

ΔΟΜΗ ΣΤΗΝ ΑΜΜΟ

Το ερώτημα, σχετικά με την εμφάνιση των κυματώσεων στην άμμο, είναι για μένα εξαιρετικά ενδιαφέρον. Κατά το παρελθόν είχα απασχοληθεί αρκετά με το ίδιο και παρόμοια ερωτήματα, αλλά το αποτέλεσμα της προσπάθειας κάθε άλλο παρά ανάλογο του χρόνου που διέθεσα ήταν. Κίνητρο ήταν η άμεση παρατήρηση των αμμορυτίδων μέσα στη θάλασσα: Σε βάθος από λίγα εκατοστά μέχρι αρκετά μέτρα παρατηρούμε συχνά παράλληλες οροσειρές από άμμο, αντίστοιχες με τις θίνες στην έρημο, που εκτείνονται σε αρκετή έκταση στον αμμώδη βυθό. Είναι πολύ ενδιαφέρον να βλέπει κανείς τη ρυθμική, σύμφωνα με την παλινδρομική κίνηση του νερού, αναρρίχηση των κόκκων της άμμου από τις πλαγιές στην κορυφή, στη συνέχεια την κάθοδό τους και αυτό να επαναλαμβάνεται συνέχεια, που δείχνει ότι ο μηχανισμός σχηματισμού και συντήρησής είναι ακριβώς η περιοδική κίνηση του νερού και οι στρόβιλοι που δημιουργούνται. (Παρόμοιοι σχηματισμοί εμφανίζονται και κατά τη ροή νερού σε αβαθή αυλάκια με πηλώδη βυθό. Οι «οροσειρές» είναι κάθετες στη ροή του νερού και οι πλαγιές τους δεν είναι συμμετρικές.) Επίσης είναι εντυπωσιακός ο διαχωρισμός, κάποιες φορές, των λίγων κόκκων μαύρης άμμου (άλλο πέτρωμα, διαφορετικό μέγεθος και βάρος;) που αυτόματα τοποθετούνται στην κορυφή της οροσειράς, σαν μια μαύρη κορυφογραμμή.

Ο προβληματισμός, για μια χοντροειδή ποσοτική προσέγγιση, ήταν για μένα έντονος. Αν τα ηλεκτρόνια, που κανείς δεν έχει δει, κινούνται στο σύρμα και το κάνουν να φωτοβολεί, αν τα μόρια του νερού, που κανείς δεν έχει δει, παίρνουν ενέργεια από τη θερμάστρα και δραπετεύουν, δεν μπορεί, οι κόκκοι της άμμου είναι ορατοί. Δεν χρειάζεται να καταφύγω σε «αόρατο» μοντέλο και να επιστρέψω στον ορατό κόσμο. Βλέπω πώς κινείται και αυτοοργανώνεται η άμμος - κάποια αρχή διατήρησης και νόμος Bernoulli θα αρκούν για να απαντήσουν σε ερωτήματα όπως:

Για αυτά τα κύματα και αυτό το βάθος και για αυτή την άμμο θα σχηματιστούν ρυτιδώσεις; Μια ή περισσότερες; Πόσο πλάτος θα έχουν; Πόσο ύψος;

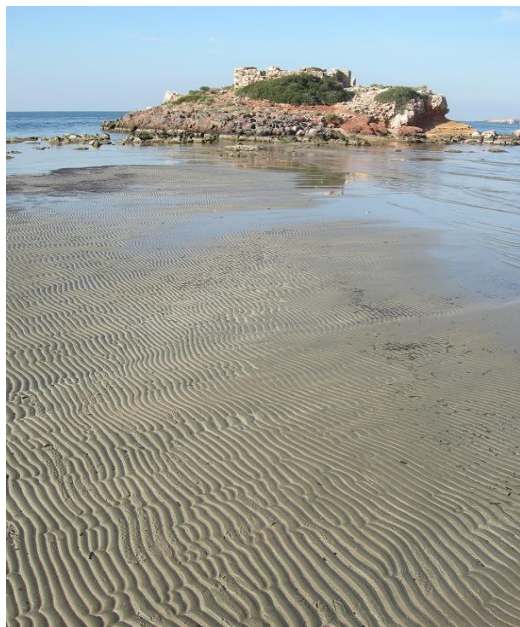
Η απάντηση δεν είναι απλή.

Στη βιβλιογραφία οι πάμπολλες αναφορές χωρίζονται στις εκλαϊκευμένες, που δεν δίνουν ποσοτικά στοιχεία και στις ερευνητικές όπου, μετά από μια θεωρητική μακροσκελή εισαγωγή και διαδοχικές προσεγγίσεις, τα συμπεράσματα είναι για μένα, συνήθως, δυσδιάκριτα.

Σε γενικές γραμμές η ταλάντωση του νερού πολύ κοντά στον πυθμένα προκαλεί την κίνηση και την αρχική συγκέντρωση κόκκων άμμου σε κινούμενες ραβδώσεις που εξελίσσονται σε σταθερούς κυματοειδείς σχηματισμούς. Οι στρόβιλοι, που επάγονται από την ροή του νερού πάνω από τις οροσειρές, συντηρούν τους σχηματισμούς αυτούς και μεταφέρουν άμμο από τις κοιλάδες στην κορυφή μέχρι η κλίση να αποκτήσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Το «μήκος κύματος» προβλέπεται ίσο με 1,3 φορές το πλάτος ταλάντωσης του νερού στην κορυφή του σχηματισμού. Και $h/\lambda = 0,25 \tan \phi$, όπου h το ύψος και $\tan \phi$ η μέγιστη κλίση. Η ροή κατά κανόνα θεωρείται τυρβώδης αν και προβλέπονται ρυτιδώσεις και σε στρωτή ροή.

Ένας άλλος σχηματισμός που μπορεί κανείς να προσέξει σε μια παραλία είναι ο εξής: Σε αμμώδη ακτή που όμως έχει και ψιλό βοτσαλάκι εμφανίζονται, στο όριο που η θάλασσα φθάνει στην άμμο, επιμήκη συσσωρεύματα από χοντρή άμμο, βότσαλα, φύκια κ.λ.π που είναι

κάθετα στην ακτογραμμή. Τα συσσωρεύματα αυτά (beach cusps) απέχουν μεταξύ τους λίγα μέτρα και το μέγεθός τους ποικίλει, ανάλογα με την παραλία. Δεν υπάρχουν σε κάθε αμμώδη



ακτή αλλά είναι ο κανόνας. Ενισχύουν την εντύπωση της «δαντελωτής» ακτής. Από πού προήλθαν αυτοί οι σχηματισμοί; Πώς τα κύματα της θάλασσας, αντί να ανακατεύουν και να ομογενοποιούν την άμμο, την ξεχωρίζουν σε λεπτή και χοντρή; Θα περιμέναμε αταξία και όχι τάξη.

Αν οι ρυτιδισμοί που αναφέρθηκαν παρουσιάζουν αρκετή δυσκολία για την ποσοτική τους εξήγηση, εδώ τα πράγματα είναι ακόμα πιο πολύπλοκα. Ο βασικός μηχανισμός, απ' ό,τι διαπίστωσα στη βιβλιογραφία, είναι, μάλλον, ο εξής: Κατά την ακτογραμμή και όταν ο πυθμένας βαθαίνει ομαλά, είναι δυνατόν να εμφανιστούν κύματα άκρης (edge waves). Αυτά κινούνται κατά μήκος της ακτογραμμής, έχουν μέγιστο πλάτος στα ρηγά που φθίνει στα βαθειά. Αποτελούν λύση της κυματικής εξίσωσης για επιφανειακά κύματα. Τα κύματα άκρης μπορούν να διεγερθούν (να πάρουν ενέργεια και να εμφανιστούν) από τα «συνήθη» κύματα που πέφτουν στην παραλία και δεν ανακλώνται. Διαδίδονται κατά μήκος της ακτογραμμής και έχουν τη μισή περίοδο από αυτή των προσπιπτόντων κυμάτων. Ερώτημα πρώτο: Πώς ένα κύμα που κατευθύνεται προς την ακτή δίνει γένεση σε κύμα άκρης που θα διαδοθεί κατά μήκος της ακτής; Ο μηχανισμός δεν είναι καθόλου απλός και σχετίζεται με μη γραμμική αλληλεπίδραση (όπως και όλα τα σχετικά φαινόμενα) μεταξύ των προσπιπτόντων κυμάτων και των κυμάτων άκρης. Ερώτημα δεύτερο: Πώς τα κύματα άκρης διαχωρίζουν την άμμο σε ψιλή και χοντρή; Αν δημιουργηθούν στάσιμα κύματα άκρης, τότε στους δεσμούς η άμμος θα αναταράσσεται λιγότερο ενώ στις κοιλίες το νερό θα αναβαίνει σε μεγαλύτερο ύψος θα παρασέρνει υλικό, εκεί θα απομένει η ψιλή άμμος. Στάσιμα κύματα άκρης μπορούμε να έχουμε όχι μόνο όταν μια ακτή περιορίζεται π.χ. με βράχια δεξιά και αριστερά (όπως σε κάθε περίπτωση στάσιμων κυμάτων) αλλά, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, μια καμπυλότητα της ακτογραμμής μπορεί να είναι συνθήκη για στάσιμο κύμα άκρης. Δύο δεσμοί προβλέπεται να απέχουν $gT^2(\sin\beta/\pi)$, όπου T η περίοδος του προσπιπτόντος και β η γωνία κλίση της ακτής.

Ας συμπληρώσουμε ότι η άμεση παρατήρηση δημιουργίας των παραπάνω σχηματισμών στη φύση είναι μάλλον αδύνατη. Δεν είναι εύκολο να δούμε τα στάδια εμφάνισης των

ρυτιδώσεων στον πυθμένα ή τη σταδιακή συσσώρευση της χοντλής άμμου σε ζώνες. Το «σήμα» είναι μικρότερο από το «θόρυβο». Τα βλέπουμε αφού έχουν σχηματιστεί.

Σε όλες τις μελέτες, πειραματικές και θεωρητικές, δεν αρκούν οι βασικές σχέσεις της υδροδυναμικής. Είναι απαραίτητοι αρκετοί εμπειρικοί νόμοι που ίσως μας ξενίζουν. Αν ήμασταν οι ειδικοί της άμμου ή αν ο πολιτισμός και η τεχνολογία μας είχε αναπτυχτεί στις αμμοθίνες, μεγέθη όπως η γωνία επανάθεσης (angle of repose) θα μας ήταν τόσο οικεία όσο και η ειδική αντίσταση του χαλκού.

Για τη μελέτη της ανάπτυξης και εξέλιξης πολύπλοκων συστημάτων (βιολογικών ή γεωφυσικών, γενικότερα συστημάτων που εξελισσόμενα εμφανίζουν δομή – όπως οι σχηματισμοί που αναφέρουμε εδώ) συχνά χρησιμοποιούνται μοντέλα που ονομάζονται κυψελοειδή αυτόματα (cellular automata). Ο χώρος διαμοιράζεται σε στοιχειώδεις διακριτές κυψελίδες που σε κάθε μια τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν παίρνουν διακριτές τιμές κάθε χρονική στιγμή. Π.χ. σε κάθε κυψελίδα μπορεί να υπάρχει ένας κόκκος άμμου, η ταχύτητα του νερού να έχει ορισμένη τιμή κ.λ.π. Με ένα σύνολο απλών και εύλογων κανόνων - οδηγιών για τον τρόπο αλληλεπίδρασης των κυψελίδων, προσπαθεί κανείς να μιμηθεί τη φυσική διαδικασία που τον ενδιαφέρει. Σε απλές περιπτώσεις οι κανόνες αυτοί μπορεί να είναι τα βήματα της αριθμητικής λύσης μιας διαφορικής εξίσωσης. Σε κάθε «τρέξιμο» του προγράμματος τα δεδομένα στις κυψελίδες επαναπροσδιορίζονται και σταδιακά το σύστημα αυτοοργανώνεται. Είναι ενδιαφέρον πώς λίγοι κανόνες επιτρέπουν την μίμηση της δομής που παρουσιάζουν πολύπλοκα συστήματα. Και αυτό γίνεται ορατό χάρη στους υπολογιστές. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές εργασίες στο πεδίο αυτό. Σε μια από τις παλαιότερες (SCIENCE vol. 260, 1993, 968-970) αναφέρεται η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου που επιτρέπει την επιτυχή ανάπτυξη των σχηματισμών που μας ενδιαφέρουν.

Τι σημαίνει αυτό; Η εφαρμογή των νόμων της υδροδυναμικής, το πλήθος των εμπειρικών σχέσεων και παραμέτρων και η επιλογή της κατάλληλης προσεγγιστικής μεθόδου πρέπει να είναι, για συγκεκριμένα ρεαλιστικά – καθημερινά προβλήματα, μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία. Τα cellular automata, που δεν αντικαθιστούν τους νόμους της φυσικής, παρέχουν μια απάντηση. Επιπλέον, οι επιλεγόμενοι κανόνες είναι απλοί και ελέγχονται άμεσα.

Ένας προβληματισμός: Το μοντέλο των cellular automata περιέχει την αριθμητική μέθοδο λύσης μιας διαφορικής εξίσωσης αλλά όχι και το αντίστροφο. Μήπως το μοντέλο αυτό είναι επαρκέστερο (θου Κύριε φυλακήν ...) για την περιγραφή της φύσης;

Στα παραπάνω φαινόμενα ένα ανοιχτό σύστημα παίρνει ενέργεια και με ένα πολύπλοκο τρόπο (η διάδοση κυμάτων πεπερασμένου ύψους, η τύρβη, οι εμπειρικοί τύποι για την εναπόθεση της άμμου είναι μη γραμμικές διαδικασίες) δημιουργεί δομή. Η δημιουργία δομής είναι φαινόμενο κοινό σε πολλούς τομείς. Και η ροή της άμμου έχει χρησιμοποιηθεί, λόγω της απλότητάς της, ως πρότυπο αυτοοργάνωσης.

Κάποιο παιδαγωγικό συμπέρασμα; Φαινόμενα άμεσης παρατήρησης στη φύση δεν έχουν άμεση ποσοτική προσέγγιση. Ο τρόπος εκδήλωσης των βασικών νόμων είναι κρυμμένος όχι μόνο στη δομή του πυρήνα αλλά, συχνά, σε καθημερινά φαινόμενα. «Φύσις κρύπτεσθαι φιλεί» και λόγω αδυναμίας μας αλλάζουμε μοντέλο (από εκείνο χρήσης των βασικών αρχών σε αυτό των cellular automata, π.χ. στην βιολογία, στην εξέλιξη των οικοσυστημάτων). Η ποιοτική και ολιστική προσέγγιση ίσως φανεί χρήσιμη και για τους μαθητές ενδιαφέροντα.