει αυξημένες τιμές περιεκτικότητας νερού έναντι των υπερκείμενων και υποκείμενων λιθοφάσεων, ενώ οι τιμές της υγρής πυκνότητας και της διαμητικής αντοχής είναι μικρότερες έναντι των αντίστοιχων τιμών των περιβαλλόντων ιζημάτων. Οι σαπροπηλικές οριζόντες που εντοπίστηκαν στη λεκάνη μπορούν να θεωρηθούν, σύμφωνα με το χαρακτήρα τους στις αττινογραφίες -X-ως "επισαπροπηλικού" τύπου. Αυτό σημαίνει ότι η ημιπελαγική ιζηματογένεση του σαπροπηλικού οριζοντα διακόπηκε από μικρής κλίμακας γεγονότα βαρυτικής μεταφοράς ιζημάτων (τουρβιδιτικά ρεύματα) (Anastasakis and Piper, 1991).

(ε) Τουρβιδιτικοί άμμοι και υλές διαπιστώθηκαν τοπικά σε ορισμένους πυρήνες, με επαφή βάσης ανώμαλου σχήματος και παρουσία, επιπλέον, θυλάκων άμμου και πιθανών ιχνών βιοαναμόχλευσης. Η λιθόφαση αυτή εμφανίζει αυξημένη περιεκτικότητα του νερού σε σχέση με τα περιβάλλοντα ιζημάτα λόγω του γρήγορου ρυθμού απόθεσής της και σχετικά αυξημένη διαμητική αντοχή.

Ευστάθεια πρανών: Η μελέτη της ευστάθειας των πλαγιών της Κέρκυρας και των ΝΝΔ-ικών Παξών πραγματοποιήθηκε με χρήση της ανάλυσης (i) του "άπειρου μήκους" πρανού και (ii) των επιμέρους λωρίδων με τις μεθόδους Bishop και Janbu, μετά από τη μελέτη των τομογραφιών και την ανάλυση των πυρήνων που συλλέχθηκαν από τα δύο επιμέρους πρανή σε συγκεκριμένες γεωτεχνικές τομές κατά μήκος μικρού εύρους υποθαλάσσιων ράχων. Τα στοιχεία που προέκυψαν από τις γεωτεχνικές αναλύσεις και χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση ευστάθειας παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Λόγω του περιορισμένου βάθους πυρηνοληψίας (περίπου 2m) η μεταβολή της διαμητικής αντοχής με το βάθος υπολογίστηκε βάσει των δεδομένων των πυρήνων, με την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression analysis). Για την ασφαλή εφαρμογή της μεθόδου στην πλευρά των ΝΝΔ-ικών Παξών απομακρύνθηκαν οι τιμές των τριών επιφανειακών λιθοφάσεων (Δ1, Δ2, Δ3), οι οποίες λόγω των σημαντικών διαφορών μεταξύ τους, αλλοιώναν σημαντικά την αξιοπιστία της εξίσωσης που προέκυψε από την ανάλυση. Η διαμητική αντοχή των ιζημάτων παρουσιάζει μία σχετικά σαφή τάση αύξησης με το βάθος λόγω της ανάπτυξης του στρώματος της ημιπελαγικής υλός από τις τορβιδιτικές οριζόντες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Περιοχή	Υγρή πυκν. (γ)	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή (Su)	Κλίση (°)		Πιθανά επίπεδα ολίσθ. (m)	Σεισμική επιτάχυνση (α)
			max	min		
Παξοί	1.71	$Su=1.79+2.62 \cdot 10^{-2} \cdot d$	25	5	0.35, 1.9, 5	0.24
Κέρκυρα	1.71	$Su=2.06+1.89 \cdot 10^{-2} \cdot d$	30	7	1, 1.7, 5	

d: βάθος σε cm

Για την αποφυγή παρόμοιων προβλημάτων που είναι δυνατό να διαταράξουν την κατακόρυφη κατανομή των τιμών της διατμητικής αντοχής με το βάθος (παρουσία ενστρούσεων με διαφορετικό λιθολογικό χαρακτήρα άρα και με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, διακυμάνσεις της πίεσης του νερού των πόρων) η γραμμική μεταβολή προσομοιώθηκε: (i) από αλληπάλληλα στρώματα πάχους 4m, όπου ήταν δυσχερές η διάκριση της επιφανειακής στρωματογραφίας (κυρίως λόγω των υψηλών κλίσεων) ή όπου διαπιστώνονταν σχετικά ομοιόμορφες συνθήκες ιζηματογένεσης στις τομογραφίες και (ii) από στρώματα διαφορετικού πάχους, τα οποία ήταν δυνατό να διακριθούν στις τομογραφίες. Και στις δύο περιπτώσεις η αστράγγιστη διατμητική αντοχή θεωρήθηκε ίση με αυτή που προκύπτει από τη σχέση της γραμμικής κατανομής για το βάθος του μέσου του κάθε στρώματος. Έτσι αντί για γραμμική μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος χρησιμοποιήθηκε βαθμιδωτό διάγραμμα.

Η διακύμανση της υγρής πυκνότητας είναι πολύ μικρή και υποτέθηκε τέτοια κατανομή ώστε να έχουμε αύξηση κατά 0.01gr/cm³ ανά 2m βάθους σε σχέση με τη μέση τιμή υγρής πυκνότητας που υπολογίστηκε από την ανάλυση των πυρήνων.

Πιθανά επίπεδα ολίσθησης κατά μήκος των οποίων εξετάστηκε η ευστάθεια με την ανάλυση του "άπειρου μήκους" πρανούς είναι: (i) ο σαπροπηλικός οριζοντας στην πλαγιά των Παξών σε βάθος 35cm, λόγω της ιδιαίτερα μικρής διατμητικής του αντοχής και (ii) το μέγιστο βάθος στο οποίο επιτεύχθηκε πυρηνοληψία σε κάθε επιμέρους τμήμα της πλαγιάς και άρα υπάρχουν εργαστηριακά δεδομένα. Επιπλέον ελέγχθηκε το βάθος των 5m ως πιθανό βαθύτερο επίπεδο ολίσθησης, αφού εξαιτίας της γραμμικής αύξησης της διατμητικής αντοχής με το βάθος, ο λόγος Su/Po (αστράγγιστη διατμητική αντοχή/ενεργή τάση υπερχείμνων ιζημάτων) σε μεγαλύτερα βάθη παρουσίασε πολύ μικρές διακυμάνσεις και στα δύο πρανή που εξετάστηκαν.

Η οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής επιτάχυνσης ισούται με 0.12, αφού βάση του NEAK η περιοχή έρευνας ανήκει στη ζώνη III σεισμικής επικινδυνότητας (α=0.24).

Ανάλυση ευστάθειας πρανών σε στατική κατάσταση (Πίνακας 3)

Κατά μήκος της πλαγιάς των Παξών η ανάλυση ευστάθειας με τη μέθοδο του "άπειρου μήκους" πρανούς έδειξε ότι ο στατικός συντελεστής ασφάλειας (Fs) στα ανώτερα 155cm είναι μικρότερος της μονάδας (0.5-0.66) και η μέγιστη κλίση για διατήρηση ευσταθών συνθηκών μικρότερη από 15° γεγονός που φανερώνει την ασταθή κατάσταση στην οποία βρίσκεται το πρανές. Ο συντελεστής ασφάλειας σε βάθη μεγαλύτερα από 1.9m κυμαίνεται μεταξύ 1.08 και 1.13 γεγονός που δηλώνει ότι τα ιζήματα είναι οριακά ευσταθή έως ευσταθή.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ							
ΜΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΠΡΑΝΕΣ				ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΩΡΙΔΩΝ			
Περιοχές	Βάθος επιφ. ολίσθ. (m)	Μέγιστη κλίση ανάλυσης	Fs	Περιοχές	Bishop Fs	Janbu Fs	
Πλαγιά Παξών	0.35	25°	0.50	Πλαγιά Παξών	< 22° > 22°	0.96 - 2.59 0.87 - 1.00	> 1.03 > 0.99
	1.55		0.66				
	1.90		1.08				
	5.0		1.13				
Πλαγιά Κέρκυρας	1.0	30°	0.84	Πλαγιά Κέρκυρας	< 15° > 15°	1.11 - 1.73 0.63 - 0.84	1.21 - 1.91 0.70 - 0.93
	1.7		1.08				
	5.0		0.76				

Η ανάλυση ευστάθειας με τις μεθόδους των επιμέρους λωριδών (Bishop και Janbu) στην πλαγιά των Παξών έδειξε ότι σε θέσεις όπου η κλίση είναι μικρότερη από 22° τα ιζήματα είναι οριακά ευσταθή έως πολύ ευσταθή (Fs: 0.96-2.59), Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστους" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

ενώ αντίθετα σε περιοχές περισσότερο απότομων κλίσεων (>22°) τα ιζήματα είναι ασταθή (Fs: 0.87-1.0).

Ο έλεγχος της ευστάθειας στην πλαγιά της Κέρκυρας έδειξε ότι τα ιζήματα είναι γενικά ασταθή έως οριακά ευσταθή σε όλα τα πιθανά επίπεδα ολίσθησης (Fs: 0.63-1.0). Εξαιρέση αποτελούν περιοχές όπου οι κλίσεις είναι μικρότερες των 15° όπου η ανάλυση με τις μεθόδους Bishop και Janbu έδειξε ότι τα ιζήματα είναι ευσταθή (Fs: 1.11-1.91).

Ανάλυση ευστάθειας πρηνών σε σεισμό (Πίνακας 4)

Η ανάλυση της ευστάθειας σε δυναμική κατάσταση πραγματοποιήθηκε για όλο το φάσμα των κλίσεων που υπολογίστηκαν στα δύο επιμέρους τμήματα της πλαγιάς που εξετάστηκαν λεπτομερώς.

Ο έλεγχος ευστάθειας στην πλαγιά των Παξίων, με τη μέθοδο του "άπειρου μήκους" πρηνούς, απέδειξε την ιδιαίτερα ασταθή κατάσταση των ανώτερων 35cm της ιζηματογενούς στήλης, πάνω από τον σαπροπηλικό ορίζοντα και γενικότερα των ιζημάτων μέχρι το βάθος των 155cm. Εως το βάθος αυτό τα ιζήματα είναι δυνατό να αποτομήσουν ακόμη και χωρίς την επίδραση σεισμού για κλίσεις μεγαλύτερες από 12°. Οι τιμές του δυναμικού συντελεστή ασφαλείας (F_D) παρουσιάζουν μία αύξηση όσο ελαττώνεται η κλίση του πρηνούς και μία ελαφριά μείωση όσο αυξάνεται το βάθος των πιθανών επιφανειών ολίσθησης κάτω από τον πυθμένα (για βάθη ολίσθησης μεγαλύτερα από 5m).

Οι επιταχύνσεις που απαιτούνται για να προκαλέσουν κατάρρευση του πρηνούς είναι γενικά μικρότερες από αυτή που προτείνεται από τον Ν.Ε.Α.Κ. Μόνο σε τμήματα της πλαγιάς όπου οι κλίσεις είναι περίπου 5° τα ιζήματα παρουσιάζονται ευσταθή έως οριακά ευσταθή σε βάθος 1.9 και 5m αντίστοιχα.

Ο έλεγχος της ευστάθειας με τη μέθοδο Bishop έδειξε ότι τα επιφανειακά ιζήματα είναι ασταθή (F_D : 0.57-0.90), ενώ η μέθοδος Janbu έδειξε ότι τα ιζήματα είναι ασταθή έως ευσταθή (F_D : 0.64-1.26). Όπως είναι φανερό τα πρηνή είναι οριακά ευσταθή στις θέσεις των μικρότερων κλίσεων. Τα βάθη των πιθανών επιπέδων ολίσθησης κυμαίνονται από 5 έως 20m περίπου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4

ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ							
ΜΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΠΡΑΝΕΣ					ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΟΡΙΔΩΝ		
Περιοχές	Βάθος Επιφ. Ολίσθ. (m)	Κλίση (°)	a* (%g)	F_D	Περιοχές	Bishop F_D	Janbu F_D
Πλαγιά Παξίων	0.35	5-25	0.0-4.3	0.31-0.51	Πλαγιά Παξίων	0.57 - 0.90	0.64 - 1.26
	1.55		0.0-6.8	0.40-0.67			
	1.90		1.4-13.5	0.66-1.10			
	5.0		2.4-14.3	0.69-1.15			
Πλαγιά Κέρκυρας	1.0	7-30	0.0-10.1	0.55-0.89	Πλαγιά Κέρκυρας	0.43 - 0.66	0.47 - 0.73
	1.7		0.0-13.1	0.66-1.06			
	5.0		0.0-7.6	0.51-0.83			

a*: μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση σε ευσταθείς συνθήκες

Κατά μήκος της πλαγιάς της Κέρκυρας η τιμή του δυναμικού συντελεστή ασφαλείας κυμαίνεται από 0.43 έως 1.06 και παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές της όσο ελαττώνεται η κλίση του πρηνούς. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, τα πρηνή σε όλα τα πιθανά βάθη ολίσθησης, με εξαίρεση αυτό των 1.7m, είναι δυνατό να ολισθήσουν χωρίς την επίδραση σεισμικής δραστηριότητας σε περιοχές κλίσεων μεγαλύτερων από 20°. Η ανάλυση ευστάθειας έδειξε επιπλέον ότι οι οριζόντιες εδαφικές επιταχύνσεις, οι οποίες απαιτούνται για την κατάρρευση του πρηνούς είναι πολύ μικρότερες (1.3-13.1%g) σε σχέση με τις αντίστοιχες του Ν.Ε.Α.Κ., γεγονός που ενισχύει το χαρακτηρισμό της πλαγιάς ως πλέον ασταθούς.

Το πρηνές της Κέρκυρας είναι ευσταθές μόνο σε θέσεις κλίσεων μικρότερων από 9° και μόνο για το πιθανό βάθος ολίσθησης των 1.7m.

Η ανάλυση με τις μεθόδους Bishop και Janbu έδειξε επιπλέον ότι τα πιθανά επίπεδα ολίσθησης αναπτύσσονται σε σχετικά μεγάλα βάθη κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα (15-20m).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η θαλάσσια γεωλογική έρευνα που εκτελέστηκε στην πλαγιά μεταξύ Κέρκυρας και Παξίων (τμήμα πλαγιάς της Δυτικής Ελλάδας) απέδειξε την (i) ιδιαίτερα πολύπλοκη μορφολογία της περιοχής, η οποία διαμορφώνεται από εναλλαγές χαρσοδοσίων και ενδιάμεσων όψεων που, (ii) παρουσία ποικίλων τύπων βαρυτικών μετακινήσεων, (iii) ύπαρξη "χαρακτηριστικών" οριζόντων (σαπροπηλός, οξειδωμένη ιλύς) στα επι-

φαινομενικά ιζημάτα με ιδιαίτερες γεωτεχνικές ιδιότητες, (iv) ασταθή κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα δύο επιμέρους πρηνή που μελετήθηκαν διεξοδικότερα, υπό δυναμικές αλλά και τοπικά υπό στατικές συνθήκες, για συγκεκριμένες τιμές κλίσεων και (v) εξάπλωση των πιθανών επιφανειών ολίσθησης (σύμφωνα με την ανάλυση ευστάθειας) σε βάθη από 5 έως 20m περίπου κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα.

Η ενστροφή του σαπροπηλού, λόγω των ιδιαίτερων γεωτεχνικών της ιδιοτήτων, αποτελεί ένα ιδανικό επίπεδο για την ανάπτυξη "επιδερμικού" τύπου (επιφανειακής, μικρού πάχους) βαρυτικών ροών όπως διαπιστώθηκε και από την ανάλυση ευστάθειας. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Chassefiere and Monaco (1989), οι οποίοι μελέτησαν της ευστάθεια των ιζημάτων πάνω από σαπροπηλικούς οριζόντες σε βάθη, όμως, 3-5m και 8-12m κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα, για θεωρητικές τιμές κλίσεων, επιταχύνσεων και ενδεικτικών γεωτεχνικών ιδιοτήτων. Στα βάθη αυτά οι αποθέσεις των σαπροπηλών θεωρήθηκε επιπλέον ότι περιβάλλονται από μη διαπερατά αργιλικά στρώματα, με συνέπεια την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων κατά μήκος τους σε περίπτωση δυναμικής φόρτισης.

Η παρουσία του σαπροπηλικού στρώματος σε συνδυασμό με τα φαινόμενα βαρυτικών μετακινήσεων που διαπιστώθηκαν στην πλαγιά των ΝΝΔ-ικών Παξών δηλώνουν ότι (α) η πλαγιά είναι ευσταθής τα τελευταία 7-9 χιλιάδες χρόνια (ηλικία σαπροπηλικού οριζοντα S1) και τα κατολισθητικά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν είναι παλαιότερα και έχουν καλυφθεί από ένα επιφανειακό στρώμα Ολοκαινικής ηλικίας πάχους περίπου 1.5m (το οποίο δεν είναι ευδιάκριτο στις τομογραφίες 3.5kHz λόγω των υψηλών κλίσεων του πυθμένα) ή (β) η ολίσθηση των ιζηματογενών τεμαχών είναι σχετικά σύγχρονη, συνέβη δηλαδή τα τελευταία 7-9 χιλιάδες χρόνια, αλλά δεν εκδηλώθηκε καμία ταυτόχρονη μετακίνηση των χαλαρών επιφανειακών ιζημάτων κατά μήκος του υδαρούς σαπροπηλικού οριζοντα (ελαστικού τύπου μετακίνηση).

Η απουσία του σαπροπηλικού οριζοντα και της υπερχείμνης λιθόφρασης της οξειδωμένης ιλύος από την πλαγιά της Κέρκυρας υποδηλώνει είτε τη δράση κατολισθητικών φαινομένων μετά την απόθεση του σαπροπηλικού στρώματος (νεότερα από 7-9 χιλιάδες χρόνια) αποτέλεσμα των οποίων ήταν η μεταφορά του προς τη λεκάνη είτε ότι οι σαπροπηλοί δεν αποτέθηκαν βορειότερα από το συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος λόγω μη ανάπτυξης στρωματοποίησης της υδάτινης στήλης στην ευρύτερη περιοχή. Η παρουσία όμως σαπροπηλών σε ιζημάτα βορειότερα της Κέρκυρας (Anastasakis and Stanley 1984) δηλώνει ότι ο διαγνωστικός αυτός οριζοντας αποτέθηκε και μεταφέρθηκε υπό τη μορφή βαρυτικών ροών στη φυσιογραφική ενότητα της λεκάνης. Η διάκριση άλλωστε "επισαπροπηλικού" τύπου αποθέσεων στον πυρήνα Π2 στη λεκάνη Κέρκυρας-Παξών επιβεβαιώνει την παραπάνω διεργασία.

Οι κύριες αιτίες που προκαλούν την πυροδότηση κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή έρευνας αποτελούν η σεισμική δραστηριότητα καθώς και η ανάπτυξη υψηλών κλίσεων σε συνδυασμό με την παραλληλία των ιζηματογενών ενστροφών με τη γενική κλίση της πλαγιάς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ANASTASAKIS, G. AND STANLEY, J., (1984). "Sapropels and organic-rich variants in the Mediterranean: sequence development and classification". In: *Fine-grained sediments: Deep-water processes and facies* (Edit. D. Stow and D. Piper), Spec. Pap. Geol. Soc. London, 15: 497-510.
- ANASTASAKIS, G. AND PIPER, D., (1991). "The character of seismo-turbidites in the S-1 sapropel, Zakynthos and Strofadhres basins, Greece". *Sedimentology*, 38: 717-733.
- CHASSEFIERE, B. AND MONACO, A., (1989). "Role of organic matter and particle fabric in mass-physical and geotechnical properties: Implications for undrained slumping in Aegean sea and Ionian sea modern sediments". *Marine Geology*, 87: 165-182.
- PAPAZACHOS, B. AND PAPAACHOU, K., (1989). "The seismicity of Greece". *Ziti Publ.*, Thessaloniki, Greece.