

Αστοχίες Θαλασσιών Πρανών σε Ημι-λιθοποιημένα Εδάφη των Ακτών της Θράκης. Μέρος Α. Μηχανισμοί διάβρωσης και Μορφές Αστοχιών.

Sea Cliffs Failures in Semi-Lithified Soils. Part A. Erosion Mechanisms and Types of Failures.

ΞΕΙΔΑΚΗΣ, Γ.Σ., Αναπληρωτής Καθηγητής Τεχνικής Γεωλογίας, ΔΠΘ, Ξάνθη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία εξετάζονται οι μηχανισμοί διάβρωσης και αστάθειας των θαλασσιών πρανών σε ημι-λιθοποιημένους γεωλογικούς σχηματισμούς με λοφώδες ανάγλυφο στην ακτογραμμή της Θράκης. Από τις επί τόπου παρατηρήσεις προέκυψε ότι το θαλάσσιο περιβάλλον (ανύψωση του επιπέδου της θάλασσας, κυματισμοί, θαλάσσια ρεύματα, κλπ.) είναι υπεύθυνο για τη διάβρωση και αποσταθεροποίηση των θαλασσιών πρανών στα κατώτερα τμήματα αυτών, μέχρι ύψος 2-3 m. Αντίθετα, στα ανώτερα τμήματα των πρανών, το χερσαίο περιβάλλον (βροχοπτώσεις, άνεμοι, ήλιος, άλατα, εξωτερικές φορτίσεις, κ.ά.) συμβάλλουν τα μέγιστα στις αστάθειες αυτών. Η αντοχή του εδάφους αποτελεί επίσης αποφασιστικό παράγοντα στο ρυθμό διάβρωσης των θαλασσιών πρανών.

ABSTRACT

In this paper the mechanisms of erosion and instability in sea cliffs, developed in semi-lithified geological formations in Thrace area, is examined. The field observations and measurements showed that at the lower part of the cliff up to 2-3 m high the sea environment (rise of sea level, waves, longshore currents, etc.) is responsible for sea cliff's erosion, whereas in the upper part of the cliff the terrestrial agents (rainfall, winds, sunlight, external loading, etc.) contribute more in cliff's instability and retreat. Soil strength is also a decisive agent in the rate of sea cliff erosion and retreat

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

.Η ακτογραμμή του Βορείου Αιγαίου έχει γενική διεύθυνση Δύση – Ανατολή και εκτίθεται τόσο σε ισχυρούς Β-ΒΑ, όσο και Ν-ΝΔ ανέμους. Στους τελευταίους μάλιστα ανέμους η ακτογραμμή είναι ιδιαίτερα εκτεθειμένη λόγω του μεγάλου ελευθέρου ανοίγματος της θάλασσας (Fetch), το οποίο φθάνει μέχρι και τα 285 km μήκος περίπου.

Κατά μήκος της ακτογραμμής της ΑΜΘ υπάρχουν: (α) περίπου 100 km βραχώδεις-υψηλές ακτές, (β) 70 km περίπου λοφώδεις-μέσου ύψους ακτές, αποτελούμενες από μικρής ως μέσης αντοχής γεωλογικούς σχηματισμούς, οι οποίοι υφίστανται μέτρια ως έντο-

νη διάβρωση και υποχώρηση και (γ) 110 km περίπου αμμώδεις-χαμηλές ακτές στις οποίες περιλαμβάνονται και τέσσερα δέλτα ποταμών (Στρυμόνα, Νέστου, Φιλιουρή-Λίσου, και Έβρου). Κατά μήκος της ακτογραμμής υπάρχουν ακόμη πολυάριθμες στωματολίμνες (Lagoons) οι περισσότερες από τις οποίες χρησιμοποιούνται ως φυσικά ιχθυοτροφία (Fisheries).

Ολόκληρες οι περιοχές των Δέλτα των ποταμών και των Lagoons (~ 130 km μήκος ακτών), δηλαδή περίπου το ½ της ακτογραμμής του Βορείου αιγαίου, είναι οικολογικά προστατευόμενες από την συνθήκη RAMSAR. Μέσα στην περιοχή αυτή επιτρέπονται μόνο ορισμένες χρήσεις γης (γεωργοκτηνοτροφικές - αλιευτικές).

Στην εργασία αυτή θα επικεντρωθούμε στα γεωτεχνικά προβλήματα (αστάθειες) που εμφανίζονται στα θαλάσσια πρηνή τα οποία σχηματίζονται από τη διάβρωση των ημι-στερεοποιημένων (weakly cemented) γεωλογικών σχηματισμών του λοφώδους αναγλύφου της παράκτιας ζώνης της Θράκης. Με τον όρο ημι-στερεοποιημένοι ή ημι-λιθοποιημένοι σχηματισμοί (weakly cemented soils or soft rocks-hard soils) εννοούμε μίγματα κροκαλών, άμμων, ιλύων και αργίλων, σε διάφορες αναλογίες, συνδεδεμένα με συνδετικό υλικό CaCO_3 , SiO_2 , αργίλους ή μίγματα αυτών. Τα υλικά αυτά έχουν μέτρια ως υψηλή συνοχή.

Ακτές με τα υλικά αυτά απαντούν σε πολλά τμήματα της ελληνικής ακτογραμμής, της οποίας το μήκος υπερβαίνει τα 16.000 km, και σχηματίζουν δεκάδες χιλιόμετρα ακτογραμμής με παρόμοια προβλήματα όπως αυτά που περιγράφονται εδώ για τις ακτές της Θράκης. Πιστεύεται ότι οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα από τη μελέτη των συγκεκριμένων ακτών έχουν εφαρμογή, κατά περίπτωση, σε πρηνή ακτών με παρόμοια γεωλογικά υλικά και ανάλογες περιβαλλοντικές συνθήκες (χερσαίες και θαλάσσιες).

Η εργασία εστιάζεται στις μορφές και τους μηχανισμούς των ασταθειών που εμφανίζονται στα θαλάσσια πρηνή με μεγάλη κλίση (cliffs or Bluffs) σε σχέση με τα υλικά του πρηνούς και του θαλάσσιου περιβάλλοντος (κύματα, ρεύματα, κλπ.).

1.2. Σχηματισμός των θαλασσίων πρηνών μεγάλης κλίσης ή θαλασσίων κρημών (Cliffs).

Ο όρος «θαλάσσιος κρημνός» (Coastal or sea cliff) αναφέρεται σε πρηνή μεγάλης κλίσης ($>70^\circ$) τα οποία σχηματίζονται σε θέσεις όπου μια ανυψωμένη ξηρά συναντά τη θάλασσα. Τέτοια πρηνή απαντούν σε ακτογραμμές ωκεανών, θαλασσών και λιμνών και αποτελούνται συνηθέστερα από ημι-στερεοποιημένους ιζηματογενείς σχηματισμούς. Όταν οι κρημνοί αυτοί αποτελούνται από σχετικά μαλακούς σχηματισμούς (συνεκτικές άμμους) ονομάζονται και bluffs αντί cliffs. Συνήθως όμως οι όροι αυτοί χρησιμοποιούνται εναλλακτικά χωρίς διάκριση. Απαραίτητη προϋπόθεση για το σχηματισμό ενός απότομου πρηνούς (κρημού) είναι η ύπαρξη υπερυψωμένης ξηράς σε επαφή με τη θάλασσα, ανεξάρτητα του υλικού που σχηματίζει του πρηνές.

Η κύρια αιτία σχηματισμού ενός κρημού είναι η διάβρωση του εδάφους είτε από θαλάσσιους είτε από χερσαίους παράγοντες είτε από συνδυασμό των δύο.

Οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στη διάβρωση μιας ακτής δεν έχουν πλήρως διευκρινιστεί μέχρι σήμερα. Οι αιτίες γι' αυτό είναι πολλές όπως: (i) ο μικρός και επεισοδικός ρυθμός αλλαγής της ακτής, (ii) η δυσκολία του υπολογισμού ή της μέτρησης της ενέργειας από το θαλάσσιο περιβάλλον κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας (κύματα, ρεύματα, αιωρούμενο στερεό υλικό), (iii) ο περιορισμένος αριθμός ερευνητών που ασχολούνται με τα θέματα αυτά, (iv) η μικρή χρηματοδότηση των αντιστοίχων ερευνών, (v) το γεγονός ότι οι περισσότερες έρευνες ασχολούνται με τη μελέτη της (αμμώδους) παραλίας (the beach) και της μεταφοράς των υλικών αυτής από μέρος σε μέρος και όχι με τα φαινόμενα διάβρωσης της ακτής. Υπάρχει όμως και η γεωλογική ιστορία μιας ακτής η διευκρίνιση της οποίας είναι συνήθως δύσκολη.

2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΣΕ ΗΜΙ-ΛΙΘΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ (SEA CLIFFS EROSION).

Οι παράγοντες οι οποίοι παίζουν το σπουδαιότερο ρόλο στην διάβρωση των θαλασσίων πρηνών είναι: α. η ανύψωση του επιπέδου της θάλασσας, β. η δράση των κυμάτων και των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής, γ. η λιθολογία (η αντοχή) και η δομή των υλικών του πρηνούς, και δ. οι χερσαίοι παράγοντες (αποσάθρωση, επιφανειακό και υπόγειο νερό, άνεμοι, εξωτερικές φορτίσεις, σεισμοί, προσανατολισμός του πρηνούς ως προς τον ήλιο, κλπ.). Στη συνέχεια θα σχολιαστεί, εν συντομία, η δράση των παραγόντων αυτών.

α. Η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας ως προς την ξηρά είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο οφείλεται είτε στο χερσαίο περιβάλλον (τεκτονικές κινήσεις, συμπύκνωση ιζημάτων, κλπ.), είτε στο θαλάσσιο περιβάλλον: παλίρροιες, ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας της Γής, κ.ά.. Η καθαρή μεταβολή της στάθμης της θάλασσας είναι χωρο- και χρονο-εξαρτώμενη και δύσκολα μπορεί να γίνουν γενικεύσεις. Εντούτοις υπολογίζεται ότι τον τελευταίο αιώνα η καθαρή ανύψωση της θάλασσας είναι της τάξεως του 1-2 mm ανά έτος περίπου, παγκοσμίως. Αυτό σημαίνει ότι

μια χαμηλή, επίπεδη περιοχή μπορεί να κατακλύζεται από τα νερά κατά 1-2 m το χρόνο, δηλαδή με μια αναλογία 1:1000.

Η μεταβολή του επιπέδου της θάλασσας μεταβάλλει τη συχνότητα και τη διάρκεια της επαφής των κυμάτων με τα πρανή της ακτογραμμής, πράγμα που αποτελεί τον πρωταρχικό παράγοντα της διάβρωσης της ακτής και τη δημιουργία απότομων θαλασσίων πρανών (cliffs) (Hampton et al, 2004). Στο Βόρειο Αιγαίο η ανύψωση της θάλασσας τον τελευταίο αιώνα έχει εκτιμηθεί σε 50 cm περίπου. (Μαρουκιάν 1999, Δελημάνη-Ξειδάκης 2005).

β. Θαλάσσιο περιβάλλον. Οι κυριότεροι παράγοντες του θαλασσίου συστήματος που επηρεάζουν τη διάβρωση της ακτής είναι τα θαλάσσια κύματα, οι παλίρροιες, τα θαλάσσια ρεύματα κατά μήκος της ακτής, ο βαθμός κορεσμού του νερού σε ιζήματα, και η μορφολογία του θαλασσίου βυθού κοντά στην ακτή.

β₁. Δράση κυμάτων: Η δράση των κυμάτων εξαρτάται από τη σχέση βάθους του νερού στον πόδα του πρανού και του πλάτους (ύψους) των κυματισμών που πλήττουν το πρανές. Διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις: i. την περίπτωση των μη θραυομένων - ανακλωμένων κυματισμών (nonbreaking or pulsating waves), ii. την περίπτωση των θραυομένων πάνω στο πρανές κυματισμών (impulsive breaking or impact waves) και iii. την περίπτωση των κυματισμών που φθάνουν στο πρανές μετά τη θραύση τους (broken waves).

i. Ανακλώμενοι στο πρανές κυματισμοί. Στην πρώτη περίπτωση των μη θραυομένων ή ανακλωμένων κυματισμών ο πόδας του πρανού πρέπει να είναι μονίμως βυθισμένος στο νερό. Τα κύματα, αν το πρανές είναι κατακόρυφο, ανακλώνται πάνω στο πρανές, επιστρέφουν στη θάλασσα, συμβάλουν με προσερχόμενα κύματα και δίνουν στάσιμα κύματα πλάτους $H' = H(1+C_R)/2$ (παφλασμός, pulsating). Όπου H πλάτος (ύψος) του προσπίπτοντος κύματος, $H' =$ πλάτος στάσιμου κύματος και C_R συντελεστής ανάκλασης. Ο C_R εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας ανάκλασης και είναι συνήθως $0,8 \leq C_R \leq 1,0$. Στην περίπτωση αυτή μια πρώτη εκτίμηση της μέσης πίεσης που ασκεί το κύμα στο κατακόρυφο πρανές δίδεται από τη σχέση $P_{av} = k\rho gH$ (Hiroi 1919, see Allsop 1999, p 4.9). Ο συντελεστής k κυμαίνεται από 0.8 μέχρι 2.0 και εξαρτάται από τον λόγο πλάτος κύματος δια βάθος νερού στον πόδα του πρανού (H/d) και άλλους παράγοντες. Όταν

το πρανές είναι κεκλιμένο το κύμα αναρριχάται πάνω στο πρανές και τα φαινόμενα είναι πιο πολύπλοκα διότι αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής (συρτική δύναμη), υποπίεσεις στο έδαφος, κλπ.

ii. Κυματισμοί θραυόμενοι πάνω στο πρανές. Όταν το κύμα θραύεται πάνω σε ένα πρανές με μεγάλη κλίση (impact waves), οι πιέσεις που ασκούνται είναι πολύ μεγαλύτερες. Ο συντελεστής k λαμβάνει τιμές ίσες ή και μεγαλύτερες του 40 ($k \geq 40$) οπότε $P_{ipmact} \geq 40\rho gH$. Έχουν μετρηθεί τιμές k μέχρι και 100 ($k=100$) σε κατακόρυφους κρηπιδοτόχους ή τάσεις ≥ 600 kPa (see Allsop 1999 p. 4.8 και 4.22). Η υψηλές αυτές πιέσεις πιστεύεται ότι οφείλονται σε ένα θύλακα αέρα ο οποίος εγκλωβίζεται μεταξύ του μετώπου του κύματος και του τοίχου/πρανού τη στιγμή που θραύεται το κύμα. Ο αέρας αυτός είναι δυνατόν να έχει μια κρουστική φόρτιση που διαρκεί μεν κλάσματα του δευτερολέπτου αλλά έχει πολύ ισχυρή ένταση. Είναι αυτός που διανοίγει και διευρύνει τις προϋπάρχουσες ρωγμές στο πέτρωμα και δημιουργεί τις υποσκαφές, τις σπηλαιώσεις και τις καταπτώσεις τεμαχίων των πετρωμάτων στην ακτογραμμή (Φωτος 1-5). Κατά την υποχώρηση του νερού ο αέρας αυτός εκτονώνεται απότομα προκαλώντας εφελκυστηκές τάσεις στο πέτρωμα του πρανού και την απομάκρυνση τεμαχίων του πετρώματος (διάβρωση). Η κατάσταση αυτή είναι σπάνια αλλά πολύ επικίνδυνη όχι μόνο για τα πρανή αλλά και για τα θαλάσσια έργα. Εμφανίζεται συνήθως στη διάρκεια ισχυρών καταιγίδων (Κουτίτας 1984, σελ. 209).

iii. Κυματισμοί θραυόμενοι πριν από το πρανές. Αν η θραύση των κυματισμών δεν γίνεται πάνω στο πρανές αλλά σε κάποια απόσταση πριν από αυτό, λόγω μικρού βάθους της θάλασσας ή την ύπαρξη παραλίας μεγάλου εύρους, οι πιέσεις που εξασκούνται στο πρανές είναι σχετικά μικρές, μικρότερες του 0,25 της πίεσης του ανακλώμενου κύματος. Η πίεση αυτή εκτιμάται από τη σχέση $P_{(max)broken} = (1/2) \lambda \rho T g h_b$, όπου λ συντελεστής αερισμού του νερού κατά τη θραύση. Ο συντελεστής λ εξαρτάται από την κλίση και την τραχύτητα του πυθμένα της θάλασσας και παίρνει τιμές από $\lambda=0.3$ για πολύ τραχείς, βραχώδεις πυθμένες με κλίση 1:50 – 1:100, μέχρι και $\lambda=1,5$ για λείους πυθμένες, με μικρή κλίση $<1:10$, ρ πυκνότητα νερού, T μέγιστη περίοδος κυματοσυρμού, h_b βάθος πυθμένα στη θέση θραύσης του κύματος, H_b , ύψος θραυομένου κύματος. Στην περίπτωση αυτή

η μεγαλύτερη ζημιά στο πρανές προέρχεται από το στερεό φορτίο (άμμος, χαλίκια) που μεταφέρεται από το θραυσμένο κύμα και εκτοξεύεται στο πρανές (surge, bore).

Σύμφωνα με τα παραπάνω αν ένα κύμα ύψους π.χ. $H=3$ m ανακλασθεί πάνω στο πρανές θα ασκήσει μια δυναμική πίεση της τάξεως των 60 kPa, αν το ίδιο κύμα θραυστεί πάνω στο πρανές θα ασκήσει πίεση της τάξεως των 2400 kPa ή και μεγαλύτερη, και αν το ίδιο κύμα θραυστεί πριν φθάσει το πρανές θα ασκήσει στο πρανές πίεση της τάξεως των 15 kPa ή και μικρότερη. Από το αριθμητικό αυτό παράδειγμα φαίνεται η σημασία της θραύσης των κυμάτων πάνω στο πρανές.

Ανάλογα με το αν τα κύματα ανακλώνται στην ακτή (στο πρανές) ή όχι οι ακτές διακρίνονται σε *ακτές ανάκλασης της κυματικής ενέργειας* (reflective beaches) και σε *ακτές σκέδασης ή απορρόφησης της κυματικής ενέργειας* (dissipative beaches). Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται ακτές με μηδενική ή μικρή (3-5 m) (αμμώδη) παραλία και στη δεύτερη ακτές με εκτεταμένες (αμμώδεις) παραλίες (πλάτος >10m), μικρής συνήθως κλίσης. Στις παραλίες αυτές τα κύματα θραύονται σε μεγάλη απόσταση από την ακτογραμμή (ζώνη θραύσεως, beaker) και το νερό αναρριχάται (surges, surf zone, bores) μέχρι την ακτή. Στην περίπτωση αυτή ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας των κυμάτων καταναλίσκεται «απορροφάται» στη τύρβη και στις τριβές του νερού με τον πυθμένα κατά την αναρρίχηση (surf zone). Πολλές φορές μάλιστα το νερό δεν φθάνει μέχρι την ακτογραμμή. Αυτό εξαρτάται από το ύψος κύματος της ανοικτής θάλασσας και την κλίση της (αμμώδους) ακτής.

Η διάκριση μεταξύ ακτών ανάκλασης (reflective beaches) και ακτών απορρόφησης (dissipative beaches) κυματικής ενέργειας γίνεται με τον λεγόμενο αριθμό Iribarren (ξ_0) ο οποίος δίνεται από τη σχέση (Battjes 1974, in Collins 2004, p.111):

$$\xi_0 = \tan \beta / \sqrt{H_s / L_0}, \text{ όπου } L_0 = (g / 2\pi) T_s^2$$

όπου β μέση γωνία κλίσης της ακτής (από τη θέση θραύσης των κυματισμών μέχρι την ακτογραμμή), H_s , T_s και L_0 , ύψος (πλάτος), περίοδος και μήκος κύματος των κυματισμών ανοικτής θάλασσας. H_s/L_0 καμπυλότητα κύματος (wave steepness). Για τιμές του ξ_0 μεγαλύτερες της μονάδας ($\xi_0 > 1,0$) έχουμε ακτές ανάκλασης κυματικής ενέργειας - κυμάτων (reflective breakers, r. beaches), με θραυόμε-

νους (collapsing) ή/και αναρριχόμενους (surging) κυματισμούς (bores), ενώ για τιμές ξ_0 μικρότερες της μονάδας ($\xi_0 < 1,0$) έχουμε ακτές απορρόφησης κυματικής ενέργειας (dissipative breakers - beaches), με ολισθαίνοντες (spilling) και καταδυόμενους (plunging) κυματισμούς.

Επίσης οι ακτές διακρίνονται ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου (ε) της ζώνης θραύσης (surf-scaling parameter (Guza and Inman 1975 in Collins 2004).

$$\varepsilon = H_b \omega^2 / g \tan^2 \beta, \text{ όπου } \omega = 2\pi / T_s$$

όπου H_b πλάτος (ύψος) κύματος την ώρα της θραύσης (breaker amplitude), T_s περίοδος κύματος και β κλίση ακτής.

Για τιμές $\omega < 1,0$ έχουμε δημιουργία στάσιμων κυμάτων. Για τιμές $1,0 \leq \omega \leq 2,0$ έχουμε ανάκλαση ή θραύση κυμάτων στο πρανές και για τιμές $\omega > 2,0$ έχουμε θραύση κυμάτων πριν από την ακτογραμμή (σκέδαση ενέργειας, energy dissipation). Όσο μεγαλύτερο είναι το, (ε), τόσο πιο πολλή κυματική ενέργεια σκεδάζεται-απορροφάται από την ακτή.

Η υπό εξέταση ακτή έχει $H_0/L_0 = 0,142$, $\tan \beta = 1/100$, οπότε $\xi_0 = 0,0265$ (βλ. Κουτίτας 1984, σελ. 30). Σύμφωνα με την τιμή αυτή του ξ_0 η ακτή στη θέση αυτή είναι ισχυρά απορροφητική (highly dissipative), δηλαδή προκαλεί μεγάλη απορρόφηση της κυματικής ενέργειας.

β_2 . Σχέση κυμάτων και ασταθειών στα πρανή. Από παρατηρήσεις και μετρήσεις, δικές μας και άλλων ερευνητών, τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο, φαίνεται ότι το μέγεθος της διάβρωσης σε ένα πρανές από τα κύματα (the wave – induced erosion) είναι συνάρτηση της κυματικής ενέργειας που επιβάλλεται στο πρανές από τα κύματα. Οι μηχανισμοί της δράσης των κυμάτων στο πρανές μπορεί να χωριστούν σε δύο ομάδες: α. στην αθροιστική υδραυλική δράση η οποία σχετίζεται με τη θραύση των κυμάτων, τον ψεκασμό του νερού (water spray) και τη μεγάλη ταχύτητα με την οποία τα υδροσταγονίδια κτυπούν το πρανές και β. στα τυρβώδη υδάτινα ρεύματα που σχηματίζονται μετά τη θραύση των κυμάτων (bores), πριν από το πρανές, και τα οποία παρασύρουν κροκάλες, χαλίκια και άμμο από τον πυθμένα της θάλασσας και την ακτή με τα οποία κτυπούν τα πρανή (αμμοβολή). Οι υδραυλικές δυνάμεις που επιβάλλονται στο πρανές περιλαμβάνουν θλιπτικές,

εφελκύστηκες και διατμητικές δράσεις οι οποίες σε συνδυασμό προκαλούν την εκσκαφή του πρανούς. Η απ' ευθείας μηχανική δράση περιλαμβάνει εκτριβή (abrasion) του εδάφους και κρουστικές τάσεις προκαλούμενες από το στερεό φορτίο (χαλίκια, άμμος, κλπ.) που μεταφέρεται από το νερό και συγκρούεται με το πρανές.

Η δυναμική φόρτιση είναι γνωστό ότι μειώνει του αντοχή του υλικού του πρανούς (κόπωση) και προκαλεί παραμορφώσεις στο εσωτερικό της βραχώμαζας. Στην περίπτωση μιας ρωγματωμένης βραχώμαζας οι μεταβαλλόμενες τάσεις προκαλούν την μόνιμη μετατόπιση των επιφανειακών τεμαχίων του πετρώματος.

Οι εξωτερικές τάσεις εξισορροπούνται από επαγόμενες (induced) αντιδράσεις του πετρώματος του πρανούς. Όταν οι εξωτερικές δράσεις υπερβούν τις αντιστάσεις αυτές το πέτρωμα παραμορφώνεται πλαστικά ή θραύεται. Από πλευράς μηχανικής της θραύσης αναπτύσσονται μεν αντιδράσεις στις επιβαλλόμενες εξωτερικές δυνάμεις από το υλικό του πετρώματος αλλά δεν υπάρχουν δυνάμεις αντίδρασης. Αυτό σημαίνει ότι όταν παύσει η δράση των εξωτερικών δυνάμεων εξαφανίζονται και οι αντιδράσεις στο πέτρωμα και παραμένουν μόνο οι μη αναστρέψιμες παραμορφώσεις και οι τυχόν θραύσεις στο πέτρωμα (Φωτος 1-5)

γ. Λιθολογία και χερσαίοι παράγοντες.

Άλλοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την διάβρωση των θαλασσίων πρανών είναι:

- η αντοχή του εδάφους του πρανούς. Ο παράγων αυτός καθορίζει τη διαβρωσιμότητα του εδάφους και έχει αποδειχθεί τελευταία, από παρατηρήσεις και μετρήσεις υπαίθρου, ότι είναι πιο σημαντικός και από την ενέργεια του θαλασσίου περιβάλλοντος, κυρίως στα υψηλότερα τμήματα του πρανούς (Collins, 2004, Manson, 2002, Benumof et al 2000, Belov et al 1999, Sunamura, 1992, Arkin and Michaeli, 1985, Carter and Guy, 1988, etc.).

- το νερό (επιφανειακό και υπόγειο). Η επιφανειακή απορροή και η κρούση των σταγόνων της βροχής προκαλεί χαλάρωση των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους, διάβρωση και δημιουργία αυλακώσεων οι οποίες μπορεί να εξελιχθούν σε χαραδρώσεις και αστάθειες. Το υπόγειο νερό έχει φυσικές και χημικές επιδράσεις στο έδαφος, όπως υπόγεια διάβρωση και διασωλήνωση (sapping and riping), διεύρυνση των ρωγμών, πίεση πόρων, αύξηση του βάρους του εδάφους,

χημική αντίδραση και διάλυση του υλικού σύνδεσης των κόκκων. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω τήξης και πήξης του νερού καθώς και κρυστάλλωσης των αλάτων στους πόρους και στις ρωγμές του εδάφους προκαλεί χαλάρωση του ιστού του εδάφους και δημιουργία ή διάνοιξη ρωγμών. Σημειώνεται π.χ. ότι η πίεση κρυστάλλωσης του NaCl είναι 200 MPa, ενώ η εφελκυστική αντοχή ενός σκληρού εδάφους είναι μικρότερη του 0,1 MPa. (Bell 1999, p, 374, Johannssen et al 1982). Η ανακυκλούμενη ύγρανση-ξήρανση του εδάφους και η κρυστάλλωση των αλάτων σε αυτό χαλαρώνουν το εξωτερικό στρώμα του εδάφους, πάχους μερικών εκατοστών, ειδικά αν υπάρχουν και διογκούμενα ορυκτά, δημιουργούν μικρορωγματώσεις (fissuring) οι οποίες επιτρέπουν την βαθύτερη εισχώρηση του νερού, την αποφλοίωση (slaking) του εδάφους και τη δημιουργία πρισματικών τεμαχίων (blocks) τα οποία αποχωρίζονται και πέφτουν με τη βαρύτητα (Φωτος 7-12).

- Ο προσανατολισμός του πρανούς ως προς τον ήλιο επηρεάζει την κατανομή της θερμότητας στο έδαφος και δημιουργεί διαφορές θερμοκρασίας και συστολο-διαστολής μεταξύ επιφανειακών και εσωτερικών στρωμάτων. Η διαδικασία επιτείνεται από τις διαφορές στην θερμική αγωγιμότητα των στρωμάτων του εδάφους. Όλα αυτά συνεπάγονται την αποσάθρωση και μείωση της αντοχής του εδάφους.

- Η δράση εξωτερικών δυνάμεων όπως σεισμοί και άλλες δονήσεις, επιφορτίσεις, κλπ. Οι δονήσεις γενικά μειώνουν την αντοχή του εδάφους και το καθιστούν περισσότερο ευάλωτο σε διαβρώσεις και αστάθειες. Έχει παρατηρηθεί ότι, υπό την επίδραση δονήσεων (σεισμών), τα πρανή με μεγάλη κλίση (>70°) αστοχούν με εφελκυσμό, δηλαδή σχηματισμό ρωγμών εφελκυσμού, αποχωρισμό και ανατροπή τεμαχίων από το επάνω τμήμα του πρανούς, ενώ πρανή με μέση κλίση (<70°) αστοχούν με ολίσθηση, με επιφάνεια ολίσθησης περίπου παράλληλη της επιφάνειας του πρανούς. Οι ολισθήσεις αυτές είναι συνήθως αβαθείς, βάθους 2-5 m, και ξεκινούν από την κορυφή του πρανούς. (Ashford et al 1997, Sunamura, 1992; Hampton et al. 2004, Collins 2004, Belov, et al 1999, etc.)

3. ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.

Αν και έχουν γίνει αρκετά βήματα στη μέτρηση των δυνάμεων που επιβάλλονται από το θαλάσσιο περιβάλλον και τα χαλίκια της

ακτής στα πρηνή, πολύ μικρή πρόοδος έχει παρουσιαστεί στη σύγχρονη μέτρηση:

- της δύναμης που επιβάλλουν τα κύματα,
- της αντίστασης του εδάφους στη διάβρωση, και

- της διάβρωσης (υποχώρησης) που υφίσταται τελικά το έδαφος.

Αυτό οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, στο εξαιρετικά αφιλόξενο περιβάλλον που επικρατεί, την περίοδο των έντονων γεγονότων (καταιγίδες) που είναι και τα πλέον σημαντικά.

Φυσικά και μαθηματικά ομοιώματα έδειξαν τη σημασία που έχει η υποσκαφή του πρηνούς από τα κύματα και η δημιουργία εγκοπής (notch) στη βάση του πρηνούς για την ευστάθεια του. (Sunamura, 1992, Williams and Roberts 1995, Collins, 2004, etc.)

Ο Sunamura, (1992), πειραματιζόμενος σε φυσικό ομοίωμα (Model), έδειξε ότι: ο ρυθμός εκσκαφής της εγκοπής (notch) στην βάση ενός πρηνούς από τα κύματα είναι συνάρτηση της ενέργειας των κυμάτων στη βάση του πρηνούς, της αντίστασης του εδάφους στη διάβρωση, που εκφράζεται με την αντοχή του, και της δύναμης εκτριβής (abrasive action) των ιζημάτων της ακτής.

Η μαθηματική σχέση που πρότεινε ο Sunamura, (1992), είναι:

$$X = f(F_w, S_c, t) = k[c + (\rho g H) / S_c]$$

όπου, X = ρυθμός εκσκαφής του εδάφους, F_w = δύναμη κρούσης των κυμάτων επί του πρηνούς, S_c = αντίσταση (αντοχή) του εδάφους, t = χρόνος επενέργειας των κυμάτων, k και c = σταθερές, ρ = πυκνότητα νερού, g = επιτάχυνση της βαρύτητας και H = ύψος κύματος στη βάση του πρηνούς.

Αν και τα πειράματα του Sunamura απλοποιούσαν αρκετά τα πραγματικά γεγονότα στη Φύση, εντούτοις οι παρατηρήσεις στο ύπαιθρο δείχνουν να συμφωνούν, σε γενικές γραμμές, με τα αποτελέσματά του. Ο Sunamura θεώρησε ότι η αντοχή του εδάφους και η ενέργεια των κυμάτων συνεισφέρουν ισότιμα στην διάβρωση του εδάφους, ενώ οι Benumof, et al, (2000), από παρατηρήσεις σε φυσικά πρηνή, συμπέραναν ότι η λιθολογία και η αντοχή του υλικού του πρηνούς φαίνεται να έχουν πιο βαρύνουσα σημασία στη διάβρωση του πρηνούς από ότι η ενέργεια των κυμάτων. Άλλοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι το ποιος παράγοντας υπερτερεί εξαρτάται από τη θέση της εξεταζόμενης περιοχής στο πρηνές. Σε άλλες θέσεις μπορεί υπερτερεί η

δράση των κυμάτων και σε άλλες η αντοχή του υλικού. Πάντως ένα είναι βέβαιο ότι χωρίς την δράση των κυμάτων ο ρυθμός διάβρωσης του πρηνούς θα είναι πολύ μικρότερος.

Πρέπει να τονιστεί ότι και η δράση των ιζημάτων της ακτής (άμμου, χαλικιών, κλπ.), τα οποία εκτοξεύονται από τα κύματα κατά του πρηνούς, είναι πολύ σημαντικός και μπορεί να αυξήσει το ρυθμό διάβρωσης μέχρι και 20 φορές.

Εκτός από τον Sunamura έχουν προταθεί κατά καιρούς και άλλα μαθηματικά ομοιώματα για την πρόβλεψη του ρυθμού διάβρωσης χωρίς όμως καλύτερα αποτελέσματα (Belon et al, 1999)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΑΤΑ

- Τα 70 km περίπου της ακτογραμμής της Θράκης αναπτύσσονται σε ημιλιθοποιημένους γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι διαβρώνονται και υποχωρούν. Οι ακτές αυτές αποτελούν περιοχές με σύγχρονη ή μελλοντική τουριστική ανάπτυξη και έχουν μεγάλη σημασία για την ανάπτυξη της περιοχής.

- Οι κυριότεροι μηχανισμοί διάβρωσης και υποχώρησης των θαλασσίων πρηνών σε ημιλιθοποιημένους σχηματισμούς είναι:

- α. Υποσκαφή και μικροαστάθειες στα κατώτερα τμήματα του πρηνούς από τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα, όγκου <1-2 m³

- β. Εφαλκυστικές ρωγματώσεις και αστάθειες με τη μορφή ανατροπών τεμαχίων εδάφους, ολισθήσεων φακοειδών τμημάτων και πλακών, από το μέτωπο και την κορυφή του πρηνούς συνεπεία της δράσης χειρσαίων, κυρίως, παραγόντων (βροχοπτώσεις, άνεμοι, ήλιος, κρυστάλλωση αλάτων, εξωτερικές φορτίσεις, κλπ.)

- Η αντοχή του εδάφους είναι αποφασιστικής σημασίας στον ρυθμό διάβρωσης των θαλασσίων πρηνών

- α. Όταν η αντοχή του εδάφους είναι μικρή (<150 kPa) οι αστάθειες επηρεάζουν, συνήθως, ολόκληρο το μέτωπο του πρηνούς, ενώ

- β. Όταν η αντοχή του εδάφους είναι μεγάλη (>150 kPa) επηρεάζεται μικρό μόνο τμήμα του πρηνούς, τοπικά, και ο όγκος των ασταθών υλικών δεν υπερβαίνει το 1-2 m³.

- Στη επίδραση του θαλασσίου περιβάλλοντος μεγάλη σημασία έχει η διάρκεια που το πρηνές ευρίσκεται σε επαφή με το θαλάσσιο νερό.

- Τη μεγαλύτερη φθορά στα πρηνή προκαλούν οι κυματισμοί που θραύονται πάνω στο πρηνές και το στερεό φορτίο που μετα-

φέρουν τα κύματα και εκτοξεύουν προς το πρανές.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (βλέπε Μέρος Β)



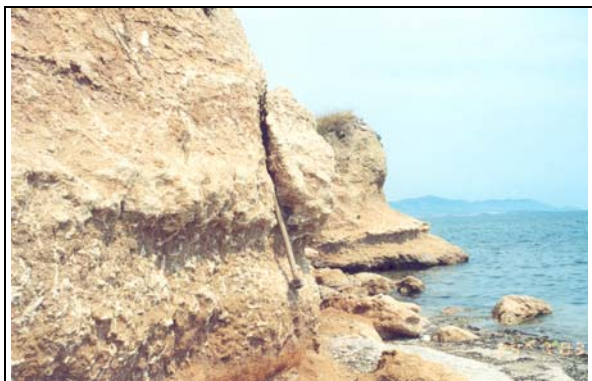
Φωτο. 1. Υποσκαφή πρανούς από τα κύματα και καταπτώσεις
Photo 1. Cliff undercut and block falls



Φωτο 2. Υποσκαφή πρανούς και αστοχία ολόκληρου του πρανούς. Διακρίνονται τα επίπεδα αποχωρισμού των πλακών των εδάφους. Εδάφη χαμηλής αντοχής
Photo 2. Cliff undercut and failure of the whole slope. Soils of low strength



Φωτο 3. Αποκόλληση και πτώση τεμαχών από το μέτωπο του πρανούς λόγω υποσκαφής, εφελκυσμού και ρωγμάτωσης.
Photo. Block detachment and fall due to undercut and tension cracks opening.



Φωτο 4. Αποκόλληση και πτώση τεμαχών από το μέτωπο του πρανούς λόγω υποσκαφής, εφελκυσμού και ρωγμάτωσης.
Photo 4. Block detachment and fall from the slope face due to undercut and tension cracks.



Φωτο 5. Αστοχία όλου του πρανούς λόγω ισχυρού κυματισμού σε σχετικά χαλαρές αποθέσεις.
Photo 5. Failure of the whole cliff face in relatively loose deposits due to high waves.



Φωτο 6. Αστοχία ολόκληρου του πρανούς από συνδυασμό ρωγμών εφελκυσμού, υποσκαφής και διάτμησης του εδάφους
Photo 6. Failure of the whole cliff face due to a combination of tension cracks, undercut and shearing



Φωτο 7 Ρωγμές εφελκυσμού στην κορυφή του πρανούς
Photo 7. Tension cracks on the crest of the cliff.



Φωτο 8. Ρωγμή εφελκυσμού στο μέτωπο του πρανούς.
Photo 8. Tension crack on the face of the cliff



Φωτο 9. Μικρορωγμές στην επιφάνεια του πρανούς από την ξήρανση του εδάφους και τη δράση των αλάτων
Photo 9. surface cracks due to dryness and salt crystallization



Φωτο 10. Συγκέντρωση αλάτων στην επιφάνεια του πρανούς.
Photo 10. Salt concentration on the surface of the cliff



Φωτο 11. Διεύρυνση των ρωγμών στη βάση του πρανούς από τους κυματισμούς
Photo 11. Widening of cracks from the waves action at the base of cliff



Φωτο 12. Ρωγμή εφελκυσμού στην κορυφή του πρανούς. Το τέμαχος ανατράπηκε με τις πρώτες βροχές
Photo 12. Tension crack on the top of the cliff. The block toppled down in the first rain