

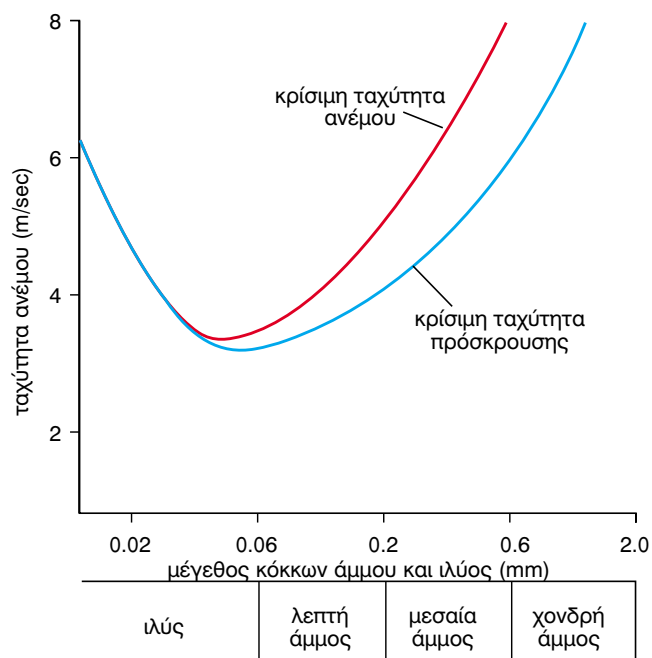
## 11.1 Αιολικές διεργασίες

Η αλληλεπίδραση του ανέμου με το αμμώδες ιζημα της παράκτιας ζώνης οδηγεί στο σχηματισμό χαρακτηριστικών γεωμορφών που ονομάζονται αιολικές. Οι σημαντικότερες παράκτιες αιολικές γεωμορφές απόθεσης είναι οι παράκτιες αμμώδεις θίνες.

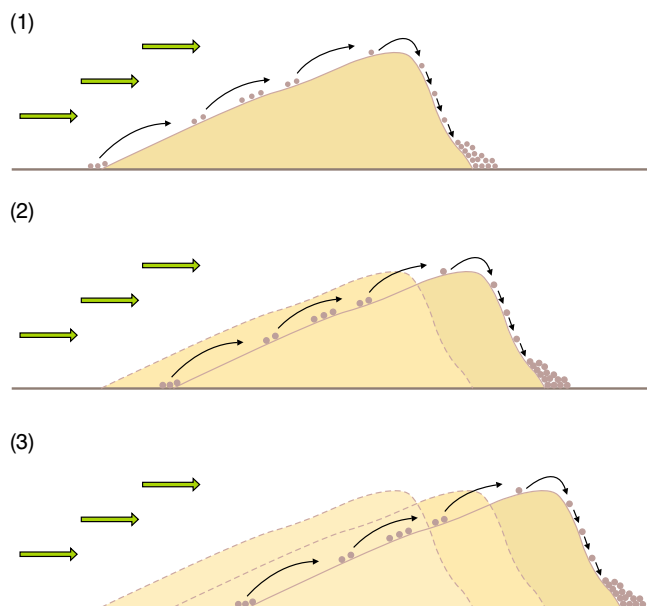
### 11.1.1 Αιολική μεταφορά και απόθεση

Για να τεθεί σε κίνηση η άμμος από τον άνεμο απαιτείται η επίτευξη μιας ταχύτητας πνοής που ονομάζεται "κρίσιμη ταχύτητα ανέμου" (fluid threshold velocity). Η ταχύτητα αυτή είναι ανάλογη με το μέγεθος των κόκκων από τους οποίους αποτελείται η άμμος (σχήμα 11.1). Η σχέση αυτή μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και του μεγέθους των κόκκων της άμμου είναι γενικά θετική δηλαδή για να μετακινηθούν όλο και πιο αδρομερείς κόκκοι απαιτούνται σταδιακά ισχυρότεροι άνεμοι. Για πολύ λεπτομερή όμως κλάσματα, όπως είναι η ιλύς και η άργιλος, η σχέση αυτή αντιστρέφεται (σχήμα 11.1). Αυτό οφείλεται στην αντίσταση που παρουσιάζουν στην κίνηση τα λεπτόκοκκα αυτά ιζήματα εξαιτίας του μεγάλου βαθμού συνοχής μεταξύ των κόκκων τους. Αφού επιτευχθεί η αρχική μετακίνηση των κόκκων της άμμου, η αιολική μεταφορά μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη σύρση, την κίνηση δηλαδή των κόκκων κατά μήκος της επιφάνειας. Αν η ταχύτητα του ανέμου είναι ικανή, οι κόκκοι της άμμου είναι δυνατόν να ενσωματωθούν στην πνοή του ανέμου και να μεταφερθούν με αιώρηση. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω διεργασιών αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τρόπο αιολικής μεταφοράς της άμμου και ονομάζεται αναπήδηση (saltation). Κατά τη διεργασία αυτή οι κόκκοι της άμμου μετά την αρχική τους διέγερση από την κρίσιμη ταχύτητα εισέρχονται στην πνοή του ανέμου για μικρή απόσταση και ξαναπέφτουν στην επιφάνεια με την επίδραση της βαρύτητας. Οι κόκκοι που αναπηδούν, κατά την προσγείωσή τους, έρχονται σε επαφή και αλληλεπιδρούν με άλλους κόκκους και μεταθέτουν κινητική ενέργεια, μειώνοντας έτσι την κρίσιμη ταχύτητα που απαιτείται για να τεθούν σε κίνηση οι υπόλοιποι κόκκοι της άμμου. Αυτή η μικρότερη κρίσιμη ταχύτητα είναι γνωστή σαν κρίσιμη ταχύτητα πρόσκρουσης (impact threshold velocity). Συνεπώς γίνεται φανερό ότι από τη στιγμή που αρχίζει η αιολική μεταφορά της άμμου μπορεί να διατηρηθεί με μικρότερες ταχύτητες ανέμου (σχήμα 11.1).

Η απόθεση της άμμου προϋποθέτει τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Στο χερσαίο τμήμα της παρά-



**Σχήμα 11.1** Κρίσιμες ταχύτητες ανέμου (fluid threshold velocities) και κρίσιμες ταχύτητες πρόσκρουσης (impact threshold velocities) για κόκκους διαφορετικών μεγεθών. (τροποποιημένο από Briggs et al., 1997)

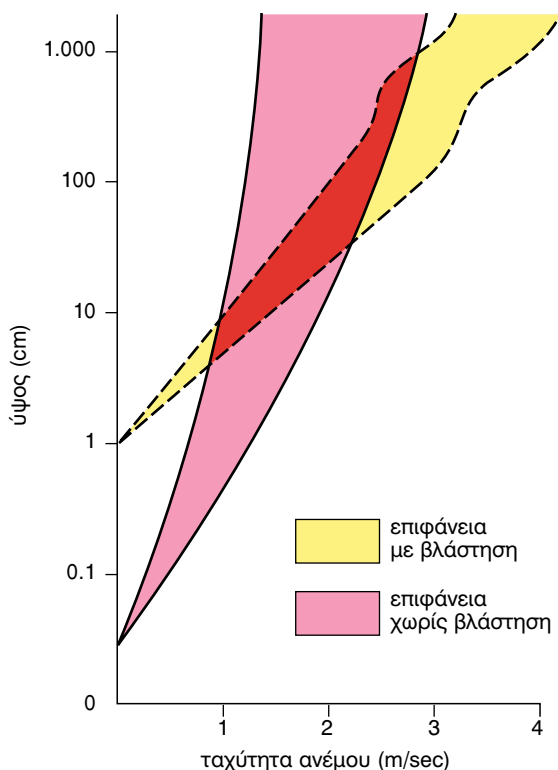


**Σχήμα 11.2** Ο τρόπος σχηματισμού (1) αλλά και μετακίνησης (2) και (3) των αμμωδών θινών (sand dunes). Το σχήμα ερμηνεύει επίσης το σχηματισμό της "σταυρωτής στρώσης" (cross bedding), όπου οι προσήνεμες και υπήνεμες πλευρές της θίνας διατηρούνται σαν κεκλιμένα επίπεδα στρώσης της άμμου στο εσωτερικό της ράχης. (τροποποιημένο από Park, 1997)

κτίας ζώνης αυτή η μείωση συμβαίνει στην υπήνεμη πλευρά εμποδίων όπως είναι ξύλα, όστρακα, θάμνοι κ.α. Η συσώρευση της άμμου από τη δράση του ανέμου διαμορφώνει αμέσως μια αιολική λοφώδη απόθεση, που χαρακτηρίζεται από μια προσήνεμη πλευρά ομαλής κλίσης και μια υπήνεμη πλευρά μεγαλύτερης κλίσης που, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, ονομάζεται παράκτια αμμώδης θίνα (coastal sand dune) (σχήμα 11.2).

### 11.1.2 Η αλληλεπίδραση μεταξύ άμμου και ανέμου

Όπως, όταν το νερό ρέει στην κοίτη ενός ποταμού προκαλείται τριβή λόγω σύρσης, έτσι και κατά την πνοή του ανέμου πάνω από μια επιφάνεια άμμου, όπως είναι ένας αιγιαλός, η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται από την τριβή λόγω σύρσης στην αμμώδη επιφάνεια. Η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται καθώς αυξάνεται το ύψος πάνω από την επιφάνεια δίνοντας ένα profile ταχύτητας που μοιάζει πολύ με αυτό της ταχύτητας ροής του νερού στα ποτάμια. Η σχέση ταχύτητα ανέμου - ύψος ακολουθεί μια λογαριθμική καμπύλη που, αν σχεδιασθεί με ημιλογαριθμική κλίμακα, μετατρέπεται σε ευθεία γραμμή (σχήμα 11.3). Το διάγραμμα αυτό δείχνει ότι μηδενικές ταχύτητες παράγονται από την τριβή λόγω σύρσης σε ένα μικρό αλλά πολύ σημαντικό ύψος πάνω από την επιφάνεια της άμμου. Αυτό το ύψος εξαρτάται από την τρα-



**Σχήμα 11.3** Διάγραμμα στο οποίο φαίνονται οι ταχύτητες που αποκτά ο άνεμος σε διάφορα ύψη πάνω από μια χερσαία επιφάνεια με βλάστηση (ύψους 10 cm) και μια επιφάνεια χωρίς βλάστηση. (τροποποιημένο από Briggs et al., 1997)

χύτητα, τις μορφολογικές δηλαδή ανωμαλίες, της επιφάνειας και ονομάζεται "αποτελεσματική τραχύτητα επιφάνειας" (effective surface roughness) ή  $z_0$  (Olson, 1958). Για μια επίπεδη παραλία - αιγιαλό χωρίς κινήσεις άμμου η τιμή του  $z_0$  είναι περίπου ίση με το 1/30 της μέσης τιμής της διαμέτρου των κόκκων της επιφάνειας. Για παράδειγμα η αποτελεσματική τραχύτητα επιφάνειας ( $z_0$ ) για άμμο που αποτελείται από κόκκους διαμέτρου 1 mm είναι περίπου 1/30 mm ή 0.03 mm.

## 11.2 Παράκτιες αμμώδεις θίνες (coastal sand dunes)

### 11.2.1 Χαρακτηριστικά των παράκτιων αμμωδών θινών

Η ουσιαστική διαφορά των παράκτιων αμμωδών θινών από τις υπόλοιπες παράκτιες γεωμορφές έγκειται στο ότι ο σχηματισμός τους οφείλεται στη δράση του ανέμου και όχι στην κίνηση του νερού.

Οι θίνες είναι αιολικές αποθέσεις άμμου που μοιάζουν με ράχες ή μικρούς λόφους (φωτο 11.1). Είναι χαρακτηριστικές μορφές των ακτών απόθεσης και απαντώνται σε εκβολές ποταμών, σε παράκτια έλη, σε ρηχούς όρμους κ.α. παρόμοια περιβάλλοντα πλούσια σε αμμώδεις ίζημα. Οι ράχες των θινών μπορούν να κυμαίνονται σε ύψος από 1 ή 2 m έως 20 ή και 30 m. Σε αντίθεση με τις αμμώδεις θίνες των ερήμων η προσήνεμη πλευρά των παράκτιων θινών έχει μικρή κλίση ενώ η υπήνεμη πλευρά εμφανίζει μεγαλύτερη κλίση. Οι κορυφές τους είναι επίπεδες ή κυματοειδείς, που αρκετά συχνά εμφανίζουν χαμηλά βυθίσματα χωρίς βλάστηση που είναι γνωστά σαν blow-outs.

Οι παράκτιες αμμώδεις θίνες σχηματίζονται στο χερσαίο τμήμα της παράκτιας ζώνης, πάνω από τη στάθμη της πλημμυρίδας και συχνά αποτελούν το προς την ξηρά όριο της θαλάσσιας επίδρασης στην ακτή. Μπορεί να εκτείνονται στο εσωτερικό της ξηράς μέχρι και απόσταση 10 km από την ακτογραμμή (Cooper, 1967). Συχνά δρουν σαν παράκτιο φράγμα προστατεύοντας τις χαμηλές παράκτιες περιοχές από τη θαλάσσια κατάκλυση.

Η ζώνη ανάπτυξης των θινών μπορεί να αποτελείται από επιμήκεις αμμώδεις ράχες που είναι διατεταγμένες παράλληλα προς την ακτογραμμή και χωρίζονται μεταξύ τους από επιμήκους μορφής αύλακες. Υπάρχουν συστήματα θινών με εξαιρετικά περίπλοκη μορφολογία όπου οι ράχες διατάσσονται κάθετα ή σχηματίζουν οξείες γωνίες με την ακτογραμμή.

Οι παράκτιες θίνες διαφέρουν από τους άλλους τύπους αμμωδών θινών. Παρότι η βασική διεργασία σχηματισμού τόσο των παράκτιων, όσο και των ερημικών θινών είναι η αιολική μεταφορά και απόθεση άμμου, οι θίνες των ερήμων έχουν μια τελείως διαφορετική μορφολογία από αυτές των ακτών. Η διεργασία που διαφοροποιεί τις παράκτιες από τις ερημικές θίνες είναι η αλληλεπίδραση



**Φωτο 11.1** Παράκτιες θίνες (coastal dunes) σταθεροποιημένες με βλάστηση σε παραλία της Σύρου.

μεταξύ του ανέμου και της βλάστησης που λαμβάνει χώρα στην περίπτωση των παράκτιων θινών ενώ δεν υφίσταται στην περίπτωση των ερημικών. Η μόνη περίπτωση που οι παράκτιες θίνες μορφολογικά μοιάζουν αρκετά με τις θίνες των ερημικών, είναι σε περιοχές όπου το κλίμα είναι ξηρό οπότε η παράκτια ζώνη στερείται βλάστησης.

Οι παράκτιες αμμώδεις θίνες είναι γεωμορφές που εμφανίζονται στις ακτές περιοχών με ξηρά, ημίξηρα και θερμά κλίματα. Είναι λιγότερο συχνές σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές διότι ο σχηματισμός τους εμποδίζεται από την πυκνή και πλούσια βλάστηση, τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου και τα μεγάλα ποσοστά υγρασίας της άμμου.

### 11.2.2 Προϋποθέσεις σχηματισμού των παράκτιων αμμοδών θινών

Οι συνθήκες που απαιτούνται για την ανάπτυξη των θινών σε μια ακτή είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε, το κατάλληλο κλίμα και κυρίως η παρουσία ισχυρών ανέμων με διεύθυνση προς την ακτή, η άφθονη προσφορά άμμου και η ύπαρξη βλάστησης, που παίζει το ρόλο του φυσικού εμποδίου γύρω από το οποίο συσσωρεύεται η άμμος (σχήμα 11.4).

Αναλυτικά οι κατάλληλες συνθήκες που απαιτούνται για το σχηματισμό των παράκτιων αμμοδών θινών περιλαμβάνουν:

- **Μια εκτεταμένη περιοχή στο χερσαίο τμήμα της παράκτιας ζώνης** που να είναι ικανή να φιλοξενήσει αιολικές συγκεντρώσεις άμμου. Τέτοιες περιοχές συνήθως είναι χαμηλές ακτές που απουσιάζουν κρημνοί.

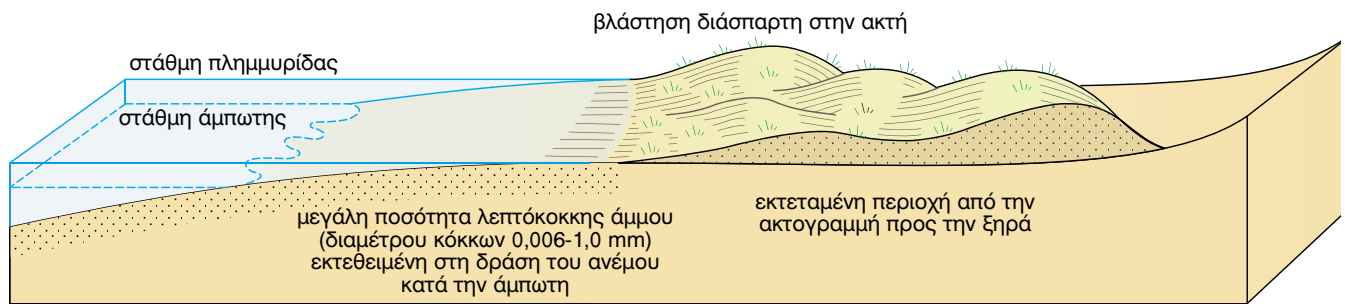
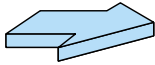
- **Κατάλληλο ανεμολογικό καθεστώς.** Για τη μεταφορά της άμμου απαιτούνται ισχυροί άνεμοι με διεύθυνση πνοής προς την ξηρά. Οι άνεμοι που απαιτούνται για τη μεταφορά του αμμώδους υλικού προς το εσωτερικό της παράκτιας ζώνης συνήθως προκαλούνται από τη διαφορική θέρμανση μεταξύ των αερίων μαζών που βρίσκονται πάνω από την ξηρά και τη θάλασσα. Οι θίνες σχηματίζονται κατά μήκος των ακτών που επηρεάζονται αρκετά συχνά από καταιγίδες, όπως η βορειοδυτική Ευρώπη και οι βορειοδυτικές Η.Π.Α. Το ύψος που μπορεί να αποκτήσει μια θίνα εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ταχύτητα του ανέμου. Υψηλότερες θίνες εμφανίζονται σε παράκτιες περιοχές που πλήττονται από ισχυρούς ανέμους.

- **Μεγάλη ποσότητα άμμου κατάλληλου μεγέθους κόκκων.** Χωρίς άμμο ικανή να μεταφερθεί από τις αιολικές διεργασίες δεν μπορούν να σχηματισθούν θίνες. Επίσης για τη διατήρηση των θινών και τη συνεχή ανάπτυξή τους είναι αναγκαία η διαρκής τροφοδοσία της παράκτιας ζώνης με άμμο κατάλληλης κοκκομετρίας. Η άμμος των θινών συνήθως είναι ποτάμιας προέλευσης, που έχει μεταφερθεί στην ακτή και έχει υποστεί επεξεργασία από τις θαλάσσιες διεργασίες και στη συνέχεια έχει αποτεθεί στην παραλία από τα παράκτια ρεύματα και τον κυματισμό. Οι καλά ανεπτυγμένες θίνες μεγάλων διαστάσεων συνήθως βρίσκονται κοντά σε πηγές τροφοδοσίας ιζημάτων, όπως είναι οι εκβολές ποταμών, όπου υλικά από τις λεκάνες απορροής μεταφέρονται και αποτίθενται στην ακτή.

- **Βλάστηση** που παίζει το ρόλο του φυσικού εμποδίου και βοηθά στη συγκέντρωση και τη σταθεροποίηση



επικράτηση ανέμων με διεύθυνση  
πνοής από τη θάλασσα προς την ξηρά



**Σχήμα 11.4** Οι βασικές προϋποθέσεις που απαιτούνται για το σχηματισμό των αμμωδών θινών (sand dunes) σε μια παράκτια περιοχή.



**Φωτο 11.2** Δορυφορική εικόνα των τεράστιων ερημικών θινών της Namibia που φθάνουν ως τις ακτές του Ατλαντικού ωκεανού. (πηγή: N.A.S.A. Visible Earth)

της αιολικής άμμου (σχήμα 11.4). Τα παράκτια φυτά και οι θάμνοι προκαλούν τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου στην υπήνεμη πλευρά τους.

Η άμμος στο εσωτερικό των θινών συνήθως διατάσσεται σχηματίζοντας μια χαρακτηριστική ιζηματοδομή που ονομάζεται σταυρωτή στρώση (cross-bedding). Η σταυρωτή στρώση χαρακτηρίζεται από την παρουσία κεκλιμένων επίπεδων στρώσης, μικρής ή μεγάλης γωνίας κλίσης, που είναι σταυροειδώς διατεταγμένα. Τα κεκλιμένα αυτά σταυροειδώς διατεταγμένα στρωματίδια άμμου αντιπροσωπεύουν παλαιές προσήνεμες και υπήνεμες επιφάνειες της θίνας αντίστοιχα (σχήμα 11.2).

Θίνες χωρίς βλάστηση, σαν αυτές που συνήθως αναπτύσσονται σε ξηρές ερημικές περιοχές, μπορούν να σχηματισθούν και σε παράκτιες περιοχές, όπως για παράδειγμα εκεί που οι έρημοι συναντούν τη θάλασσα, δηλαδή τις ακτές των ερήμων (π.χ. Namibia στην Αφρική) (φωτο 11.2). Παράκτιες αμμώδεις θίνες αναπτύσσονται καλύτερα σε περιοχές που ο ρυθμός μετακίνησης της άμμου είναι υψηλός και υπερβαίνει το ρυθμό ανάπτυξης της βλάστησης (π.χ. οι αμμώδεις θίνες κατά μήκος των ακτών της Washington και του Oregon στις Η.Π.Α.).

■ **Έναν αιγιαλό μικρής κλίσης και μεγάλου εύρους παλίρροιας.** Ο συνδυασμός των δύο αυτών συνθηκών, δηλαδή των μικρών μορφολογικών κλίσεων και του μεγάλου εύρους παλίρροιας, επιτρέπει την έκθεση μεγάλων ποσοτήτων παράκτιας άμμου κατά τη διάρκεια της άμπωτης. Επιπλέον, η παράκτια άμμος παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα εκτεθειμένη στις ατμοσφαιρικές συνθήκες ώστε να απαλλαγεί από την υγρασία και να στεγνώσει αρκετά για να μπορέσει να μεταφερθεί από τον άνεμο προς την ξηρά (σχήμα 11.4). Η απαλλαγή της άμμου από την υγρασία είναι ιδιαίτερα σημαντική και αποτελεί έναν από τους λόγους που οι θίνες δε σχηματίζονται κατά μήκος των ακτών σε περιοχές με τροπικό κλίμα, όπου υπάρχει μεγάλη υγρασία του αέρα που απαγορεύει την "ξηράνση" της άμμου.

### 11.2.3 Είδη παράκτιων αμμωδών θινών

Η αρχική αιολική συσσώρευση άμμου γύρω από τα εμπόδια που υπάρχουν στην επιφάνεια του χερσαίου τμήματος της παράκτιας ζώνης σχηματίζει χαμηλές και χωρίς βλάστηση θίνες που ονομάζονται ίχνη θινών (shadow dunes) (φωτο 11.3). Στη συνέχεια η παρουσία βλάστησης μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη συγκέντρωση σωρών άμμου και να οδηγήσει στο σχηματισμό



**Φωτο 11.3** Μορφές ίχνους θινών (shadow dunes) και εμβρυακών θινών (embryo dunes) στη βορειοανατολική Σκύρο.





**Φωτο 11.4** Εμβρυακές θίνες (embryo dunes) στο δέλτα του Εύηνου ποταμού.



**Φωτο 11.5** Επιμήκης ράχη θινών (dune ridge) σταθεροποιημένη με βλάστηση στις ανατολικές ακτές του Λακωνικού κόλπου, περιοχή Πλύτρα Λακωνίας.

των έμβρυο-θινών (embryo-dunes) (φωτο 11.4). Οι θίνες στα πρώτα στάδια του σχηματισμού τους μπορούν να καταστραφούν με την ίδια ευκολία με την οποία δημιουργήθηκαν. Η ανάπτυξη της βλάστησης παγιδεύει περισσότερη άμμο και επιτρέπει την περαιτέρω αύξηση των θινών τόσο σε ύψος, όσο και σε μήκος, σημαντικά πάνω και πέρα από το αρχικό εμπόδιο γύρω από το οποίο άρχισε να συσσωρεύεται η άμμος. Με τον τρόπο αυτό γειτονικές έμβρυο-θίνες μπορούν να ενωθούν και να σχηματίσουν μια επιμήκη ράχη θινών (dune ridge) κατά μήκος της ακτογραμμής στην προς την ξηρά πλευρά της ακτής (φωτο 11.5).

Οι θίνες χωρίς βλάστηση ονομάζονται ελεύθερες θίνες (free dunes) και είναι ευαίσθητες στις αλλαγές της

διεύθυνσης του ανέμου. Οι θίνες αυτές συχνά προσανατολίζονται σχηματίζοντας ορθές γωνίες με την επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου. Ο τρόπος όμως με τον οποίο διατάσσονται οι περισσότερες παράκτιες θίνες εξαρτάται από τη διάταξη της βλάστησης. Οι θίνες αυτές ονομάζονται θίνες εμποδίων (impeded dunes) και αναπτύσσονται σε διάφορες διευθύνσεις. Η ανάπτυξη βλάστησης στην επιφάνεια των θινών τις σταθεροποιεί, αφού εμποδίζει σε σημαντικό βαθμό τόσο την απώλεια της άμμου από αυτές, όσο και την μετανάστευσή τους προς το εσωτερικό της ξηράς. Ο προσανατολισμός των θινών εμποδίων είναι τέτοιος ώστε να ευθυγραμμίζονται περισσότερο με την πηγή από την οποία προέρχεται η άμμος, παρά με τη διεύθυνση πνοής του ανέμου.