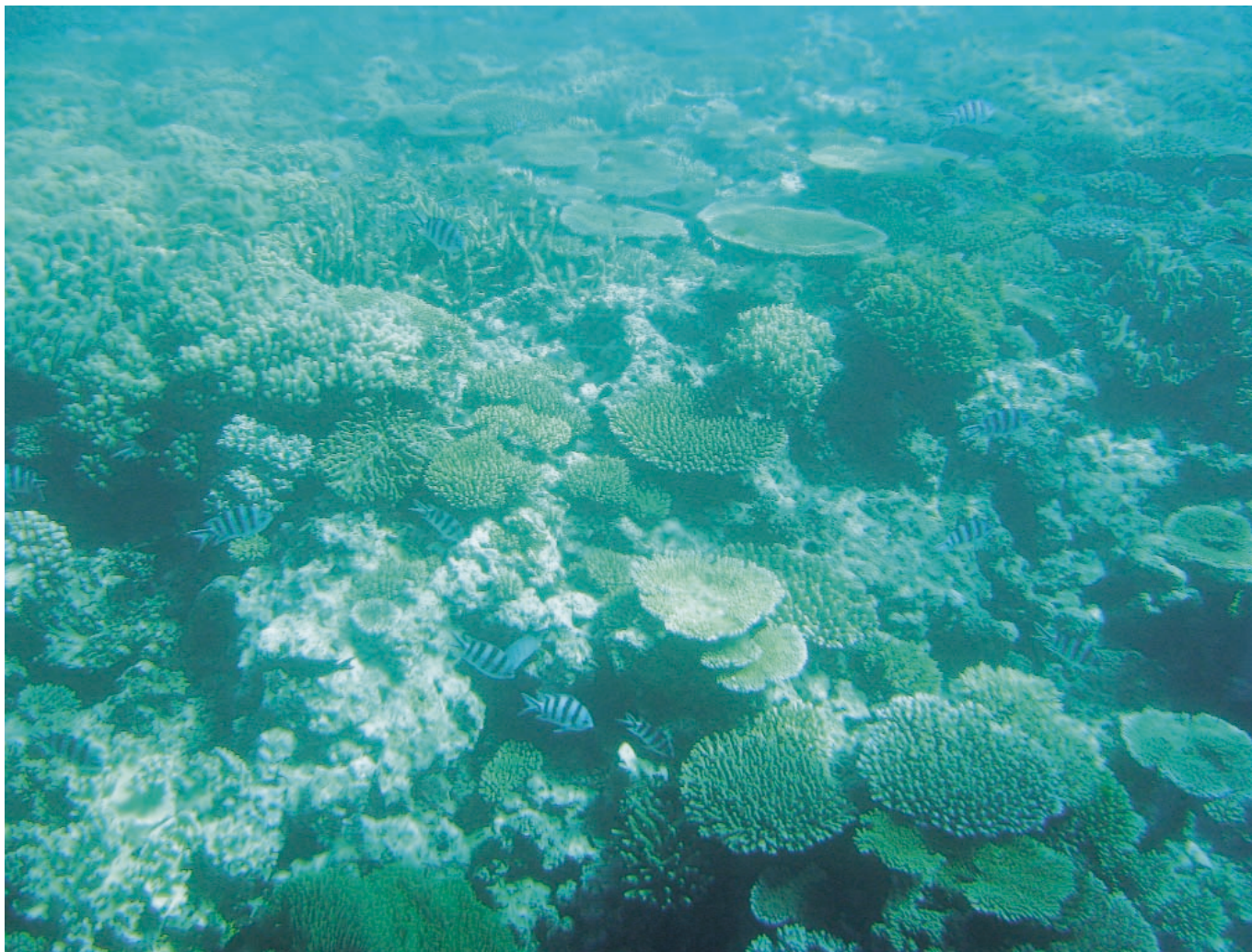


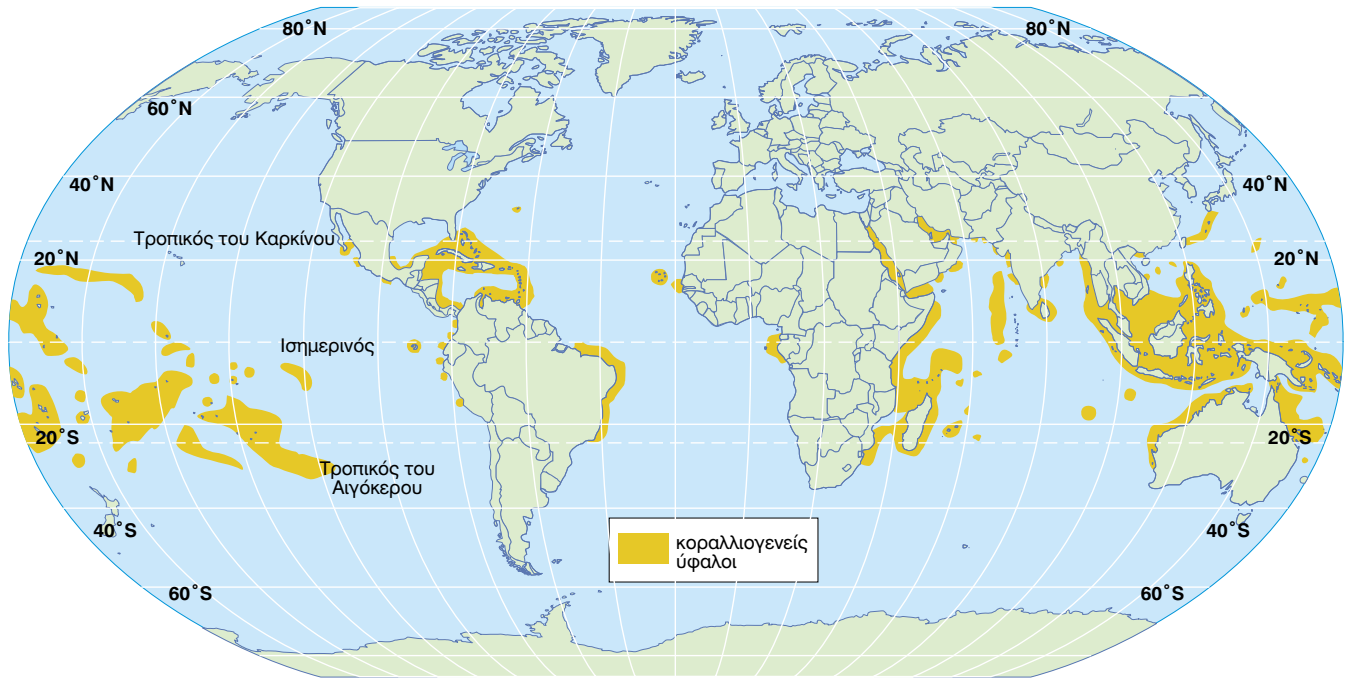
12.1 Συνθήκες ανάπτυξης των κοραλλιών

Η ανάπτυξη των κοραλλιών και των φυκών στους τροπικούς ωκεανούς οδηγεί στο σχηματισμό ακτών που κυριαρχούνται από την παρουσία κοραλλιογενών υφάλων. Ύφαλος είναι ένα βραχώδες υποθαλάσσιο ύψωμα η κορυφή του οποίου βρίσκεται κοντά στο επίπεδο της θαλάσσιας στάθμης. Ένας ύφαλος συνήθως αποτελείται από ανόργανα πετρώματα. Σε περιοχές όμως κατάλληλων συνθηκών υπάρχουν ύφαλοι που έχουν σχηματισθεί από τα υπολείμματα μιας μεγάλης ποικιλίας θαλάσσιων οργανισμών, όπως είναι τα σκελετικά στοιχεία κοραλλιών και τα ανθρακικά κελύφη. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας των κοραλλιογενών υφάλων αποτελείται από

βιογενή ασβεστόλιθο νεκρών κοραλλιών και μόνο ένα λεπτό στρώματιδιο στην επιφάνεια συντηρεί ζωντανά κοράλλια (φωτο 12.1). Αυτός ο βιογενούς προέλευσης ασβεστόλιθος έχει δημιουργηθεί από τη δραστηριότητα μικρών ζωικών οργανισμών που ονομάζονται πολύποδα (polyps). Οι μικροοργανισμοί αυτοί χτίζουν λεπτές εύθραυστες ασβεστολιθικές δομές που γίνονται η αποικία των κοραλλιών. Σημαντική είναι και η δραστηριότητα μικροσκοπικών φυκών που συγκολλούν τις λεπτές δομές των κοραλλιών σε μια σκληρή ασβεστολιθική επιφάνεια. Η περιεκτικότητα των κοραλλιογενών υφάλων σε ανθρακικό ασβέστιο είναι δυνατόν να φτάσει το 99%, ενώ οι ρυθμοί αύξησης του σκελετού των κοραλλιών κυμαίνονται από 18 έως 33 mm/έτος.



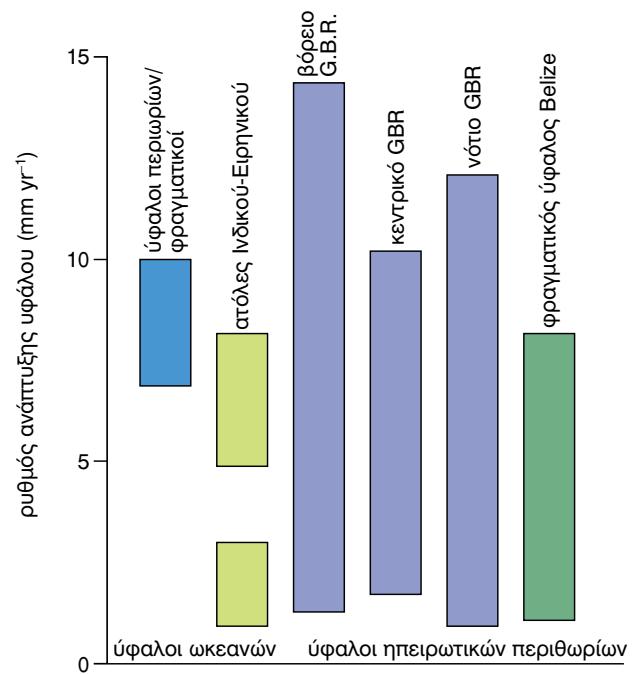
Φωτο 12.1 Κοράλλια στην επιφάνεια του μεγαλύτερου στον κόσμο κοραλλιογενούς υφάλου Great Barrier Reef στα ανοιχτά του Cairns, Queensland, Australia.



Σχήμα 12.1 Παγκόσμια γεωγραφική κατανομή των κοραλλιογενών υφάλων (coral reefs). (τροποποιημένο από McKnight & Hess, 2000)

Η γεωγραφική κατανομή των κοραλλιογενών υφάλων στον πλανήτη καθορίζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που απαιτούνται για την ανάπτυξη των κοραλλιών (σχήμα 12.1). Εξαιτίας του περιορισμένου εύρους θερμοκρασιών στις οποίες τα κοράλλια μπορούν να επιβιώσουν οι κοραλλιογενείς ύφαλοι αναπτύσσονται αποκλειστικά σε νερά τροπικών ωκεανών. Η ελάχιστη θερμοκρασία νερού που απαιτείται είναι περίπου 18 - 20°C ακόμη και κατά τη διάρκεια του χειμώνα ενώ η μεγαλύτερη ανάπτυξή τους παρατηρείται σε νερά θερμοκρασιών μεταξύ 25°C και 30°C. Ο περιορισμός αυτός στη θερμοκρασία του νερού έχει σαν αποτέλεσμα οι κοραλλιογενείς ύφαλοι να παρουσιάζουν τη μέγιστη ανάπτυξή τους σε παράκτιες περιοχές που βρίσκονται μεταξύ 30° Βόρειου και 25° Νότιου γεωγραφικού πλάτους (σχήμα 12.1).

Εκτός από τη θερμοκρασία των νερών, καθοριστικό για την ανάπτυξη των κοραλλιών είναι και το βάθος. Τα ρηχά νερά, βάθους όχι μεγαλύτερου από 60 – 90 m, επιτρέπουν τη διείσδυση του ηλιακού φωτός και συνεπώς ευνοούν την ανάπτυξη των κοραλλιών. Ιδανικότερο βάθος θεωρείται αυτό των 20 m ενώ επιπλέον απαιτείται καθαρό, απαλλαγμένο από ιζημα, ωκεάνιο νερό φυσιολογικών συνθηκών αλατότητας και μέτριας κινητικότητας. Επίσης είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός σταθερού υπόβαθρου πάνω στο οποίο να μπορούν να εγκατασταθούν τα κοράλλια. Όπως αναφέρθηκε, η ανάπτυξη των κοραλλιών επηρεάζεται αρνητικά από την περιεκτικότητα του νερού σε ιζημα. Η αυξημένη στερεοπαροχή αφενός θολώνει το νερό περιορίζοντας τη διείσδυση του ηλιακού φωτός σε βάθος και αφετέρου η απόθεση των ιζημάτων πάνω στον ύφαλο έχει



Σχήμα 12.2 Ρυθμοί ανάπτυξης των κοραλλιογενών υφάλων βασισμένοι σε ραδιοχρονολογήσεις δειγμάτων από πυρήνες γεωτρήσεων. G.B.R.: Great Barrier Reef. (πηγή δεδομένων: Masselink & Hughes, 2003)

σαν αποτέλεσμα τη σχετική παύση της ανάπτυξης των κοραλλιών. Η αύξηση των κοραλλιών αναχαιτίζεται επιπλέον από την αραίωση του θαλάσσιου νερού από το γλυκό νερό στις εκβολές των ποταμών. Η παρουσία μεγάλης ποσότητας ιζημάτων που μεταφέρονται μέσω

των μεγάλων ποτάμιων συστημάτων που εκβάλουν στις τροπικές ακτές του Ατλαντικού ωκεανού καθώς και η αραίωση του θαλάσσιου νερού από το γλυκό ποτάμιο νερό ευθύνονται για την μη ανάπτυξη κοραλλιογενών υφάλων στην περιοχή αυτή. Αν και οι κοραλλιογενείς ύφαλοι σχηματίζονται σε όλες τις περιοχές που επικρατούν οι ιδανικές συνθήκες που περιγράφηκαν, συνήθως έχουν την τάση να αναπτύσσονται στην προσήνεμη πλευρά των νησιών όπου η μέτρια κυματική δράση αναταράσσει τα νερά παρέχοντας τροφή και οξυγόνο στα κοράλλια (Easterbrook, 1999).

Η σύγκριση των ρυθμών ανάπτυξης των κοραλλιογενών υφάλων από δεδομένα πυρήνων γεωτρήσεων, που πραγματοποιήθηκαν σε υφάλους διαφορετικών τύπων και περιοχών, δείχνει ότι υπάρχει ένα μεγάλο εύρος ρυθμών αύξησης των υφάλων κατά τα τελευταία 8.000 έτη με μέσες τιμές που κυμαίνονται από 1 έως 14 mm/έτος (σχήμα 12.2).

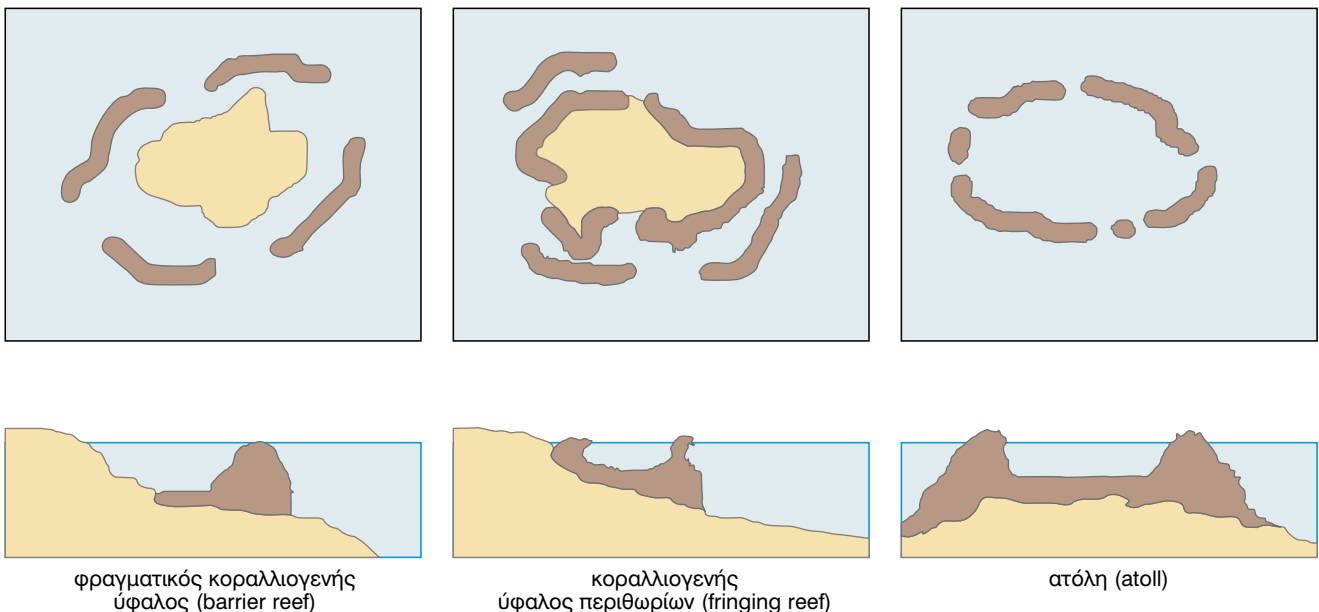
12.2 Είδη κοραλλιογενών υφάλων

Οι κοραλλιογενείς ύφαλοι απετέλεσαν αντικείμενο μελέτης για πρώτη φορά το 1837 από τον C. Darwin ο οποίος, αν και είναι περισσότερο γνωστός για την πραγματεία του σχετικά με την εξέλιξη των ειδών, υπήρξε και γεωλόγος. Ο C. Darwin διαπίστωσε ότι οι ύφαλοι εμφανίζουν μια ποικιλία μορφών και θέσεων σε σχέση με τις ακτές των ηπειρωτικών περιοχών και αναγνώρισε τρεις διαφορετικούς τύπους (σχήμα 12.3): τους υφάλους περιθωρίων (fringing reefs), τους φραγματικούς υφάλους (barrier reefs) και τις ατόλες (atolls) και διατύπωσε μια θεωρία σχετικά με το σχηματισμό τους.

Ύφαλοι περιθωρίων (fringing reefs) ονομάζονται εκείνοι που χωρίζονται από τις νησιωτικές ή ηπειρωτικές ακτές με ένα θαλάσσιο κανάλι μικρού βάθους (σχήμα 12.3). Αναπτύσσονται κατά μήκος της ακτογραμμής σε καμπυλόγραμμες ζώνες που ποικίλουν σε πλάτος από περίπου 100 m έως και 1 km. Συνήθως δε συναντώνται σε ακτές που εκβάλουν ποταμοί για τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί. Μπορεί να εμφανίζονται ελαφρώς πάνω από τη θαλάσσια στάθμη κατά τη διάρκεια της άμπωτης αλλά, επειδή τα κοράλλια δεν μπορούν να επιβιώσουν για μεγάλο χρονικό διάστημα έξω από το νερό, η εμφάνισή τους περιορίζεται στην ενδοπαλιρροιακή ζώνη (φωτο 12.2). Κοραλλιογενείς ύφαλοι αυτού του είδους υπάρχουν στα νησιά της Χαβάης και στην Καραϊβική.

Οι φραγματικοί ύφαλοι (barrier reefs) συνήθως αναπτύσσονται σε σχετικά μεγάλη απόσταση από την ακτή και χωρίζονται από την ξηρά με ένα βαθύ κανάλι. Το πλάτος τους ποικίλει από περίπου 1 km έως πάνω από 15 km. Η μάζα των υφάλων αυτών περιέχει θραύσματα κοραλλιών, που έχουν προκύψει από τη δράση των κυμάτων καταιγίδας, καθώς και όστρακα μαλακίων, τρηματοφόρα και θραύσματα ανθρακικών κελυφών άλλων οργανισμών. Η πλευρά του υφάλου προς την ανοικτή θάλασσα χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ανάπτυξη κοραλλιών υπόκειται όμως και σε έντονη διάβρωση από τη δράση των κυμάτων καταιγίδας. Τέτοιοι ύφαλοι υπάρχουν στην Καραϊβική και τις τροπικές περιοχές του Ειρηνικού και Ινδικού ωκεανού. Ο μεγαλύτερος και γνωστότερος φραγματικός ύφαλος στον κόσμο είναι το Great Barrier Reef που εκτείνεται για πάνω από 2.000 km κατά μήκος των ακτών της Αυστραλίας (φωτο 12.3).

Ο τρίτος τύπος υφάλων που αναγνωρίστηκε από τον Darwin είναι οι ατόλες (atolls). Ατόλη είναι ένας κυκλικός



Σχήμα 12.3 Σχηματική απεικόνιση (οριζοντιογραφία και εγκάρσια τομή - profile) των τριών τύπων κοραλλιογενών υφάλων.



Φωτο 12.2 Ύφαλος περιθωρίων (fringing reef) στο Horn Island, Cape York, Australia. (φωτογραφία: Rob Brander)

ύφαλος μορφής δακτυλοειδούς φράγματος που περικλείει μια λιμνοθάλασσα. Στις απόλες δεν υπάρχει το κεντρικό νησί, η παρουσία του οποίου είναι τυπικό χαρακτηριστικό των φραγματικών υφάλων, ενώ η πάνω τους επιφάνεια

βρίσκεται λίγα μόνο μέτρα πάνω από τη στάθμη της θαλάσσιας. Η μεγαλύτερη απόλη ονομάζεται Kwajalein, βρίσκεται στα νησιά Marshall στον Ειρηνικό ωκεανό και περικλείει μια λιμνοθάλασσα μήκους 97 km (φωτο 12.4).



Φωτο 12.3 Φραγματικός κοραλλιογενής ύφαλος (barrier reef), που αποτελεί τμήμα του Great Barrier Reef, ανοιχτά του Cairns, Queensland, Australia.



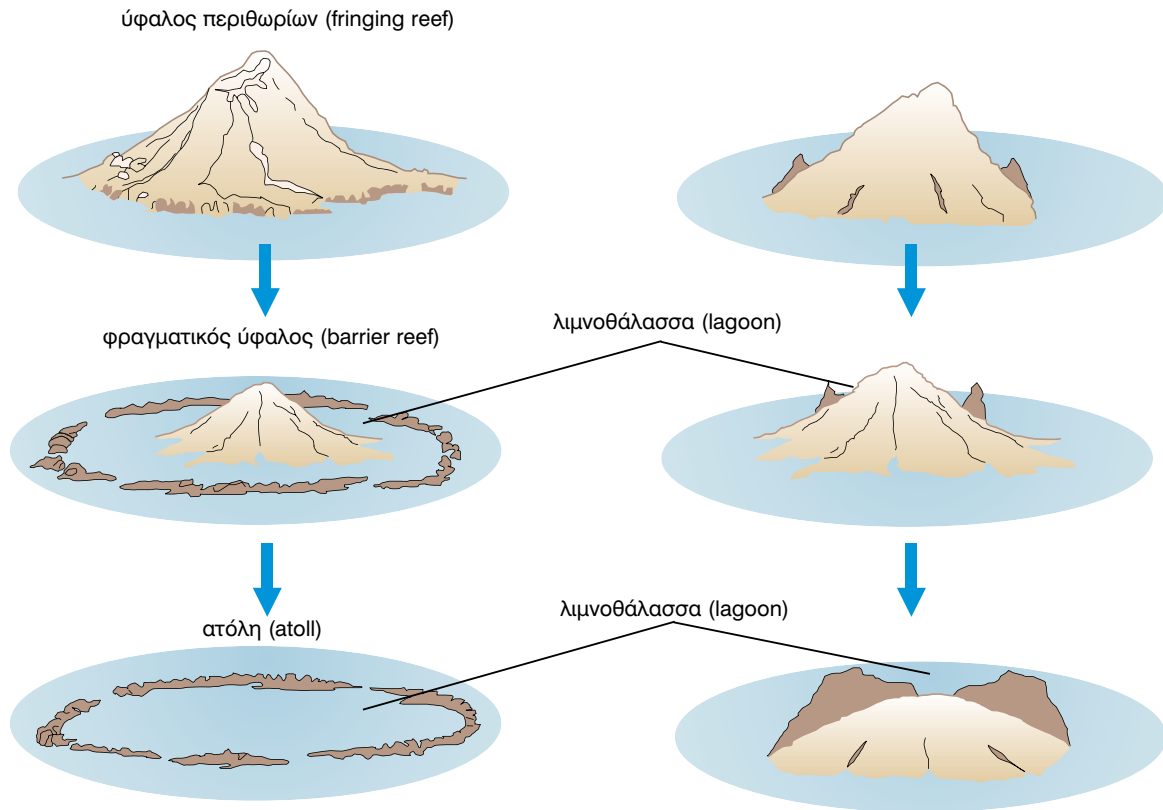
Φωτο 12.4 Αεροφωτογραφία της απόλης Kwajalein, στα νησιά Marshall του Ειρηνικού ωκεανού.

12.3 Θεωρίες σχηματισμού των κοραλλιογενών υφάλων

Ο C. Darwin κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του με το πλοίο Beagle, από το 1832 έως το 1835, επισκέφτηκε αρκετούς κοραλλιογενείς υφάλους στον Ειρηνικό ωκεανό. Οι παρατηρήσεις του τον οδήγησαν στη διατύπωση μιας θεωρίας για την προέλευσή τους (Darwin, 1842) που από μεταγενέστερες έρευνες αποδείχθηκε ότι τουλάχιστον ως προς τις βασικές της αρχές είναι σωστή (Dana, 1874; 1885; Davis, 1928; Umgrove, 1947; Emery, 1948; Dobrin et al., 1949; Fairbridge, 1950; Emery et al., 1954; Wells, 1957; Cloud, 1958; Ladd, 1961; Wiens, 1962; Purdy, 1974; Guilcher, 1988). Σύμφωνα με τον Darwin η προέλευση και διαμόρφωση των ατολών ξεκινά με την ανάπτυξη ενός υφάλου περιθωρίων περιμετρικά ενός νησιού, συνήθως ηφαιστειογενούς (σχήμα 12.4). Καθώς το κεντρικό νησί υποχωρεί (καθιζάνει) αργά, η προς τα πάνω ανάπτυξη των κοραλλιών προχωρά αρκετά γρήγορα ώστε να διατηρούνται οι συνθήκες ρηχών νερών που είναι απαραίτητες για την επιβίωσή τους. Ο ύφαλος αναπτύσσεται κυρίως προς τα πάνω και μερικώς περιμετρικά προς την ανοικτή θάλασσα. Με τον τρόπο αυτό οι διαστάσεις του διατηρούνται περίπου σταθερές και καθώς το κεντρικό νησί υποχωρεί κάτω από τα στάθμη της θάλασσας, σχηματίζεται μια λιμνο-

θάλασσα που χωρίζει τον ύφαλο από το νησί το οποίο σταδιακά χάνεται κάτω από το νερό. Τελικά το κεντρικό νησί υποχωρεί εντελώς κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας αφήνοντας περιμετρικά τον κοραλλιογενή ύφαλο σαν ένα δακτύλιο (σχήμα 12.4). Η θεωρία αυτή του C. Darwin είναι γνωστή σαν θεωρία της υποχώρησης (Darwin subsidence theory) εξαιτίας του καθοριστικού, για το σχηματισμό της απόλης, ρόλου της υποχώρησης και βύθισης του νησιού.

Ο R.A. Daly (1934, 1942) διατύπωσε μια θεωρία σύμφωνα με την οποία οι σημερινοί ύφαλοι σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της μετα-παγετώδους ανόδου της θαλάσσιας στάθμης, δηλαδή κατά την περίοδο του Ολόκαινου, μετά από ένα χρονικό διάστημα διάβρωσης από τη δράση των κυμάτων κατά τη διάρκεια της οποίας σχηματίστηκαν εκτεταμένοι πετρώδεις παράκτιοι πάγκοι. Εκείνο που τον οδήγησε στη διατύπωση της θεωρίας αυτής ήταν η παρατήρηση ότι οι λιμνοθάλασσες πίσω από αρκετούς φραγματικούς υφάλους και απόλες έχουν παρόμοιο βάθος. Ο R.A. Daly θεώρησε δεδομένο ότι κατά τη διάρκεια των παγετωδών περιόδων του Πλειστόκαινου, όπου η στάθμη της θάλασσας ήταν χαμηλή, συνέβαινε η εκτεταμένη καταστροφή των κοραλλιογενών υφάλων. Οι ύφαλοι καταστρέφονταν λόγω διάβρωσης, εξαιτίας της δράσης των κυμάτων, αλλά εν μέρει και από τη μείωση του ρυθμού ανάπτυξης των κοραλ-



Σχήμα 12.4 Οι τρεις φάσεις ανάπτυξης μια ατόλης (atoll) όπως προτάθηκαν από τον Charles Darwin (1842).

λιών που οφειλόταν στις χαμηλές θερμοκρασίες του ωκεάνιου νερού κατά τη διάρκεια των παγετωδών αυτών περιόδων. Σύμφωνα με τον R.A. Daly η διάβρωση των κοραλλιογενών υφάλων και η περιορισμένη ανάπτυξή τους είχαν σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό μεγάλου εύρους παράκτιων πάγκων. Με το πέρας της παγετώδους περιόδου, που συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας των νερών και την κατά περίπου 120 m άνοδο της θαλάσσιας στάθμης, οι ρυθμοί ανάπτυξης των κοραλλιών αυξήθηκαν σημαντικά και οι ύφαλοι που παρατηρούμε σήμερα σχηματίστηκαν πάνω στους υποθαλάσσιους διαβρωσιγενείς πάγκους. Η θεωρία αυτή ερμηνεύει του σχηματισμού των υφάλων είναι γνωστή σαν θεωρία ελέγχου από τους παγετώνες (glacial control theory).

Μεταγενέστερα αποδείχτηκε ότι επικρατέστερη θεωρία για το σχηματισμό των ατολών είναι αυτή του C. Darwin. Οι αποδείξεις προέκυψαν από τη γνώση του πάχους των κοραλλιογενών υφάλων. Σύμφωνα με τη θεωρία του C. Darwin το πάχος των υφάλων θα έπρεπε να είναι αρκετά μεγάλο εξαιτίας της συνεχούς προς τα πάνω ανάπτυξης των κοραλλιών καθώς το κεντρικό νησί υποχωρεί. Αντίθετα, σύμφωνα με τη θεωρία του R.A. Daly, το πάχος των κοραλλιών θα έπρεπε να είναι πολύ μικρό, αφού οι ύφαλοι καταστρέφονταν στις παγετώδεις περιόδους και η ανάπτυξή τους ξεκινούσε ξανά κατά τις μεσοπαγετώδεις. Συνεπώς το πάχος τους θα έπρεπε να είναι περίπου ίδιο με το ύψος της μεταβολής της στάθ-

μης της θάλασσας μεταξύ παγετωδών και μεσοπαγετωδών περιόδων του Πλειστόκαινου, δηλαδή περίπου 100 m. Γεωτρήσεις όμως, που πραγματοποιήθηκαν στην ατόλη Bikini στα νησιά Marshall το 1947, αποκάλυψαν ότι το πάχος των κοραλλιών φθάνει τα 775 m. Επίσης δύο γεωτρήσεις που διανοίχτηκαν στην ατόλη Eniwetok το 1951 και 1952 αντίστοιχα συνάντησαν 1.212 m κοραλλιογενή ύφαλο από σκελετούς κοραλλιών που ζούσαν σε συνθήκες ρηχών νερών πάνω από τον βασαλτική σύστασης ωκεάνιο πυθμένα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα κοράλλια μπορούν να αναπτυχθούν μόνο σε ρηχά νερά η διαπίστωση ενός τόσο μεγάλου πάχους κοραλλιών σημαίνει ότι η υποχώρηση – βύθιση πρέπει να συνέβη σε μια μακρά χρονική περίοδο κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των ατολών. Συνεπώς τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων στις ατόλες Bikini και Eniwetok ενισχύουν την άποψη ότι η θεωρία του C. Darwin είναι σωστή.

12.4 Γεωμορφολογία των κοραλλιογενών υφάλων

Οι ύφαλοι περιθωρίων είναι ο περισσότερο διαδεδομένος τύπος υφάλων. Τα δύο άλλα είδη εμφανίζουν όμως γεωμορφολογικά μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον δεδομένου ότι έχουν μια πολύπλοκη ιστορία εξέλιξης που συνδυάζει την αλληλεπίδραση διεργασιών όπως είναι οι μεταβολές της θαλάσσιας στάθμης, η τεκτονική

ταπείνωση – βύθιση και η προς τα πάνω και περιμετρικά ανάπτυξη των κοραλλιών. Η σημερινή μορφολογία των περισσότερων κοραλλιογενών υφάλων είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς φάσεων κατασκευής και καταστροφής που εκτείνεται χρονικά αρκετά πίσω μέσα στην περίοδο του Πλειστόκαινου.

Τα σημερινά μορφολογικά χαρακτηριστικά των περισσότερων κοραλλιογενών υφάλων, που σήμερα εκτείνονται πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, έχουν διαμορφωθεί από τη δράση μιας σειράς γεωμορφολογικών διεργασιών. Η κυματική δραστηριότητα, η διάλυση καθώς και άλλες διεργασίες αποσάθρωσης και διάβρωσης στους υφάλους σχηματίζουν διαβρωσιγενείς γεωμορφές όπως κρημνούς και παράκτιους πάγκους. Τα ιζήματα που αποτελούν τα προϊόντα της αποσάθρωσης και διάβρωσης των υφάλων συχνά αποτίθενται σχηματίζοντας γεωμορφές απόθεσης όπως αιγιαλούς. Οι κοραλλιογενείς υφαλοι είναι δυνατό να επηρεάσουν σημαντικά τις παράκτιες διεργασίες που δρουν κατά μήκος της γειτονικής ηπειρωτικής ή νησιωτικής ακτής, κυρίως μέσω της ικανότητας που έχουν να διασκορπίζουν μεγάλη ποσότητα της κυματικής ενέργειας. Τα οργανικά ιζήματα, που προκύπτουν από τη διάβρωση του εκτεθειμένου στον ωκεανό περιθωρίου των υφάλων, αποτίθεται στην πιο ήρεμη (μικρότερης κυματικής ενέργειας) ενδοπαλιρροιακή ζώνη που βρίσκεται πίσω από τον ύφαλο, μεταξύ αυτού και της νησιωτικής ή ηπειρωτικής ακτής. Στην περίπτωση των υφάλων περιθωρίων η ζώνη αυτή καταλαμβάνεται από μια αμμόδη λιμνοθάλασσα.

12.4.1 Κοραλλιογενείς ή δομικές αναβαθμίδες (coral or constructional terraces)

Στους κοραλλιογενείς υφάλους αναπτύσσεται ένα είδος θαλάσσιων αναβαθμίδων που ονομάζονται κοραλλιογενείς ή δομικές (constructional) και αποτελούν ιδιαίτερα αξιόπιστους δείκτες καταγραφής της στάθμης της θάλασσας του παρελθόντος. Η μελέτη κοραλλιογενών αναβαθμίδων όπως αυτών στη χερσόνησο Huon, N. Guinea, όπως έχει ήδη αναφερθεί, βοήθησε στη σύνταξη των καμπυλών μεταβολής της παγκόσμιας ευστατικής στάθμης. Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος σχηματισμού των γεωμορφών αυτών και η χρησιμότητά τους στον προσδιορισμό των θέσεων της στάθμης θάλασσας κατά το παρελθόν.

Οι δομικές θαλάσσιες αναβαθμίδες σχηματίζονται σε περιοχές που οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη των κοραλλιών (Burbank & Anderson, 2007). Όταν επικρατούν οι συνθήκες αυτές, οι ύφαλοι αναπτύσσονται τόσο προς τα πάνω, προς την επιφάνεια δηλαδή της θάλασσας (με ρυθμούς που μερικές φορές ξεπερνούν τα 10 mm/έτος), όσο και περιμετρικά. Όταν η στάθμη της θάλασσας παρέμενε σταθερή για σχετικά μεγάλες χρονικές περιόδους, τα κοράλλια αναπτύσσονταν και σχημάτιζαν πάγκους που βρίσκονταν κοντά στο

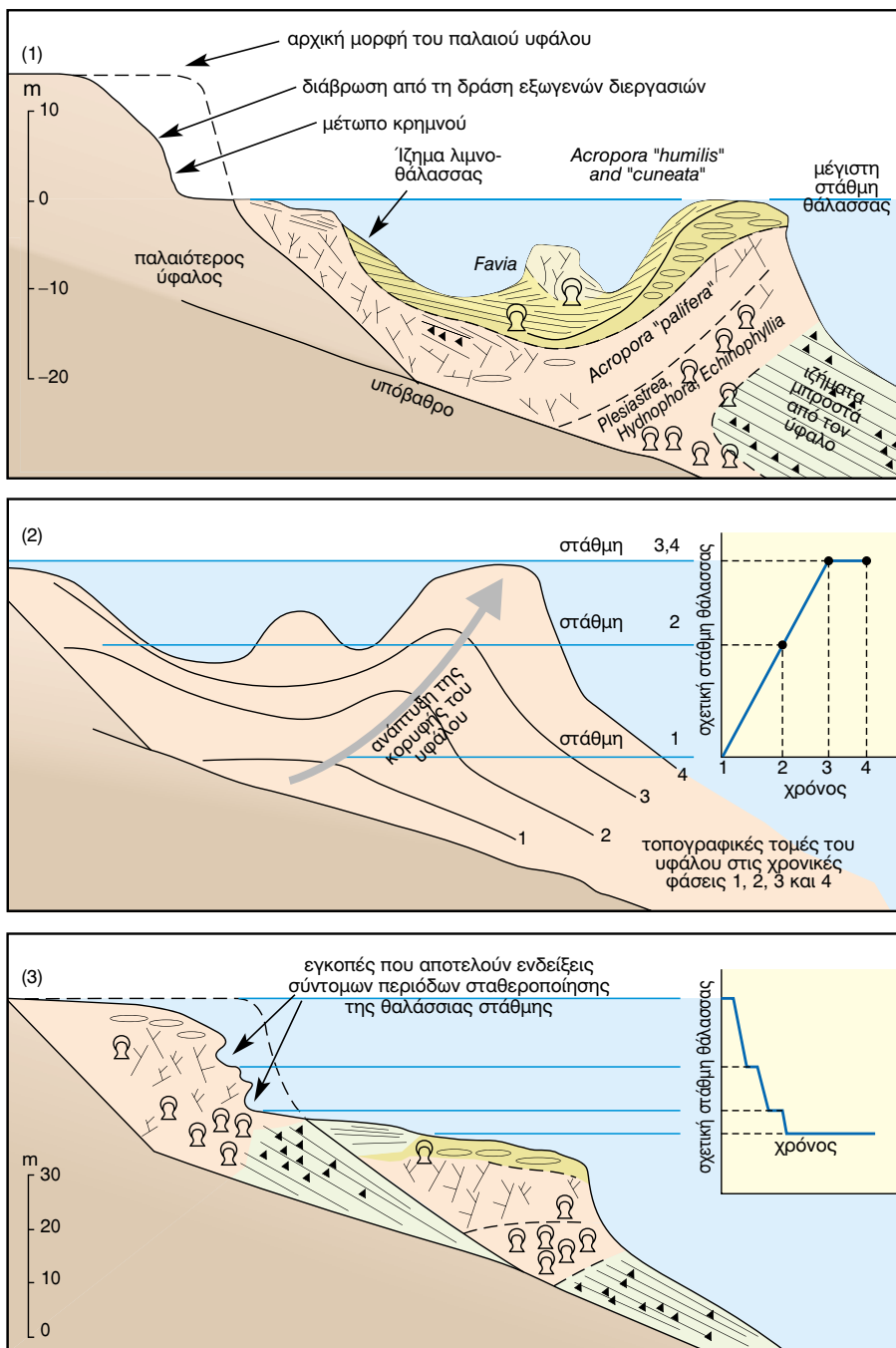
επίπεδο της θαλάσσιας στάθμης. Για το λόγο αυτό μπορούν να αποτελέσουν γεωμορφολογικούς δείκτες της στάθμης της θάλασσας κατά το παρελθόν. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου ανόδου της σχετικής θαλάσσιας στάθμης η ανάπτυξη των κοραλλιών τόσο προς τα πάνω, όσο και περιμετρικά είναι προβλέψιμη (σχήμα 12.5.1,2). Εάν η άνοδος είναι ιδιαίτερα γρήγορη, ο ρυθμός της κατακόρυφης (προς τα πάνω) ανάπτυξης της κορυφής των υφάλων είναι πιθανό να καθυστερήσει μη μπορώντας να ακολουθήσει τους ρυθμούς ανόδου της θαλάσσιας επιφάνειας. Μόνο όταν η στάθμη σταθεροποιηθεί, η κορυφή του υφάλου θα μπορέσει να φθάσει το μέγιστο ύψος της κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας. Εάν στη συνέχεια η σχετική στάθμη της θάλασσας αρχίσει να πέφτει, ο ύφαλος θα αναδυθεί και είναι δυνατόν κατά τη διάρκεια σύντομων περιόδων σταθεροποίησής της να δημιουργηθούν εγκοπές από τη δράση του κυματισμού στην μπροστά του υφάλου περιοχή (σχήμα 12.5.3). Εάν η στάθμη θάλασσας σταθεροποιηθεί σε ένα νέο τοπικό επίπεδο, η διαδικασία θα επαναληφθεί και τα κοράλλια θα χτίσουν ένα νέο υφαλώδη πάγκο.

Επειδή διαφορετικά είδη κοραλλιών προσαρμόζονται σε διαφορετικές θαλάσσιες συνθήκες υπάρχει ένας συγκεκριμένος τρόπος ανάπτυξης των διαφόρων ειδών κατά ζώνες εντός ενός υφάλου. Για παράδειγμα τα ανθεκτικά στο κύμα κοράλλια αναπτύσσονται στο μπροστινό άκρο του υφάλου, που είναι εκτεθειμένο στον ωκεανό και τα νερά είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά. Αντίθετα τα λιγότερο ανθεκτικά είδη βρίσκονται στο πίσω μέρος του υφάλου (Chappell, 1974). Το πολύ εξωτερικό χείλος – άκρο του υφάλου καλύπτεται από φυκώδεις ασβεστόλιθους που συμβάλουν στη σταθεροποίησή του. Η γνώση της ζώνωσης αυτής, δηλαδή του ποια είδη κοραλλιών αναπτύσσονται σε ποια θέση εντός του υφάλου (σχήμα 12.5.1), καθώς και η ικανότητα αναγνώρισης των διαφορετικών ειδών κοραλλιών, μερικά από τα οποία είναι περισσότερο αξιόπιστοι δείκτες (καταγραφείς) της θαλάσσιας στάθμης αφού ζουν σε συγκεκριμένα βάθη, επιτρέπει την αναπαράσταση της γεωμετρίας των υφάλων που σήμερα έχουν αναδυθεί και των σχέσεών τους με παλαιότερες στάθμες θάλασσας κατά τις διάφορες φάσεις της χρονικής περιόδου της ανάπτυξής τους. Για τις δομικές κοραλλιογενείς αναβαθμίδες η κορυφή του υφάλου και το μπροστινό του άκρο (δηλαδή το προς την ανοιχτή θάλασσα όριο) αποτελεί τον καλύτερο δείκτη της θαλάσσιας στάθμης που αντιστοιχεί στην περίοδο της ανάπτυξης της συγκεκριμένης επιφάνειας (Burbank & Anderson, 2007). Εάν ο ύφαλος ανυψωθεί και βρεθεί πάνω από τη θαλάσσια στάθμη, το άκρο αυτό υπόκειται σε διάβρωση, οπότε για να υπολογιστεί η αρχική θέση της κορυφής του υφάλου, είναι απαραίτητη η γνώση του βάθους στο οποίο ζουν τα διάφορα είδη κοραλλιών και η αναγνώριση των ειδών αυτών στον αναδυμένο ύφαλο (σχήμα 12.5.1).

Κατά μήκος αρκετών κοραλλιογενών ακτών που ανυψώνονται τεκτονικά, υπάρχουν σειρές θαλάσσιων

δομικών αναβαθμίδων που αποτελούν άμεσες ενδείξεις πολλαπλών πτώσεων της σχετικής στάθμης θάλασσας. Αλλά τότε σχηματίζονται αυτές οι αναβαθμίδες και πώς σχετίζονται με τις μεταβολές της θαλάσσιας στάθμης; Για να σχηματισθεί μια παράκτια δομική αναβαθμίδα το επίπεδο της θάλασσας πρέπει να παραμείνει στην ίδια περίπου θέση, σε σχέση με την ξηρά, για ένα χρονικό διάστημα που να επιτρέπει στα κοράλλια να αναπτυχθούν περιμετρικά ώστε να σχηματίσουν έναν υφαλώδη πάγκο. Επίσης θα πρέπει ο χρόνος σταθεροποίησης της θαλάσσιας στάθμης να είναι αρκετός ώστε η κυματική δράση να εστιαστεί κατά μήκος του πάγκου αυτού. Εξαιτίας των γρήγορων ρυθμών ανάπτυξης και διάβρωσης των κοραλλιών, το χρονικό διάστημα που απαιτείται για

να δημιουργηθεί μια εκτεταμένη αναβαθμίδα συνήθως είναι λίγες χιλιάδες χρόνια (Anderson et al., 1999). Συνεπώς οι αναβαθμίδες σχηματίζονται κατά τη διάρκεια διαστημάτων όπου οι ρυθμοί της κατακόρυφης κίνησης της ξηράς είναι σχεδόν ισοδύναμοι με τους ρυθμούς της μεταβολής της θαλάσσιας στάθμης. Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο που αφορά τη θαλάσσια στάθμη, κατά τις τελευταίες δεκαετίες η ευστατική ιστορία της στάθμης της θάλασσας για την περίοδο του Τεταρτογενούς έχει αναπαρασταθεί με μεγάλη ακρίβεια (Bloom et al., 1974; Chappell, 1974; Chappell et al., 1996). Αφού η ιστορία των παγκόσμιων ευστατικών μεταβολών της στάθμης της θάλασσας είναι γνωστή με ακρίβεια, εάν διαπιστωθεί με διάφορες μεθόδους από-



Σχήμα 12.5 Στρωματογραφία των κοραλλιογενών υφάλων και μεταβολές της θαλάσσιας στάθμης.

(1) Ιδανικό μοντέλο της ανάπτυξης κατά ζώνες και της γεωμετρίας ενός κοραλλιογενούς υφάλου που αναπτύχθηκε και εξελίχθηκε με την άνοδο της θαλάσσιας στάθμης. Τα είδη των κοραλλιών *Acropora humilis* και *cuneata* βρίσκονται την κορυφή του υφάλου πολύ κοντά στο επίπεδο της θαλάσσιας στάθμης. Επειδή αρκετά συχνά τα είδη αυτά μπορεί να διαβρωθούν, όταν ο ύφαλος αναδυθεί, καλύτερους δείκτες σταθμών θάλασσας του παρελθόντος αποτελούν είδη που ζουν ελαφρώς χαμηλότερα.

(2) Ιδανική τοπογραφική τομή του κοραλλιογενούς υφάλου όπου δείχνει τη σχέση της τοπογραφίας του με τις μεταβολές της θαλάσσιας στάθμης. Κατά τη διάρκεια των διαστημάτων γρήγορης ανόδου της θαλάσσιας στάθμης (από τη θέση 1 στη θέση 3) η κορυφή του υφάλου αναπτύσσεται προς τα πάνω, αλλά πάντα παραμένει κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Με τη σταθεροποίηση της θαλάσσιας στάθμης ο ύφαλος φθάνει το επίπεδο της θάλασσας και αναπτύσσεται προς την πλευρά του ανοικτού ωκεανού.

(3) Οι κυματογενούς προέλευσης θαλάσσιες εγκοπές είναι αποτέλεσμα της πτώσης της θαλάσσιας στάθμης. Όταν η στάθμη σταθεροποιηθεί, είναι δυνατόν να σχηματιστεί ένας νέος διαβρωσιγενής παράκτιος πάγκος. (τροποποιημένο από Burbank & Anderson, 2007)

λυτης χρονολόγησης η ηλικία των αναβαθμίδων σε μια παράκτια περιοχή, η συσχέτιση των αναβαθμίδων αυτών με τις παλαιότερες θέσεις της ευστατικής στάθμης της θάλασσας θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για τον υπολογισμό των ρυθμών της κατακόρυφης παραμόρφωσης (τεκτονική ανύψωση ή βύθιση) της περιοχής αυτής.

12.5 Περιβαλλοντική σημασία των κοραλλιογενών υφάλων

Οι κοραλλιογενείς ύφαλοι, αν και καλύπτουν παγκοσμίως μόλις το 0,2% του θαλάσσιου πυθμένα, εκτιμάται ότι φιλοξενούν σχεδόν το 25% των θαλάσσιων ειδών. Τα οικοσυστήματα που αναπτύσσονται στους κοραλλιογενείς υφάλους είναι πολύ ευαίσθητα σε περιβαλλοντικές πιέσεις. Η συνηθέστερη ένδειξη πίεσης των κοραλλιών είναι ο αποχρωματισμός τους (bleaching) (Brown & Ogden, 1993). Ο αποχρωματισμός προκαλείται από την εξαφάνιση των μικροσκοπικών δινομαστιγών (πολύ μικρές κυτταρικές δομές), που ονομάζονται ζωοξανθέλλες (zooxanthellae), τα οποία αποτελούν την τροφή των πολυπόδων και μπορεί να είναι αποτέλεσμα:

- **Διαφοροποιήσεων στη θερμοκρασία του θαλάσσιου νερού** κάτω ή και πάνω από τα επιτρεπτά για τη διαβίωση των κοραλλιών επίπεδα. Το πρόβλημα αυτό, ειδικά για κάποιες περιοχές του Ειρηνικού ωκεανού, αποδίδεται στο φαινόμενο El Nino (νότια διακύμανση) που προκαλεί την άνοδο της θερμοκρασίας των επιφανειακών νερών.
- **Διαφοροποιήσεων στην αλατότητα** που μπορεί να οφείλονται στην αύξηση των παροχών των ποταμών και χειμάρρων που εκβάλλουν σε παράκτιες περιοχές κοραλλιογενών υφάλων.
- **Αύξησης της θολερότητας των νερών** εξαιτίας μεγάλων συγκεντρώσεων αιωρούμενης ιλύος που περιορίζει τη διαθεσιμότητα σε ηλιακό φως που απαιτείται για την φωτοσύνθεση των μικροσκοπικών φυκών

(zooxanthellae). Και αυτό το πρόβλημα συχνά συνδέεται με τις αυξημένες παροχές των ποταμών σε συνδυασμό με αλλαγές των χρήσεων γης στις λεκάνες απορροής, που προκαλούνται κυρίως από την αποψίλωση και την εντατικοποίηση της γεωργίας, ενέργειες που ενισχύουν τη διάβρωση των εδαφών και την ποτάμια στερεοπαροχή.

Η αυξημένη συχνότητα φαινομένων αποχρωματισμού των κοραλλιών τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στη διατύπωση της άποψης ότι κατά ένα μέρος ευθύνεται η παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Η επίδραση φαινομένων όπως είναι το El Nino (νότια διακύμανση) που οφείλονται σε κλιματικούς παράγοντες καθώς και τοπικές αλλαγές στην ποσότητα και συχνότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων ενισχύει την άποψη αυτή.

Εκτιμάται ότι περίπου το 75% των κοραλλιογενών υφάλων παγκοσμίως δε θα μπορέσει να αντιμετωπίσει τη μελλοντική αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Εάν η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας ακολουθήσει τους ρυθμούς που προβλέπονται, σε έναν αιώνα οι θερμοκρασίες των ωκεάνιων νερών θα είναι πολύ υψηλότερες από αυτές που προκαλούν τον αποχρωματισμό, προκαλώντας σταδιακά το θάνατο των υφάλων. Για να επιζήσουν τα κοράλλια σε τέτοιες συνθήκες θα πρέπει να προσαρμοστούν στις νέες θερμοκρασίες. Ο αποχρωματισμός των κοραλλιών όλο και πιο συχνά συνοδεύεται από μαζικούς θανάτους των οικοσυστημάτων που ζουν στο φυσικό περιβάλλον των κοραλλιογενών υφάλων. Οι προβλέψεις εκτιμούν ότι μέχρι το έτος 2050 θα έχει χαθεί το 95% των κοραλλιών της Αυστραλίας. Το πιο εντυπωσιακό παράδειγμα αποχρωματισμού αποτελεί αυτό του ύφαλου Great Barrier Reef. Το 2002 υπέστη τη χειρότερη μορφή αποχρωματισμού με περισσότερο από το 60% του ύφαλου να έχει πληγεί. Αν η θερμοκρασία συνεχίζει να ανεβαίνει με τον ίδιο ρυθμό, ολόκληρος ο ύφαλος μπορεί να χαθεί μέσα στα επόμενα 50 έτη με ανάλογες αρνητικές επιπτώσεις για τα εκατοντάδες θαλάσσια είδη που ζουν σε αυτόν.