

ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΓΗΙΝΟΥ ΦΛΟΙΟΥ.

Ο στερεός φλοιός της Γης φαίνεται σταθερός, αν και αυτός όπως ήδη τονίστηκε είναι εύπλαστος και μεταβαλλόμενος. Πώς όμως μπορούν να γίνουν αντιληπτές κατά τη διάρκεια της σύντομης ανθρώπινης ζωής οι κινήσεις του στερεού φλοιού; Υπάρχουν αρκετά στοιχεία που να μας οδηγούν στην απόδειξη αυτών των κινήσεων; Τι είδους κινήσεις είναι και τι μεγέθους; Αυτά είναι μερικά λογικά ερωτήματα, ανάμεσα σε πολλά άλλα, που θα μπορούσαν να τεθούν εξαρχής από ένα μέσο μορφωμένο και σκεπτόμενο άνθρωπο.

Η τεκτονική παραμόρφωση που συμβαίνει στο φλοιό της Γης, κυρίως υπεύθυνη για τέτοιου είδους κινήσεις, είναι τόσο αργή, ώστε είναι ελάχιστες οι ευκαιρίες για άμεση παρατήρηση και μέτρησή της από τον άνθρωπο. Τα στοιχεία που έχουμε προέρχονται από σχετικά μικρές μετατοπίσεις που γίνονται αντιληπτές κοντά ή πάνω στην επιφάνεια της Γης. Τέτοιες μικρές μετατοπίσεις είναι επακόλουθα ισχυρών σεισμών, ηφαιστειακών εκρήξεων, κατολισθήσεων ή ερπυσμού και μπορούν να παρατηρηθούν και να μετρηθούν άμεσα. Οι πολύ μικρές και αργές κινήσεις τεκμηριώνονται με ακριβείς γεωδαιτικές μετρήσεις, καθώς και από ιστορικά και αρχαιολογικά ευρήματα ή από γεωλογικά δεδομένα. Έτσι, μπορεί να είναι οι αλλαγές του επιπέδου της θάλασσας, εδαφικές παραμορφώσεις, ανυψώσεις ακτών και βουνών, κατά βάθος έντονη διάβρωση κοιλάδων και χαραδρών, μετατοπίσεις μεγάλων τεμαχίων εκατέρωθεν ρηγμάτων και άλλα. Όλα αυτά τα στοιχεία είναι σημαντικά όταν ερμηνευθούν μέσα στο πλαίσιο των βασικών αρχών της γεωλογίας, του *ομοιομορφισμού* και του *ακτουαλισμού*, δηλαδή της διαρκούς αργής μεταβολής.

Οι ενδείξεις και οι αποδείξεις για τις πρόσφατες, αργές μετακινήσεις του γήινου φλοιού μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες: γεωλογικές, γεωφυσικές, αρχαιολογικές και γεωδαιτικές.

Ένα από τα γνωστότερα παραδείγματα αργής και σταθερής κατακόρυφης μεταβολής του φλοιού αποτελεί η Σκανδιναβία. Η ανύψωση της ευρύτερης περιοχής της Βαλτικής γίνεται με ρυθμό 10 χιλιοστών το χρόνο από το 6800 π. Χ. μέχρι σήμερα και αποτελεί κλασικό παράδειγμα ισοστατικής ρύθμισης σε μια «σταθερή» γεωλογικά περιοχή. Ουσιαστικά η Σκανδιναβική

χερσονήσος ανυψώνεται από τότε που έφυγε το βάρος του παγοκαλύμματος, όταν έλιωσαν οι παγετώνες της. Η ανύψωση είναι «τόσο γρήγορη», ώστε σε 1.000 χρόνια πολλά πλωτά ποτάμια που χρησιμοποιούσαν οι Βίκινγκς για να εισέρχονται χιλιόμετρα βαθιά στο εσωτερικό της χώρας, σήμερα έχουν δημιουργήσει μικρούς καταρράκτες, μεγάλες κλίσεις και δεν θυμίζουν τίποτα από την παλιά δυνατότητα πλεύσης, έστω και μικρών σκαφών. Εκτιμάται ότι η συνολική ανύψωση ολόκληρης της χερσονήσου σε 7.000 χρόνια είναι μέχρι και 8 μέτρα.

Ο Ρώσος γεωλόγος Mescherikov (1968), διατύπωσε τη θεωρία ότι οι περιοχές με τα αρχαιότερα πετρώματα του γήινου φλοιού, οι ονομαζόμενες κρατονικές ή πλατφόρμες, όπως η Σιβηρία ή ο Καναδάς, σεισμικές και «σταθερές», υπόκεινται σε διαρκείς κινήσεις. Οι περιοχές αυτές εμφανίζουν κυκλική ή «επεισοδιακή» ανύψωση και καταβύθιση με ρυθμούς μικρότερους από 1-10 χιλιοστά το χρόνο και με μήκη κυμάτων των κινήσεων που φτάνουν τις εκατοντάδες ως χιλιάδες χιλιόμετρα. Οι μεγάλοι μήκους κύματος, αργοί «κυματισμοί», επιδέχονται πολλές ερμηνείες, όπως τεκτονικές, ευστατικές ή ισοστατικές. Μπορεί να είναι και κινήσεις μιας διαρκώς παλλόμενης Γης, που φαίνεται σαν να αναπνέει. Ο γήινος φλοιός λοιπόν, παρουσιάζει ένα διαρκή «παλιρροϊκό κυματισμό», που δεν τον αντιλαμβανόμαστε, όπως ο αντίστοιχος της θάλασσας. Σύγχρονες μετρήσεις του γήινου βαρυτικού πεδίου με όργανα μεγάλης ακρίβειας (βαρυτόμετρα) τεκμηριώνουν καλά τις «παλίρροιες του γήινου φλοιού».

Πρόσφατες γεωλογικές και αρχαιολογικές μετρήσεις και η παρακολούθηση των αλλαγών του επιπέδου της θάλασσας (ανυψώσεις και καταβυθίσεις ακτών), έδωσαν επιπλέον στοιχεία ενισχύοντας το γεγονός των συνεχιζόμενων κινήσεων του γήινου φλοιού. Οι αργές και ξαφνικές μικρομετακινήσεις του φλοιού της Γης είναι από τα κύρια αντικείμενα έρευνας της γεωλογίας, σεισμολογίας και γεωδαισίας. Παρ' όλα αυτά, η αποδοχή του γεγονότος της κινητικότητας του φλοιού της Γης, δεν είναι καθολική. Για τον μη ειδικό είναι ιδιαίτερα δύσκολη η αποδοχή της, γιατί είναι βαθιά ριζωμένη στο υποσυνείδητο μας η αντίληψη της στερεάς αμετάβλητης γης. Γι' αυτό και την αποκαλούμε στη γλώσσα μας στεριά, δηλαδή στερεή, σταθερή.

Σήμερα πληθαίνουν οι αρχαιολογικές ενδείξεις για κινήσεις της στεριάς και για γνωστούς ή άγνωστους σεισμούς του παρελθόντος. Στην αρχαιολογική

βιβλιογραφία βρίσκουμε πολλές αναφορές για κτήρια και πόλεις, η καταστροφή των οποίων συνδέεται συχνά με φυσικά φαινόμενα, όπως σεισμοί, κατολισθήσεις ή ηφαιστειακές εκρήξεις, για βυθισμένα κτίσματα ή ανυψωμένα λιμάνια.

Μεγάλης σημασίας είναι οι καταστροφές αρχαίων κατασκευών που προκλήθηκαν από κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους. Αυτές ίσως προσδιορίζουν σεισμική δράση ή δραστηριοποίηση σεισμικών ρηγμάτων και μπορούν έτσι να βοηθήσουν ώστε να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα για γεωλόγους, σεισμολόγους και μηχανικούς, ώστε να κατανοηθούν καλύτερα οι ενεργές γεωλογικές διαδικασίες, κυρίως για ιστορικά και προϊστορικά σεισμικά γεγονότα. Από την άλλη, πολλά αρχαιολογικά στοιχεία δείχνουν αλλαγές του επιπέδου της θάλασσας, δηλαδή πολύ σημαντικές πληροφορίες για να κατανοήσουμε πρόσφατες κατακόρυφες κινήσεις του γήινου φλοιού, που δεν συνδέονται με σεισμούς.

Ένα από τα πιο γνωστά και πιο σημαντικά αρχαιολογικά παραδείγματα για την ανάδυση και τη βύθιση της ξηράς σε ένα «μικρό» σχετικά χρονικό διάστημα αποτελεί ο ναός του Σέραπη στο Pozzuoli κοντά στη Νάπολη της Ιταλίας. Στις κολόνες του ναού είναι σήμερα εμφανή, ανυψωμένα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, σημάδια οργανισμών που ζουν σε θαλάσσιο παλιρροιακό περιβάλλον, δηλαδή εκεί που «σπάει» το κύμα. Τα σημάδια πόρων βρίσκονται μέχρι και 5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, αλλά οι βάσεις των κιόνων είναι κάτω από το νερό. Φαινομενικά η περιοχή είχε βυθιστεί, στις κολόνες είχαν σχηματιστεί μικρές οπές, από τη θαλάσσια βιογενή δράση και μετά ο ναός επανυψώθηκε. Ο Charles Babbage (1847) πρώτος εξήγησε το φαινόμενο και το απέδωσε στην επίδραση της ηφαιστειακής δράσης, που ενεργούσε στα υποκείμενα πετρώματα, τα οποία προκαλούσαν άλλοτε βύθιση και άλλη φορά ανύψωση. Ο Vita-Finzi στο βιβλίο του «Πρόσφατες Κινήσεις της Γης, μια εισαγωγή στη Νεοτεκτονική» (1986) παραθέτει τέσσερις φωτογραφίες, οι οποίες δείχνουν προοδευτική ανύψωση του ναού σε χρονική περίοδο δύο ετών (1982-1984).

Στην Ελλάδα ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα σταδιακής βύθισης ακτής αποτελούν τα βυθισμένα θεμέλια παλαιοχριστιανικού ναού στην παραλία Κεχριών (Κορινθία, Σαρωνικός κόλπος), ως αποτέλεσμα πρόσφατης

τεκτονικής δράσης, τουλάχιστον 1500 χρόνων. Ένα δεύτερο εντυπωσιακό παράδειγμα προέρχεται επίσης από την ίδια περιοχή, συγκεκριμένα από τον Ισθμό της Κορίνθου, ο οποίος χωρίζει την κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα από την Πελοπόννησο. Εκεί υπάρχει μια αρχαία κατασκευή, από τον 4ο αιώνα π. Χ., ο Δίορκος (από το ρήμα *διελκείν*), ένας πέτρινος τεχνητός διάδρομος από τον Κορινθιακό κόλπο μέχρι το Σαρωνικό, από τον οποίο τα πλοία περνούσαν τον Ισθμό όταν δεν υπήρχε διώρυγα στα κλασικά και μέχρι τα ρωμαϊκά χρόνια, έτσι ώστε να αποφύγουν το χρονοβόρο περίπλου της Πελοποννήσου. Σήμερα ψαμμιτικά συμπαγή πετρώματα σε αμμώδεις παραλίες, γνωστά ως «beach rocks» (ψηφιδοπαγείς αιγιαλοί, τα γνωστά μας σε αμμώδεις ακτές συμπαγή ψαμμιτοειδή πετρώματα), που σχηματίζονται στα αβαθή των παραλιών, καλύπτουν ένα τμήμα του Διορκού σε ύψος μισού μέτρου πάνω από τη θάλασσα. Μια άλλη εμφάνιση του ίδιου πετρώματος, σε κοντινή απόσταση, είναι προσκολλημένη πάνω στο Δίορκο, σε ύψος 75 εκατοστά πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Η κάλυψη αυτής της αρχαίας κατασκευής με beach rocks μπορεί να αποδοθεί στην ανύψωση του εδάφους, λόγω αργών τεκτονικών ή ξαφνικών σεισμικών κυρίως, διεργασιών. Η ανύψωση της στεριάς στην Κόρινθο μετρείται με αρχαιολογικά και γεωλογικά δεδομένα σε $\frac{3}{4}$ του μέτρου σε διάστημα λίγο περισσότερο από 2.000 χρόνια και θεωρείται σημαντική.

Στη Φαλάσαρνα, στα δυτικά παράλια του νομού Χανίων, το Ρωμαϊκό λιμάνι της αρχαίας πόλης βρίσκεται σήμερα στην ενδοχώρα σε σημαντική απόσταση από την ακτή, υπερυψωμένο κατά 6 μέτρα περίπου. Εξαιρετικά μεγάλο μέγεθος για τη «σταθερή» ξηρά και για 1.700 χρόνια, αλλά απόλυτα δικαιολογημένη για τον ανήσυχο φλοιό της Κρήτης, όπως τον γνωρίζουμε σήμερα. Η ανύψωση αυτή μπορεί να συσχετίζεται με έναν από τους ισχυρότερους σεισμούς που έπληξαν το νοτιοδυτικό Αιγαίο, με σημαντικότερες καταστροφές κυρίως στην Κρήτη, το 365 μ.Χ., ή με περισσότερους σεισμούς ή και ασεισμικές ολισθήσεις στα μεγάλα ρήγματα που την περιβάλλουν.

Πολλά άλλα τέτοια παραδείγματα υπάρχουν για ολόκληρο το χώρο του Αιγαίου, που είναι μια περιοχή αρχαίου πολιτισμού και ταυτόχρονα βρίσκεται κάτω από έντονες σεισμικές, ηφαιστειακές και τεκτονικές διεργασίες. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί η Σαντορίνη (Θήρα), όπου υπάρχουν ενδείξεις σεισμών,

όπως οι χαρακτηριστικές σπασμένες σκάλες σε προϊστορική οικία του Ακρωτηρίου, που προηγήθηκαν της τελευταίας Μινωικής (1630 π. Χ.) μεγάλης ηφαιστειακής έκρηξης. Τα φαινόμενα αυτά εξετάζει συστηματικά ο νέος κλάδος της *Αρχαιοσεισμολογίας*, όπου διασταυρώνονται μέθοδοι, γνώσεις και τεχνικές της γεωλογίας, σεισμολογίας, αρχαιολογίας, ιστορίας, τοπογραφίας και μηχανικής.

Η Γεωδαισία είναι η επιστήμη που μελετά το σχήμα της Γης στο σύνολό της, αλλά και τις μεταβολές του τοπικά, επίσης εξετάζει εδαφικές μικρομετακινήσεις με ακριβείς ενόργανες μετρήσεις. Οι γεωδαιτικές μέθοδοι παρέχουν σημαντικά στοιχεία για τις σύγχρονες κινήσεις του φλοιού. Οι γεωδαίτες έχουν τεκμηριώσει τη διεύθυνση και τη σημασία μικρών κινήσεων του φλοιού από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σταθερών σημείων. Η παραμόρφωση μιας ενεργού δομής είναι μετρήσιμη, όταν ο ρυθμός της κίνησής της είναι μεγαλύτερος του σφάλματος των οργάνων παρατήρησης. Συνήθως οι κινήσεις αυτές σε μεμονωμένα σεισμικά ρήγματα είναι της τάξης 1-10 χιλιοστών το χρόνο (mm/yr). Οι τεχνικές μετρήσεων που χρησιμοποιούνται σήμερα στη γεωδαισία διακρίνονται σε *τεχνικές εδάφους* και σε *διαστημικές τεχνικές*. Από τις τεχνικές εδάφους που χρησιμοποιούν οι τοπογράφοι είναι οι κλασικές, όπως ο τριγωνισμός, η χωροθέτηση με το όργανο *θεοδόλιχο*, ενώ σήμερα έχουν εισαχθεί τα όργανα ακριβείας ακτίνων Laser.

Οι διαστημικές γεωδαιτικές τεχνικές είναι η *Συμβολομετρία Μεγάλης Βάσης*, η οποία στηρίζεται σε παρατηρήσεις φάσεων συχνοτήτων κυμάτων πολύ απομακρυσμένων αστέρων (Quasars), η *Μέτρηση αποστάσεων από/προς τεχνητούς δορυφόρους* και το *Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης*, γνωστό με τα αρχικά GPS. Στο γεωδαιτικό προσδιορισμό μιας θέσης στην επιφάνεια της Γης χρησιμοποιούνται σήμερα περισσότεροι από 40 δορυφόροι, τροχιάς περίπου 20.000 χιλιόμετρα από την επιφάνεια του πλανήτη μας. Η Γεωδαισία και ιδιαίτερα η εφαρμογή της στην τεκτονική είναι μόνο μια από τις χρήσεις του συστήματος GPS. Οι τεχνικές αυτές είναι σήμερα ικανές να παρατηρήσουν την απόσταση μεταξύ σημείων στην επιφάνεια της Γης, σε παγκόσμια κλίμακα, με ακρίβεια εκατοστού ή και μικρότερη και να τεκμηριώσουν μετακινήσεις λιθοσφαιρικών πλακών ή μεγάλων τεκτονικών κομματιών του φλοιού.

Οι σημαντικότερες και ισχυρότερες κινήσεις του γήινου φλοιού συμβαίνουν στα περιθώρια των πλακών της λιθόσφαιρας: σεισμοί, ηφαιστειακές εκρήξεις, εκτεταμένες ανυψώσεις και καταβυθίσεις, πολύπλοκες περιστροφές και παραμορφώσεις τμημάτων του γήινου φλοιού, που οριοθετούνται από ρήγματα. Επίσης ανιχνεύονται οριζόντιες κινήσεις, κατά μήκος μεγάλων ρηγμάτων, στο εσωτερικό των ηπείρων. Όλα αυτά τα δεδομένα ενισχύουν επιπλέον την άποψη ότι οι λιθοσφαιρικές πλάκες δεν είναι τέλεια άκαμπτα σώματα, αλλά ότι και η ενδοχώρα τους βρίσκεται σε «συνεχή παραμόρφωση».

Η τεχνική της Διαφορικής Συμβολομετρίας (Differential SAR Interferometry) είναι μια από τις πιο πρόσφατες και επαναστατικές δορυφορικές μεθόδους που ανιχνεύουν μικρομετακινήσεις και μικροπαραμορφώσεις της γήινης επιφάνειας. Βασίζεται στον προσδιορισμό σχετικών μεταβολών του αναγλύφου μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων ενός τόπου από διαστημικά ραντάρ. Για την εφαρμογή αυτής της τεχνικής επιλέγονται κατάλληλες «δορυφορικές εικόνες». Συγκεκριμένα, επιλέγονται ζεύγη εικόνων, όπως για παράδειγμα «εικόνες ραντάρ» πριν και μετά από ένα σεισμό, για να μελετηθούν οι εδαφικές παραμορφώσεις που συνέβησαν λόγω του σεισμικού γεγονότος. Η μέθοδος εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στο σεισμό του Landers, μεγέθους 7,4, στις Δυτικές ΗΠΑ, που συνέβη την 28η Ιουνίου 1992, με εντυπωσιακά αποτελέσματα και έκτοτε αποτελεί μια από τις πλέον βασικές μεθόδους, που εφαρμόζεται σε κάθε μεγάλο σεισμό, ο οποίος εκδηλώνεται στην ξηρά. Δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε σεισμούς που συμβαίνουν σε θαλάσσιους χώρους. Επιπλέον η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη στον εντοπισμό μεταβατικών πεδίων παραμόρφωσης, στο ενδιάμεσο μεταξύ δύο σεισμών στο ίδιο ρήγμα ή σε γειτονικά ρήγματα, σε κατολισθήσεις και καθιζήσεις εδαφών.

Η συνδυασμένη χρήση δορυφορικής γεωδαισίας, συμβολομετρίας με εικόνες ραντάρ, γεωλογικών και γεωδαιτικών μετρήσεων εδάφους έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας τόσο στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, στην Γαλλία, στην Ιταλία, στην Ιαπωνία και επεκτείνεται παγκόσμια. Στην Ελλάδα παρόμοιες τεχνικές εφαρμόστηκαν δειλά μετά τους σεισμούς της Κοζάνης-Γρεβενών το 1995 και της Αθήνας το 1999. Το κύριο εργαλείο της διαστημικής γεωδαισίας είναι η εγκατάσταση και

λειτουργία ενός πυκνού δικτύου σταθμών προσδιορισμού της γεωγραφικής θέσης (GPS) επί σειρά ετών. Τα δίκτυα αποτελούνται από πολλούς επίγειους σταθμούς, όπου η συνεχής λειτουργία τους διασφαλίζει μετρήσεις υψηλής ποιότητας.

Τι γνωρίζουμε όμως για τη δομή αυτού του κινητικού φλοιού και για το εσωτερικό του πλανήτη μας; Πώς επιτεύχθηκε η ακτινοσκόπηση της Γης;

Ακτινογράφιση της δομής της Γης με τα σεισμικά κύματα.

Μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα δεν είχαμε σαφή αντίληψη της δομής της γήινης σφαίρας μας. Αγνοούσαμε πλήρως τι υπάρχει και τι συμβαίνει κάτω από τα πόδια μας, εκτός από λίγες εκατοντάδες μέτρα που σκάφθηκαν για μεγάλα τεχνικά έργα, από σπήλαια και ορυχεία και από πολλές αλλά αβαθείς σχετικά γεωτρήσεις των 100, 300 και 500 μέτρων, από αρκετές των 3 έως 5 χιλιομέτρων και πολύ λίγων βαθιών μέχρι και 12 χιλιομέτρων, απ' όπου αντλούνταν ορισμένες άμεσες πληροφορίες για το πολύ αβαθές «εσωτερικό» της Γης.

Ένα από τα βασικότερα ερωτήματα που απασχολούσαν τους γεωεπιστήμονες στις αρχές του 20ου αιώνα ήταν το πρόβλημα της δομής του εσωτερικού του πλανήτη μας, για το οποίο δεν είχαν καμιά άμεση παρατήρηση. Τη λύση αυτού του προβλήματος την πέτυχαν σε σημαντικό βαθμό με τη βοήθεια των σεισμικών κυμάτων, όταν κατόρθωσαν να τα καταγράψουν με ειδικά όργανα τους σειсмоγράφους. Η τοποθέτηση σειсмоγράφων και η ανάπτυξη τους σε δίκτυα παρατήρησης άρχισε ουσιαστικά στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, σε πανεπιστήμια, σε μεγάλα ινστιτούτα αστρονομίας, μετεωρολογίας και γεωφυσικής στις πλούσιες χώρες. Τα περιορισμένα αυτά δίκτυα σειсмоγράφων γρήγορα απέδωσαν καρπούς. Η πρώτη σημαντική παρατήρηση έγινε από το Γερμανό επιστήμονα E. von Rebeur Paschwitz, ο οποίος διαπίστωσε ότι τα σεισμικά κύματα διαδίδονται στο εσωτερικό ολόκληρης της Γης. Καταγράφονται δηλαδή σεισμοί από πολλά σεισμολογικά κέντρα σε όλο τον κόσμο, μετά από ένα χρονικό διάστημα μετά τη γένεση τους, όσο χρόνο δηλαδή έκαναν να τρέξουν από την σεισμική πηγή από την οποία δημιουργήθηκαν, μέχρι εκεί που καταγράφηκαν από σειсмоγράφους. Το χρονικό αυτό διάστημα είναι συνάρτηση της

απόστασης, και όχι μόνο, από την εστία του σεισμού. Αυτή ήταν μια πολύ σημαντική παρατήρηση, που έδωσε την ιδέα για την ακτινογράφιση της Γης στο σύνολό της.

Τι είναι όμως τα σεισμικά κύματα, που καθημερινά και αδιάκοπα διατρέχουν τον πλανήτη μας, και μόλις στην τελευταία εκατονταετία καταγράφηκαν και αρχίσαμε να τα κατανοούμε; Οι σεισμολόγοι τα διακρίνουν σε *κύματα χώρου* και *επιφανειακά κύματα*.

Τα πετρώματα του εσωτερικού της Γης έχουν ελαστικές ιδιότητες όπως προαναφέρθηκε, που τα επιτρέπουν να παραμορφώνονται και να δονούνται, όταν ασκούνται πάνω τους δυνάμεις και τα πιέζουν. Όταν προκληθεί μια ξαφνική διαταραχή σε ένα ελαστικό και ισότροπο μέσο απείρων διαστάσεων, παράγονται δύο είδη ελαστικών κυμάτων, που ελευθερώνουν αυτές τις πιέσεις, τα *επιμήκη κύματα* και τα *εγκάρσια*, αυτά είναι που ονομάζονται κύματα χώρου. Όταν, όμως, το ελαστικό μέσο δεν επεκτείνεται στο άπειρο προς όλες τις διευθύνσεις, αλλά περιορίζεται από ορισμένη επιφάνεια, όπως είναι η επιφάνεια της Γης, αναπτύσσεται και ένα άλλο είδος ελαστικών κυμάτων από τα προηγούμενα επιμήκη και εγκάρσια κύματα, τα *επιφανειακά κύματα*, τα οποία και αυτά με τη σειρά τους διακρίνονται σε άλλα είδη κυμάτων (Rayleigh, Love και σε κύματα Stonley). Τα επιφανειακά δηλαδή κύματα δεν είναι πρωτογενή, δεν παράγονται στη σεισμική πηγή, αλλά είναι δευτερογενή δημιουργήματα λόγω της πολυπλοκότητας των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού και με τη σειρά τους γίνονται κι αυτά πολύπλοκα κύματα.

Κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων, τα υλικά σημεία των πετρωμάτων του φλοιού, ταλαντώνονται κατά διεύθυνση παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, δηλαδή προς τη διεύθυνση της σεισμικής ακτίνας και μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργούνται διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα της ύλης εμπρός και πίσω, με συνέπεια την παροδική διαδοχική αύξηση και ελάττωση της πυκνότητας του μέσου. Είναι εκείνα τα κύματα που αντιλαμβανόμαστε πρώτα μετά τη γένεση ενός σεισμού, κινούν τα υλικά πέρα-δώθε και ονομάζονται επιμήκη. Είναι το πρώτο κούνημα ενός σεισμού, όπως το περιγράφουν όσοι τον αισθάνονται. Τα επιμήκη ή κύματα αραιώσης-συμπίεσης είναι παρόμοια με τα ακουστικά κύματα που

διαδίδονται στον αέρα και δονούν τα μόρια του εμπρός-πίσω κατά τη διεύθυνση διάδοσης τους.

Σε ελαστικά και ισότροπα μέσα, τα επιμήκη κύματα διαδίδονται με ταχύτητες, που κυμαίνονται από 5 μέχρι και 10 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο. Στα πολύ επιφανειακά πετρώματα τρέχουν με 5-6 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο, ενώ στα βαθύτερα και πυκνότερα στρώματα αποχτούν μεγαλύτερες ταχύτητες. Τις μεγαλύτερες τους ταχύτητες που φτάνουν τα 10-11 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο αποχτούν στο πυρήνα της Γης. Γενικά η ταχύτητά τους εξαρτάται από την πυκνότητα και το είδος των πετρωμάτων, τις πιέσεις που εξασκούνται σ' αυτό και τις χημικές μεταβολές που παθαίνει. Τα επιμήκη κύματα παριστάνονται στη Σεισμολογία με το σύμβολο P (Primus-πρώτα), επειδή φθάνουν σε ορισμένο σεισμολογικό σταθμό και αναγράφονται πρώτα αυτά από τα σεισμόμετρά του.

Οι αυτόπτες μάρτυρες των σεισμών συνήθως περιγράφουν την δεύτερη ισχυρότερη δόνηση, γιατί αυτήν αντιλαμβάνονται δυνατότερα. Τα κύματα αυτά που φθάνουν αργότερα και αναγράφονται στους σειсмоγράφους είναι τα εγκάρσια (S) ή δεύτερα (Secuntus), αν και παράγονται ταυτόχρονα με τα επιμήκη κύματα στην εστία του σεισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα διάδοσης των επιμήκων κυμάτων είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων και των επιφανειακών κυμάτων. Τα επιμήκη κύματα λοιπόν ταξιδεύουν γρηγορότερα.

Κατά τη διάδοση των εγκάρσιων (S) κυμάτων τα υλικά σημεία των πετρωμάτων, όπου διαδίδονται τα κύματα, κινούνται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε τα πετρώματα να παθαίνουν διαμητική παραμόρφωση, δηλαδή, η κίνηση του υλικού γίνεται πάνω-κάτω κάθετα στη διάδοση των κυμάτων. Είναι αυτά τα κύματα που μεταφέρουν το μεγαλύτερο ποσό της σεισμικής ενέργειας, κραδαίνουν τα πετρώματα και τα νιώθουμε πολύ έντονα μετά την πρώτη δόνηση, ταλαντώνουν και παραμορφώνουν τα κτίρια μας και προκαλούν τις περισσότερες και πιο ουσιαστικές ζημιές. Με αυτά τα κύματα, όταν διαπερνούν τα οικοδομήματα και τα σώματά μας, ο σεισμός φτάνει στο μέγιστο της απόδοσης του, ο φόβος μας στο ζενίθ και οι ψυχικές μας αντοχές στα όριά τους. Είναι τα φαρμακερά κύματα κάθε σεισμού.

Η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων ελαστικών κυμάτων μέσα στο φλοιό κυμαίνεται από 3 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο στην επιφάνεια μέχρι 7,2

χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο στο όριο μανδύα-πυρήνα και μηδενίζεται στα ρευστά (υγρά, αέρια), δηλαδή δεν διαδίδονται εγκάρσια κύματα μέσα στα υγρά. Τα καταστροφικά, λοιπόν, εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται στην θάλασσα, στις λίμνες, στην ατμόσφαιρα, παρά μόνο εκτονώνονται στη σταθερή μας στεριά! Ένας σεισμός ολοκληρώνεται με τα επιφανειακά του κύματα που παράγονται κοντά στην επιφάνεια της Γης και διαδίδονται μόνο στο στερεό φλοιό.

Η πρώτη μεγάλη επιτυχία χρησιμοποίησης σεισμικών κυμάτων στην ακτινοσκόπηση της Γης ήταν όταν ερμηνεύτηκε ο χρόνος που απαιτείται για τη διάδοση των P και S κυμάτων, από τη μια άκρη της Γης στην άλλη. Με κατάλληλα σειсмоγραφήματα ο Ιρλανδός γεωλόγος Oldham, το 1906, υπολόγισε και σχεδίασε τις χρονικές διαδρομές των σεισμικών κυμάτων P και S σε σχέση με τις γωνιακές αποστάσεις σεισμικής πηγής και θέσης καταγραφής τους. Εξήγησε τη μεταβολή στη συμπεριφορά των κυμάτων S υποθέτοντας ότι στο μακρύ ταξίδι τους στο εσωτερικό της Γης είχαν διεισδύσει πρώτα σε έναν κεντρικό πυρήνα, μέσα στον οποίο διαδίδονταν με μικρότερους ρυθμούς και μετά αναπήδησαν υπό γωνία προς την επιφάνεια. Ουσιαστικά βρήκε και προσδιόρισε ένα εμπόδιο διάδοσης τους, μια λίγο πολύ σφαιρική επιφάνεια που διαμορφώνει το πυρήνα. Σήμερα διαθέτουμε πολύ περισσότερα δεδομένα για τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης και διακρίνουμε τον πυρήνα σε *εξωτερικό* και *εσωτερικό*. Η συμβολή της γεωφυσικού Λέμαν (Inge Lehman) από τη Δανία το 1936 ήταν καθοριστική γι' αυτόν το διαχωρισμό, για αυτό η επιστημονική κοινότητα την τίμησε δίνοντας το όνομα της στη διαχωριστική επιφάνεια εσω και εξω-πυρήνα. Τα κύματα S, που ως γνωστό δεν διαδίδονται στα υγρά, δεν διαπερνούν και τον εξωτερικό πυρήνα, γι' αυτό πιστεύουμε ότι αυτός είναι «υγρός», ενώ ο εσωτερικός «στερεός». Υγρός και στερεός, δύο ατυχείς λέξεις, που δεν μπορούν να περιγράψουν την κατάσταση της ύλης στο εσωτερικό της Γης και φυσικά χάνουν τις έννοιες τους, όπως τις γνωρίζουμε για τις επιφανειακές φυσικοχημικές συνθήκες.

Στη συνέχεια ο Αμερικανός σεισμολόγος Γκούτεμπεργκ (Beno Gutenberg 1889-1960) παρατήρησε ότι τα P κύματα ήταν δυνατό να ανιχνευθούν καλά μέχρι μια επίσης ορισμένη απόσταση, μετά την οποία η ενέργεια τους εξασθενούσε γρήγορα. Επίσης, τα σειсмоγραφήματα

παρουσίαζαν κυματικές αφίξεις με καθυστέρηση έως και ένα λεπτό, σε σχέση με τα αναμενόμενα απευθείας P κύματα, δηλαδή κάποια άλλα P κύματα έφταναν σε απομακρυσμένους σεισμολογικούς σταθμούς πολύ καθυστερημένα. Ακόμη παρατήρησε και κύματα που ήταν δυνατό να εξηγηθούν και σαν ανακλώμενα από το όριο του υγρού πυρήνα. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Τα υλικά του εσωτερικού της Γης είναι περισσότερο συμπιεσμένα προς το κέντρο, λόγω της μεγάλης μάζας που υπάρχει από πάνω τους. Έτσι οι ταχύτητες των P και S κυμάτων αυξάνουν όσο μεγαλώνει το βάθος από την επιφάνεια προς το κέντρο της Γης. Αυτή η αύξηση της ταχύτητας με το βάθος στρεβλώνει τις διαδρομές των σεισμικών κυμάτων, ώστε να βυθίζονται και να διαθλώνται, με τελικό προορισμό να αναδύονται προς την επιφάνεια της Γης. Από τις στρεβλωμένες διαδρομές των σεισμικών κυμάτων, ένας Κροάτης γεωφυσικός, ο Μοχοροβίτσιτς (Α. Mohorovicic 1857-1936) βρήκε κάτω από τα πόδια μας και σε σχετικά μικρά βάθη, 30-40 χιλιόμετρα, ένα όριο ή σύνορο. Θεώρησε ότι αυτό πρέπει να ήταν το κατώτερο όριο των πετρωμάτων του γήινου φλοιού. Το σύνορο αυτό επιβεβαιώθηκε αργότερα από πολλές άλλες ανάλογες και ακριβέστερες παρατηρήσεις, και ονομάστηκε προς τιμήν του όριο ή ασυνέχεια **Moho**, το οποίο αν και είναι πολύ ρηχό κάτω από τους ωκεανούς, περίπου 5 χιλιόμετρα, φτάνει τα 60 με 70 χιλιόμετρα στις ρίζες των ψηλών βουνών.

Η ερμηνεία των ποικίλων σεισμικών κυμάτων που μπορεί να γίνει κατανοητή έδωσε τη δυνατότητα για να ακτινογραφηθεί ο πλανήτης με τα σεισμικά κύματα εκατοντάδων σεισμών, να προταθεί ένα μοντέλο της δομής της Γης και να κατανοηθεί το εσωτερικό της. Αυτό ήταν ένα μεγάλο άλμα στην ανθρώπινη σκέψη και κατανόηση του περιβάλλοντός μας. Για πρώτη φορά στο πρώτο τέταρτο του 20^{ου} αιώνα, ο άνθρωπος άρχισε να γνωρίζει τα θεμέλια του ευρύτερου οίκου του.

Η δομή του εσωτερικού της Γης.

Για το εσωτερικό της Γης, οι γεωεπιστήμονες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι αποτελείται από τέσσερα κελύφη, τις ονομαζόμενες γεώσφαιρες: το φλοιό, το μανδύα, τον εξωτερικό πυρήνα και τον εσωτερικό πυρήνα.

Ο **φλοιός της Γης** είναι το εξωτερικό «στρώμα» του πλανήτη μας, η στερεά του κρούστα. Το πάχος αυτής της κρούστας που πατάμε είναι μάλλον μικρό, κατά μέσο όρο 20 με 30 χιλιόμετρα μόνο. Δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλη την έκταση του πλανήτη, κυμαίνεται από 30 έως 60 χιλιόμετρα κάτω από τις ηπείρους και 5 έως 10 χιλιόμετρα κάτω από τους ωκεανούς. Είναι δηλαδή ένα λεπτότατο «στρώμα», σε σχέση με τα 6.380 χιλιόμετρα της ακτίνας της Γης. Αναλογικά ο φλοιός είναι λεπτότερος από τη φλούδα ενός μήλου, την επιδερμίδα μας ή ενός φουσκωμένου ελαστικού μπαλονιού διαμέτρου 2 μέτρων, με πάχος 2 χιλιοστών. Αποτελεί μόλις το 0,3% του όγκου του πλανήτη. Έχει όμως πολύπλοκη εσωτερική δομή, ίσως πολυπλοκότερη από όλες της άλλες γεώσφαιρες. Φαίνεται ότι όλες οι κινήσεις των άλλων γεωσφαιρών εκδηλώνονται, ξεσπούν και αποτυπώνονται στο λεπτό φλοιό.

Μολονότι ζούμε πάνω στο φλοιό της Γης και μπορούμε να πάρουμε δείγματά του, είτε από την επιφάνεια, είτε με διάνοιξη ορυγμάτων ή γεωτρήσεων για να προσδιορίσουμε το πάχος του, είμαστε αναγκασμένοι να βασιστούμε και πάλι σε σεισμικά στοιχεία για την κατανόηση της δομής και της λειτουργίας του.

Σε γενικές γραμμές ο ηπειρωτικός φλοιός, κυρίως στα θεμέλια του, αποτελείται από *πυριγενή* πετρώματα χαμηλής πυκνότητας με μέση σύνθεση ενδιάμεση εκείνης του γρανίτη και του βασάλτη. Οι «*γρανίτες*» είναι τα σημαντικότερα πετρώματα από πλευράς όγκου στα ανώτερα στρώματα του ηπειρωτικού φλοιού και καλύπτονται από πολλά *ιζηματογενή* πετρώματα, που σχηματίζουν μια σχετικά λεπτή επίστρωση στην επιφάνεια.

Η πετρολογική σύσταση του ωκεάνιου φλοιού παρουσιάζει μικρότερη ποικιλία, συνίσταται κυρίως από «βασαλτικής» σύστασης πετρώματα, αντίστοιχα δηλαδή με τον επιφανειακό ηφαιστειακό πέτρωμα *βασάλτη*. Τα υλικά του ωκεάνιου φλοιού είναι λίγο πυκνότερα από εκείνα του ηπειρωτικού φλοιού, γιατί περιέχουν μεγάλη ποσότητα σιδήρου, που είναι ένα πυκνό στοιχείο και λιγότερο πυρίτιο, το οποίο είναι ελαφρύτερο. Η αναλογία αυτή στην πυκνότητα ηπειρωτικού και ωκεάνιου φλοιού παίζει καθοριστικό ρόλο στη συνολική κινητικότητα του γήινου φλοιού. Η ηλικία του πλανήτη φαίνεται στο φλοιό του, την «επιδερμίδα» του. Το λεπτό αυτό στρώμα δείχνει ότι κουβαλάει πολλά χρόνια πάνω του. Μέχρι πρόσφατα την ηλικία του

πρωτοφλοιού την υπολόγιζαν σε 3,5 με 4 δισεκατομμύρια χρόνια. Οι έρευνες συνεχίζονται και προσκομίζουν συνεχώς νέα στοιχεία. Φαίνεται πως ο πλανήτης μας διέθετε φλοιό στα πολύ αρχικά του στάδια. Αυτό προκύπτει από πρόσφατα (2006) αποτελέσματα, όπως για παράδειγμα από έρευνες του Ινστιτούτου Τεχνολογίας του Τόκιο σε κρυστάλλους ζirkονίου της Αυστραλίας και Καναδά, που τα ανακοίνωσε στο περιοδικό Nature. Τουλάχιστον στα 4,2 δισεκατομμύρια χρόνια υπήρχε η πρωταρχική κρούστα, μόλις μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια από τότε που πιστεύουμε ότι πρωτοδημιουργήθηκε ο πλανήτης μας. Αυτά τα νέα επιστημονικά στοιχεία θέτουν καινούρια προβλήματα για την αρχική δομή και στρωμάτωση του πλανήτη Γη.

Ο **μανδύας της Γης** εκτείνεται από τη βάση του φλοιού και μέχρι βάθος 2.885 χιλιόμετρα. Ο μανδύας διακρίνεται στο ανώτερο τμήμα του που φτάνει μέχρι τα 660 χιλιόμετρα βάθος και στο κατώτερο, μέχρι τον πυρήνα. Ένα σημαντικό στρώμα, η μεσόσφαιρα, στον κατώτατο μανδύα και πριν τον πυρήνα, φαίνεται ότι παίζει σημαντικό ρόλο στην κινητικότητα και την παραμόρφωση του ανώτερου μανδύα, που δεν έχει διερευνηθεί και κατανοηθεί ακόμη. Από εκεί φαίνεται ότι ξεκινούν μικρομετακινήσεις μανδουακού υλικού, που γίνονται μεγάλες με το πέρασμα εκατομμυρίων χρόνων και φτάνουν μέχρι την λιθόσφαιρα. Γενικά η συμπεριφορά του μανδύα με αργές, αλλά σταθερές για μεγάλα γεωλογικά χρονικά διαστήματα κινήσεις παίζει σημαντικότατο ρόλο στον τρόπο εξέλιξης του λεπτού φλοιού και ουσιαστικά δίνει τον τόνο και ρυθμό των γνωστών μας γεωλογικών διεργασιών. Αποτελείται από πυριτικά πετρώματα μεγάλης πυκνότητας. Τα σεισμικά κύματα P και S διαπερνούν όλα σχεδόν τα τμήματά του, γεγονός που αποδεικνύει ότι ο μανδύας είναι «στερεός» και συνεκτικός, τουλάχιστον για μικρές χρονικές κλίμακες. Υπάρχουν όμως ενδείξεις ότι ακόμη και τα πετρώματα του μανδύα «ρέουν» αργά σε μακροχρόνιες γεωλογικές περιόδους εκατομμυρίων ετών, λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών και πιέσεων που επικρατούν σ' αυτόν. Οι «ροές» αυτές ονομάζονται ρεύματα μεταφοράς του μανδύα. Αποτελούν τις σημαντικότερες διεργασίες της κινητικότητας του σώματος του πλανήτη μας.

Από φυσική άποψη γενικά τα υλικά που συνιστούν τη Γη είναι συνεχή σώματα και υπόκεινται σε κινήσεις, όταν τα διαφορετικά τμήματά τους

αλλάζουν τις σχετικές τους θέσεις. Τέτοιες σχετικές μεταβολές έχουν ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση και τη ροή της ύλης. Τα πετρώματα γενικά είναι «ρευστά» με την έννοια που είναι «ρευστό» το γυαλί στα παράθυρά μας. Όσο και αν μας φαίνεται παράξενο τα γυαλιά, κάτω από τη διαρκή έλξη της βαρύτητας, μετακινούν αργά, αλλά σταθερά υλικό στη βάση τους. Πολλά βιτρώ ευρωπαϊκών ναών ήταν παχύτερα και πυκνότερα στη βάση τους. Με αυτή την έννοια, σε συνάρτηση με το χρόνο και σε επιφανειακές συνθήκες ακόμη, το γυαλί μπορεί να χαρακτηριστεί ρευστό.

Οι διαδικασίες της παραμόρφωσης και της αργής ροής των υλικών του φλοιού και του μανδύα, είναι πολύ διαδεδομένες στο εσωτερικό της Γης. Περιγράφονται από τις ανερχόμενες δομές ή καλύτερα ροές προς τα πάνω, που μοιάζουν σαν μανιτάρια ή ανερχόμενες φουσαλίδες σαν λοφία (plumes). Το φαινόμενο αυτό, όταν παρατηρείται στα επιφανειακά πετρώματα, ονομάζεται γενικά διαπειρισμός. Ο όρος *διάπειρο* (diapir), που προέρχεται από το ελληνικό ρήμα διαπερνώ, έχει εισαχθεί στη γεωλογική ορολογία από τον γεωλόγο Mrazec (1915) για να περιγράψει τα διεισδυτικά αλατούχα σώματα (γύψος, ορυκτό αλάτι), μέσα στους πυρήνες των βουνών. Ο όρος χρησιμοποιήθηκε με γενικότερη έννοια για μάζες πετρωμάτων οποιασδήποτε κατηγορίας, οι οποίες εισχωρούν μέσα από τα πετρώματα, που τα επικαλύπτουν, και σφηνώνονται μέσα σε αυτά. Τα *διάπειρα* αυτά, εκτός από την σημαντική οικονομική τους σημασία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για περιβαλλοντικούς σκοπούς, αφού τα πυρηνικά απόβλητα είναι δυνατό να αποθηκευτούν μέσα σε αυτά. Οι *δόμοι άλατος* μπορούν να παγιδεύσουν τα παραπάνω προϊόντα στο ανώτατο μέρος τους, όταν βέβαια πάνω από αυτούς υπάρχει αδιαπέραστο κάλυμμα. Στην Ελλάδα το φαινόμενο του *διαπειρισμού* έχει εκδηλωθεί στο δυτικό τμήμα της χώρας, όπου παρουσιάζονται κοιτάσματα εβαποριτών (γύψου, αλατιού) μεγάλου πάχους, που συχνά βρίσκονται και ενδιάμεσα στα νεότερα στρώματα της Ιονίου ζώνης (Ήπειρος, Δυτική Στερεά και Πελοπόννησος). Για να ξεκινήσει η διαδικασία του διαπειρισμού θα πρέπει να πληρούνται τρεις προϋποθέσεις. Αρχικά, θα πρέπει να υπάρχει ένα στρώμα ή μία ζώνη μέσα στην οποία το υλικό να έχει μικρότερη πυκνότητα από αυτήν των πετρωμάτων που το επικαλύπτουν. Μία δεύτερη απαίτηση είναι ότι, θα πρέπει το υλικό με τη χαμηλότερη πυκνότητα να έχει υψηλή πλαστικότητα, δηλαδή να έχει την ικανότητα ροής. Τέλος, είναι

απαραίτητη μία διαταραχή, για να προκαλέσει το ξεκίνημα της ροής. Η διαταραχή που μπορεί να είναι ένα σεισμοτεκτονικό επεισόδιο ή μία άλλη διαδικασία όπως η διάβρωση, προξενεί διαφορές στην κατανομή της πίεσης των πετρωμάτων επικάλυψης. Έτσι ο διαπειρισμός θα «προτιμήσει» τις περιοχές όπου η πίεση του στρώματος επικάλυψης πάνω στο υλικό με την μικρότερη πυκνότητα είναι ελάχιστη. Η κινητήρια δύναμη του διαπειρισμού είναι η βαρύτητα, αν και φαινομενικά τα πετρώματα ανεβαίνουν προς τα πάνω, δηλαδή μια «αντιστροφή της βαρύτητας». Επομένως ο διαπειρισμός είναι ένα είδος βαρυτικής τεκτονικής διεργασίας. Το ελαφρύτερο υλικό κινείται προς τα πάνω, ενώ το βαρύτερο γειτονικό κινείται προς τα κάτω.

Αριθμητικά και πειραματικά μοντέλα, που απεικονίζουν την διαπειρική ανάπτυξη, δείχνουν το σχετικό χρόνο της εξέλιξης του φαινομένου ανάπτυξης ενός τέτοιου δόμου στον κινητικό μανδύα της γης (mantle plume), ο οποίος σε σχήμα μανιταριού ανεβαίνει σιγά-σιγά. Ο χρόνος ωρίμανσης του φτάνει και ξεπερνά τα 100 εκατομμύρια χρόνια και η ολοκλήρωση του υπολογίζεται ότι μπορεί να φτάσει και τα 180 εκατομμύρια χρόνια. Ανάλογοι είναι και οι χρόνοι εξέλιξης των γεωσυγκλίσεων στο φλοιό, από το στάδιο της «αύλακας» μέχρι να γίνουν ψηλά βουνά. Σε τέτοιους χρόνους ο μανδύας θεωρείται ρευστός. Σ' αυτήν την κλίμακα χρόνου κινούνται τα υλικά του μανδύα, που επηρεάζουν τη λιθόσφαιρα και με αυτήν την έννοια θεωρούνται «υγρά», ενώ σε μικρότερη κλίμακα χρόνου θεωρούνται στερεά. Αντίφαση; Ίσως. Ποια όμως είναι η ακριβής, ατομική, μοριακή και «κρυσταλλική» δομή τους δεν το γνωρίζουμε. Εκείνο που γνωρίζουμε με βεβαιότητα είναι ότι αυτή η εξαιρετικά αργή κίνηση των υλικών του μανδύα, κινεί τη λιθόσφαιρα, το φλοιό και δημιουργεί όλα τα γεωδυναμικά φαινόμενα. Υπάρχει μια άμεση σχέση εσωτερικών γεωσφαιρών και φλοιού. Σ' αυτή τη σχέση αλληλεπίδρασης βρίσκεται η ζωντάνια του πλανήτη μας.

Ο μανδύας χωρίζεται σε κελύφη και περιοχές ανωμαλιών διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, οι οποίες είναι στενά συνδεδεμένες με τις δυναμικές γεωλογικές διεργασίες που προκαλούν τις μορφολογικές και τεκτονικές μεταβολές στην επιφάνεια. Η συμπεριφορά των σεισμικών κυμάτων δηλώνει πως τα 100 εξωτερικά χιλιόμετρα της Γης, που συμπεριλαμβάνουν και το φλοιό είναι άκαμπτα και ονομάζονται *λιθόσφαιρα* (διεθνώς lithosphere). Αυτό είναι σχετικά στερεό, άκαμπτο και μάλλον συμπαγές υλικό, ενώ κάτω από την

λιθόσφαιρα υπάρχει ένα «μαλακότερο», ασθενέστερο στρώμα 400 χιλιομέτρων περίπου που ονομάζεται ασθενόσφαιρα (asthenosphere), πολύ σημαντικό επίσης για τη λειτουργία του γήινου σώματος.

Κάτω από τον «υγρό-στερεό» μανδύα, προχωρώντας προς το εσωτερικό της Γης, υπάρχει ο **εξωτερικός πυρήνας της**. Αυτός παρουσιάζεται «υγρός» και η σύνθεσή του είναι κυρίως σίδηρος, οξυγόνο και πυρίτιο. Η πυκνότητα του εξωτερικού πυρήνα της Γης όπως έχει υπολογισθεί, κυμαίνεται από 9.900 χιλιόγραμμα ανά κυβικό μέτρο έως 12.300 χιλιόγραμμα ανά κυβικό μέτρο (kg/m^3) ανάλογα με το βάθος, εξαιτίας της αυξανόμενης συμπίεσης. Από πλευρά της γεωχημικής σύνθεσης των υλικών, καθώς και της πυκνότητας τους, πιστεύεται πως στον εξωτερικό πυρήνα ο σίδηρος ενώνεται με θείο, σχηματίζοντας θειούχο σίδηρο, ο οποίος είναι ένα ιδανικό μέσο για την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου της Γης.

Η υγρή φύση του εξωτερικού πυρήνα υποστηρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχουν ανιχνευτεί ποτέ σε σειсмоγραφήματα κύματα που να τον έχουν διασχίσει υπό τη μορφή των κυμάτων S (διατμητικού τύπου), μια και τα κύματα αυτά δεν έχουν τη δυνατότητα να μεταδοθούν μέσω μη στερεών υλικών. Συνεπώς, θα πρέπει ο εξωτερικός πυρήνας να βρίσκεται σε «υγρή» κατάσταση. Οι ανακλάσεις των σεισμικών κυμάτων P και S γίνονται συστηματικά στην εξωτερική επιφάνεια του πυρήνα γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη ενός διαχωριστικού ορίου στα σημεία εκείνα. Η διαχωριστική αυτή επιφάνεια, δηλαδή η αρχή του πυρήνα, βρίσκεται σε βάθος 2.900 χιλιομέτρων.

Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι μέσα στον πυρήνα υπάρχει ένας **εσωτερικός πυρήνας** στον οποίο η ταχύτητα διάδοσης των P σεισμικών κυμάτων είναι μεγαλύτερη απ' εκείνη του εξωτερικού πυρήνα. Ο εσωτερικός πυρήνας αρχίζει από τα 5.200 χιλιόμετρα μέχρι το κέντρο της Γης (6.890 χιλιόμετρα.) και η οριακή διάδοση των S κυμάτων με μικρές ταχύτητες δείχνει ότι βρίσκεται οριακά μεταξύ «υγρής» και «στερεής» κατάστασης. Οι πιέσεις σ' αυτά τα βάθη είναι τρομερά μεγάλες, αφού φτάνουν μέχρι και 3 τρισεκατομμύρια της ατμοσφαιρικής πίεσης, όπως τη νιώθουμε στην επιφάνεια. Σ' αυτές τις συνθήκες σίγουρα δεν θα άντεχαν οι ήρωες του Ιούλιου Βερν, όταν επιχειρούσαν το ταξίδι τους στο κέντρο της Γης.

Φυσικοί και μαθηματικοί προσπαθούν να υπολογίσουν, ή καλύτερα να εκτιμήσουν, τις επικρατούσες θερμοκρασίες στο όριο μανδύα-πυρήνα σε 4.500 με 5000°C, ενώ στον εσωτερικό πυρήνα σε 6.700 με 7.000°C. Ανάλογες δηλαδή θερμοκρασίες με εκείνες του ήλιου, πραγματική μεσαιωνική περιγραφή της κόλασης. Ουσιαστικά υπάρχει ακόμα ένας «ήλιος» στο εσωτερικό του πλανήτη μας. Σ' αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις τι νόημα έχουν οι όροι υγρός και στερεός; Το ερώτημα δεν έχει απαντηθεί ακόμη.

Σήμερα έχει γίνει ευρέως αποδεκτή η ύπαρξη ενός μικρού σώματος στο κέντρο της Γης με ακτίνα που υπολογίζεται στα 1.216 χιλιόμετρα. Διατυπώθηκε επίσης και η υπόθεση σχετικά με την προέλευση αυτού του σώματος, ότι δηλαδή η Γη, στα αρχικά στάδια σχηματισμού της, απορρόφησε ένα άλλο μικρότερο ουράνιο σώμα, ίσως ένα χαμένο φεγγάρι της και αυτό είναι ο εσωτερικός πυρήνας σήμερα. Η πυκνότητα του εσωτερικού πυρήνα είναι μεγαλύτερη εκείνης του εξωτερικού πυρήνα και έχει υπολογιστεί ότι είναι 13,500 χιλιόγραμμα ανά κυβικό μέτρο (kg/m^3). Η πυκνότητα, δηλαδή, του εσωτερικού πυρήνα είναι περίπου όση η πυκνότητα του υδραργύρου πάνω στην επιφάνεια της Γης. Όμως ο πυρήνας δεν αποτελείται από υδράργυρο. Θα μπορούσε να υποθέσουμε ότι αποτελείται από νικέλιο και σίδηρο, όπως έχει διαπιστωθεί σε συσχετισμό με τους σιδηρομετεωρίτες. Το νικέλιο είναι λίγο πιο πυκνό από τον σίδηρο. Συνεπώς ο πυρήνας αποτελείται από ένα μείγμα 40% περίπου νικέλιο και 60% περίπου σίδηρο, πράγμα το οποίο συμφωνεί με την υπολογιζόμενη πυκνότητά του.

Ίσως φανεί παράξενη η αναφορά στους μετεωρίτες, αλλά επειδή δεν μπορούμε να έχουμε άμεση παρατήρηση στα εσωτερικά «στρώματα» του πλανήτη μας, τα σπουδαιότερα δεδομένα για τον καθορισμό της χημικής του σύστασης προέρχονται από τους μετεωρίτες! Πράγματι από τα μικρά αυτά ουράνια σώματα, που αφθονούν στο πλανητικό μας σύστημα και που φτάνουν κατά χιλιάδες στην επιφάνεια της Γης από το εξωτερικό διάστημα, κυρίως από τη ζώνη αστεροειδών πέραν του Άρη, βγάζουμε συμπεράσματα για το εσωτερικό του πλανήτη μας. Οι μετεωρίτες έχουν ηλικία ανάλογη της Γης και πιστεύεται ότι προήλθαν από διάσπαση άλλων μικρότερων πλανητών, γήινου τύπου, οπότε μπορούν να συσχετιστούν με την Γη μας. Τα μόνα «δείγματα πετρωμάτων» λοιπόν που διαθέτουμε για να μελετήσουμε τη

χημική και ορυκτολογική σύσταση του εσωτερικού του πλανήτη μας, προέρχονται από τον εξωγήινο χώρο, που τα βρίσκουμε όμως σε αφθονία στην γήινη επιφάνεια.

Η σύγχρονη μέθοδος της *Σεισμικής Τομογραφίας*, που αναπτύχθηκε μόλις στο τέλος του 20^{ου} αιώνα έδωσε καταπληκτικές εικόνες του εσωτερικού του πλανήτη μας, ανάλογες με εκείνες που λαμβάνονται από την αξονική και μαγνητική τομογραφία για το ανθρώπινο σώμα. Ο 20^{ος} αιώνας άρχισε με τη μελέτη των σεισμικών κυμάτων, που έδωσαν μια πρώτη σαφή εικόνα του άγνωστου μέχρι τότε εσωτερικού της Γης και έκλεισε με την επαναστατική σεισμική τομογραφία, για μια καλύτερη απεικόνιση του σώματός του. Η έρευνα συνεχίζεται και οι μελλοντικές τεχνικές υπόσχονται ακόμη καλύτερη «φωτογράφιση» της άγνωστης Γης, της Terra incognita κάτω από τα πόδια μας.

Η θερμότητα του εσωτερικού της Γης.

Θεωρίες και υποθέσεις του εσωτερικού πυρός, της διαστολής ή συστολής της Γης, της βαθμιαίας ψύξης και πολλές άλλες διατυπώθηκαν κατά καιρούς για να ερμηνεύσουν τη «ζεστασιά» που αναδύεται από το εσωτερικό του πλανήτη μας. Κάποτε πίστευαν ότι το αρχικά υπέρθερμο ουράνιο σώμα, ο πλανήτης μας, άρχισε σταδιακά να παγώνει. Μιλούσαν ακόμη και για το μελλοντικό παγωμένο θάνατό του, σε αντίθεση με το θερμικό θάνατο. Μάλιστα ο γνωστός από τα μαθητικά μας χρόνια φυσικός Kelvin προσπάθησε να υπολογίσει τη ηλικία της Γης, σύμφωνα με την ταχύτητα απώλειας θερμότητας. Αλλά αν και πέτυχε στην κατασκευή των θερμομέτρων του και στους νόμους της θερμότητας, απέτυχε παταγωδώς στους γήινους υπολογισμούς του. Δεν γνώριζε αυτό που επίσης η φυσική μας χάρισε αργότερα, δηλαδή τις ραδιενεργές διασπάσεις και την θερμότητα που παράγεται από αυτές, μέσα στο σώμα της Γης. Η Γη χάνει θερμότητα, αλλά και αναθερμαίνεται. Παράγει, χάνει και δέχεται ποσότητες θερμότητας από τον Ήλιο. Επιπλέον το μέσο μέγεθος του πλανήτη μας, το εξωτερικό προστατευτικό του κέλυφος, ο φλοιός του, δεν επιτρέπουν μεγάλες απώλειες θερμότητας και διατηρούν έτσι μια θερμική ισορροπία, που δεν επιτρέπει την ολοκληρωτική ψύξη του. Η Γη λειτουργεί επίσης σαν ένα μεγάλο κύτταρο θερμικής μεταφοράς. Από τον

πυρήνα μεταφέρεται θερμότητα στον μανδύα, από το μανδύα στο φλοιό και από εκεί στην ατμόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα και η γήινη επιφάνεια δέχονται θερμική ενέργεια από τον ήλιο, η οποία βάζει σε κίνηση τη μηχανή της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Η παραγόμενη στο εσωτερικό της Γης και εκλυόμενη στην επιφάνειά της θερμότητα είναι μικρότερη σε σύγκριση με την ηλιακή θερμότητα που φτάνει στον πλανήτη μας. Οι μεγαλύτερες μάλιστα ποσότητές της εκλύονται από τους ωκεανούς και ιδιαίτερα από τις μεσο-ωκεάνιες ράχες των υποθαλάσσιων ηφαιστείων, περίπου τα $\frac{3}{4}$ της και μόνο το $\frac{1}{4}$ εκλύεται από τις ηπείρους. Η θερμότητα όμως του εσωτερικού της Γης αποτελεί το βασικό αίτιο όλων των γεωδυναμικών φαινομένων. Το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολείται στο διάστημα, αλλά ένα σημαντικό ποσοστό δαπανάται για τις πολύπλοκες φυσικοχημικές διεργασίες του εσωτερικού και για τη δημιουργία των ηφαιστείων, τις ορογενέσεις και την πρόκληση των σεισμών. Για το λόγο αυτό, η μελέτη της θερμότητας του εσωτερικού της Γης έχει πολύ μεγάλη σημασία για τη σπουδή των ηφαιστείων και γενικά των γεωφυσικών φαινομένων.

Πώς όμως διαπιστώνεται αυτή η θερμότητα; Βρέθηκε ότι στις στοές των ορυχείων και στις βαθιές γεωτρήσεις πέρα από τα 20 μέτρα περίπου, που είναι και το όριο μέχρι το οποίο μπορεί να επιδράσει η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία ανεβαίνει κατά 1°C κατά μέσο όρο για κάθε 30 μέτρα καθόδου στο εσωτερικό του φλοιού. Αυτό το μέτρο το ονομάζουμε *γεωθερμική βαθμίδα*. Πρέπει όμως να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι η γεωθερμική βαθμίδα διαφέρει αρκετά από τόπο σε τόπο. Στα γεωθερμικά και ηφαιστειακά πεδία, για παράδειγμα, η αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος είναι πολύ μεγαλύτερη, ενώ σε περιοχές με παλιά πετρώματα πολύ μικρότερη.

Όσον αφορά την προέλευση αυτής της γήινης θερμότητας, τα πράγματα δεν είναι και τόσο ξεκαθαρισμένα. Πολύ λίγα είναι γνωστά για την αρχική θερμική κατάσταση του πλανήτη μας κατά τη διάρκεια του σχηματισμού του και κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων της εξέλιξής του. Σύμφωνα όμως με την επικρατέστερη από τις σύγχρονες θεωρίες, η Γη σχηματίστηκε από ένα αρχικά ψυχρό σώμα, πάνω στο οποίο έπεσαν άλλα μικρότερα ουράνια σώματα, επίσης ψυχρά. Άρα, για να ερμηνευτεί η σχετικά υψηλή θερμοκρασία του εσωτερικού της σήμερα, που υπολογίζεται σε περίπου

3.000°C και η ροή θερμότητας από το εσωτερικό της προς τα έξω, είναι απαραίτητο να δεχθούμε την ύπαρξη πηγών θερμότητας στο εσωτερικό της Γης. Μια τέτοια πηγή θερμότητας αποτελούν τα ραδιενεργά υλικά που βρίσκονται μέσα στα πετρώματα, κυρίως ουράνιο (U^{238}), θόριο (Th^{232}) και κάλιο (K^{40}). Τα ισότοπα αυτά αφθονούν στη φύση, αν και η αφθονία τους αυτή είναι σχετική. Σημαντικές όμως ποσότητες βρίσκονται μόνο στον εξωτερικό φλοιό. Τα βαθύτερα πετρώματα φαίνεται ότι περιέχουν πολύ λιγότερα ποσά ραδιενεργών υλικών. Η περιεκτικότητα επίσης του γρανίτη είναι πολύ μεγαλύτερη από την περιεκτικότητα του ηφαιστειακού βασάλτη σε ραδιενεργά στοιχεία. Παρ' όλα αυτά όμως, τα ραδιενεργά υλικά μπορούν να θεωρηθούν αξιόλογες πηγές θερμότητας. Οι χρόνοι υποδιπλασιασμού τους μάλιστα είναι συγκρίσιμοι με την ηλικία της Γης. Το μισό της ποσότητάς τους που «ζει» και διασπάται είναι για το ουράνιο, για το θόριο και για το κάλιο 4.5, 7.5, 1.3 δισεκατομμύρια χρόνια αντίστοιχα.

Ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας για τα υπάρχοντα στη φύση στοιχεία ουράνιο, θόριο και κάλιο είναι σήμερα 0,74, 0,20 και $2,6 \times 10^5$ (θερμίδες ανά έτος (cal/yr) αντίστοιχα. Η θερμότητα όμως που παράγεται από τις ραδιενεργές διασπάσεις των ισοτόπων μεγάλου χρόνου ζωής δεν αρκεί για να ερμηνεύσει την τωρινή θερμική κατάσταση της Γης. Για το λόγο αυτό δεχόμαστε σήμερα ότι και ορισμένα ισότοπα με μικρούς χρόνους υποδιπλασιασμού συνέβαλαν στην αύξηση της θερμοκρασίας της Γης στα πρώτα στάδια του σχηματισμού της. Επίσης σοβαρές ενδείξεις μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι σημαντικό ποσό θερμότητας εκλύθηκε κατά το σχηματισμό του πυρήνα της Γης, με τη μετακίνηση των βαριών μετάλλων (σιδήρου, νικελίου) προς το κέντρο του πλανήτη μας. Άλλη πιθανή πηγή θερμότητας είναι η πτώση ουράνιων σωμάτων και υλικών πάνω στη Γη, στην αρχή της δημιουργίας της. Τέλος, πιθανή επίσης πηγή θερμότητας θεωρείται η μετατροπή σε θερμική ενέργεια της κινητικής ενέργειας του πλανήτη μας, λόγω μείωσης της ταχύτητας περιστροφής του. Μερικές από τις απαντήσεις αυτές δεν είναι ικανοποιητικές, όμως η έρευνα συνεχίζεται και το μέλλον μας επιφυλάσσει ανατροπές και εκπλήξεις.

Για να απαντήσουμε στο ερώτημα, ποια είναι η θερμοκρασία των βαθύτερων τμημάτων της Γης, του μανδύα, ή του πυρήνα, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι η γεωθερμική βαθμίδα παραμένει σταθερή ($1^{\circ} C$ ανά 30

μέτρα). Τότε, θα υπολογίζαμε τη θερμοκρασία του πυρήνα σε 200.000°C περίπου. Αυτή η τιμή είναι φυσικά υπερβολική αν όχι παράλογη, γιατί η γεωθερμική βαθμίδα αφορά μόνο τα πολύ επιφανειακά στρώματα του φλοιού. Άλλωστε, αυτό συμπεραίνεται και από τις παρατηρήσεις των ηφαιστειακών λαβών που δεν ξεπερνούν τους 1.300°C . Το πιθανότερο είναι ότι η θερμοκρασία σε βάθος 100 χιλιομέτρων, κυμαίνεται μεταξύ 1.500 και 2.000°C . Κάτω από τέτοιες υψηλές θερμοκρασίες τα υλικά του εσωτερικού της Γης θα έπρεπε να διατηρούνται σε υγρή κατάσταση. Αυτό όμως, όπως ξέρουμε, δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα, γιατί στην αντίθετη περίπτωση η δύναμη έλξης της Σελήνης θα επηρέαζε αισθητά το φλοιό του πλανήτη μας. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να αποσπά υλικά από τα επιφανειακά στρώματα και να τα βυθίζει πάλι στο εσωτερικό της αρκετές φορές την ημέρα, όπως περίπου γίνεται με τις παλίρροιες. Οι μεγάλες πιέσεις, όμως, είναι εκείνες που εμποδίζουν το λιώσιμο των υλικών.

Πράγματι, η πίεση αυξάνει επίσης με το βάθος. Πολύπλοκοι θεωρητικοί υπολογισμοί έχουν δώσει μια προσεγγιστική εκτίμηση της αύξησης της πίεσης και της πυκνότητας για τα διάφορα βάθη στο εσωτερικό της Γης. Προκύπτει έτσι τιμή πίεσης στο κέντρο του πλανήτη μας ίση με 3,9 εκατομμύρια ατμόσφαιρες. Όταν εμείς που ζούμε στην επιφάνεια αυτής της σφαίρας δεχόμαστε πίεση μιας ατμόσφαιρας μπορούμε να αντιληφθούμε το μέγεθος της πίεσης που υπομένουν τα υλικά του εσωτερικού της. Στα 80 χιλιόμετρα βάθος περίπου, όπου τοποθετείται το όριο του φλοιού και του άνω μανδύα, η πίεση φτάνει τις 30.000 ατμόσφαιρες. Μια τέτοια πίεση ανυψώνει το σημείο τήξης των πετρωμάτων και τα διατηρεί σε στερεά κατάσταση. Το ηφαιστειακό πέτρωμα βασάλτης, για παράδειγμα, σε κανονικές συνθήκες λιώνει στους 1.150°C , υπό πίεση όμως 30.000 ατμοσφαιρών, λιώνει σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1.400°C .

Οι τεκτονικές πλάκες της λιθόσφαιρας

Το εσωτερικό του πλανήτη μας αν και είναι απλό στη δομή και πολύπλοκο στις λειτουργίες του εξακολουθεί να παραμένει ένα μυστήριο, ενώ η λιθόσφαιρα παρουσιάζει πιο πολύπλοκη δομή. Το επιφανειακό σκληρό στρώμα της Γης, θεωρείται ότι αποτελείται από έναν αριθμό μεγάλων και

μικρών κομματιών, των ονομαζόμενων πλακών (*Plates*), που όλες μαζί συνιστούν την άκαμπτη λιθόσφαιρα (Lithosphere). Οι πολύ μεγάλες πλάκες είναι έξι, η *Ευρασιατική*, του *Ειρηνικού*, η *Αφρικανική*, η *Αμερικανική*, η *Ινδική* και η *Ανταρκτική*. Άλλες έξι μπορούν να χαρακτηρισθούν ως μεσαίου μεγέθους, ενώ για τις είκοσι περίπου μικρότερες, μεταξύ των οποίων και οι μικροπλάκες της περιοχής μας, δεν έχουν μέχρι σήμερα καθορισθεί με ακρίβεια τα όρια τους, για τα οποία διατυπώνονται πολλές διαφωνίες μεταξύ των γεωεπιστημόνων. Οι επιμέρους λιθοσφαιρικές πλάκες μετακινούνται στην επιφάνεια της Γης ωθούμενες από δυνάμεις, το είδος των οποίων δεν έχει ακόμη διευκρινιστεί πλήρως. Οι πλάκες αλληλεπιδρούν στα όριά τους, αποκλίνοντας, συγκλίνοντας ή ολισθαίνοντας ή μια παράλληλα προς την άλλη.

Οι αναλογίες σε μάζα, πάχος και έκταση όλων των γεωσφαιρών (φλοιός, μανδύας, πυρήνας) φαίνεται να παραμένουν σταθερές για το κυρίως γεωλογικό διάστημα που γνωρίζουμε καλύτερα οι γεωλόγοι, δηλαδή τα τελευταία 500 περίπου εκατομμύρια χρόνια. Δίνουν μια μοναδικότητα στον πλανήτη μας, σε σχέση με τους υπόλοιπους του πλανητικού μας συστήματος και αποτελούν εκείνες τις ιδανικές αναλογίες για να διατηρούν την κινητικότητα και ζωντανία του φλοιού και τη μοναδικότητα της ζωής πάνω σ' αυτόν. Αν είχαμε παχύτερο και σταθερότερο φλοιό, όπως η Σελήνης, τότε σε συνδυασμό και με τον ψυχρότερο μανδύα, δεν θα είχαμε ούτε ισχυρούς σεισμούς, ούτε βίαιες ηφαιστειακές εκρήξεις, αλλά δεν θα υπήρχε και ζωή στο γήινό μας σύστημα. Λιθόσφαιρα, φλοιός, ατμόσφαιρα και ζωή είναι αλληλένδετα.

Οι σύγχρονες κινήσεις της στερεής επιφάνειας της Γης αποτελούν μέρος ενός γενικότερου προβλήματος της μηχανικής συμπεριφοράς της λιθόσφαιρας και του μανδύα. Έτσι περιλαμβάνουν: τις ιδιότητες του ανώτερου φλοιού σε βάθος, όπως προκύπτουν από βαθιές γεωτρήσεις και γεωφυσικά δεδομένα, τη δυναμική εξέλιξη του φλοιού, όπως δείχνουν τα γεωλογικά δεδομένα, τις σεισμοτεκτονικές διεργασίες, όπως αυτές προκύπτουν από την κατανομή των σεισμών στο χώρο και τους μηχανισμούς γένεσής τους, τις έντονα ενεργές κινήσεις του φλοιού, όπως αποδεικνύουν γεωδαιτικές μέθοδοι και άλλες τεχνικές, και τέλος όπως έμμεσα αποδεικνύουν οι πειραματικές μελέτες πάνω στη *ροολογία*, την κινητικότητα δηλαδή των πετρωμάτων,

δηλαδή αριθμητικά μοντέλα στους κομπιούτερ μας ή αναλογικά σε κατάλληλες συσκευές στα εργαστήριά μας.

Η Γεωδυναμική συνδέει όλα τα παραπάνω στοιχεία, οπότε συντίθεται ένα «γεωδυναμικό μοντέλο» από τη στιγμή που ερμηνεύονται τα δεδομένα. Η Γεωδυναμική είναι ο κλάδος εκείνος των γεωεπιστημών, στο πλαίσιο του οποίου γίνονται προσπάθειες να εξηγηθούν οι παρατηρούμενες διεργασίες στη λιθόσφαιρα με βάση τις θεμελιώδεις αρχές της Μηχανικής. Τα τελευταία χρόνια, ύστερα κυρίως από την επανάσταση που έφερε η Θεωρία της Τεκτονικής των Πλακών, ένας μεγάλος αριθμός από ενδιαφέροντα γεωδυναμικά μοντέλα αναπτύχθηκε, σε μια προσπάθεια να ερμηνευτεί η συμπεριφορά, παλιά και νεότερη, του φλοιού της Γης. Η πλειονότητά τους περιγράφει μερικώς τα φαινόμενα, ενώ ορισμένα από τα μοντέλα αυτά έρχονται σε αντίθεση με άλλα, γιατί στηρίζονται σε ελλιπή δεδομένα και αδυνατούν να περιγράψουν την πολυπλοκότητα των γεωλογικών φαινομένων. Ορισμένα πρόσφατα γεωδυναμικά μοντέλα φαίνονται σαν αφηρημένες έννοιες, ιδίως σε όσους δεν έχουν μελετήσει ποτέ το αντικείμενο. Οπωσδήποτε όμως, οι σημερινές καθώς και οι μελλοντικές προσπάθειες θα επιφέρουν αξιοσημείωτα αποτελέσματα, γιατί το γεωδυναμικό πρότυπο (μοντέλο) είναι το απαραίτητο και ουσιαστικό πλαίσιο για την κατανόηση των διεργασιών λειτουργίας του γήινου φλοιού. Ένα τέτοιο μεγάλο μοντέλο που περιγράφει όλα τα γεωλογικά φαινόμενα σε παγκόσμια κλίμακα είναι η *Θεωρία των Λιθοσφαιρικών ή Τεκτονικών Πλακών*, γνωστή και ως *Παγκόσμια Τεκτονική*.

Ο όρος **Τεκτονική των Πλακών** (Plate Tectonics) αναφέρεται στη θεωρία που ασχολείται με τη δυναμική του εξώτερου κελύφους της Γης, της λιθόσφαιρας. Η θεωρία αυτή βασίζεται σε μια ευρεία σύνθεση γεωλογικών και γεωφυσικών δεδομένων και αποτελεί το κυρίαρχο σύγχρονο μοντέλο, ή καλύτερα «υπόθεση» των Γεωεπιστημών, που επιβεβαιώνεται και δοκιμάζεται καθημερινά. Σύμφωνα με τη θεωρία της Τεκτονικής των Πλακών, ***λιθόσφαιρα είναι ένα άκαμπτο «στρώμα» 100 περίπου χιλιομέτρων που περιλαμβάνει το γήινο φλοιό και ένα τμήμα του ανώτατου μανδύα***. Η λιθόσφαιρα ακουμπά και ολισθαίνει πάνω σε ένα υποκείμενό της, ασθενέστερο εύκαμπτο στρώμα, μερικώς «λιωμένου» πετρώματος, το οποίο είναι γνωστό διεθνώς ως *ασθενόσφαιρα*, από τη σύνθεση των ελληνικών

λέξεων ασθενής + σφαίρα (*asthenosphere*). Επιφανειακά αποτελείται από δώδεκα μεγάλα και μερικά μικρότερα επιμέρους κομμάτια, που περιγράφονται ως τεκτονικές ή λιθοσφαιρικές πλάκες. Οι πλάκες αυτές κινούνται η μία σε σχέση με την άλλη (συγκλίνουν ή αποκλίνουν) και, είτε αλληλεπιδρούν στα όριά τους είτε όχι. Τέτοιου είδους αλληλεπιδράσεις θεωρούνται υπεύθυνες για το μεγαλύτερο μέρος της ηφαιστειακής και σεισμικής δραστηριότητας της Γης, αν και σεισμοί και ηφαίστεια δεν απουσιάζουν εντελώς από το εσωτερικό των πλακών. Κατά τη μετακίνησή τους και με το πέρασ εκατομμυρίων χρόνων, οι πλάκες δημιουργούν τα βουνά, εκεί όπου αυτές συγκρούονται, καθώς επίσης και τον κατακερματισμό των ηπείρων και τη δημιουργία των ωκεανών, εκεί όπου απομακρύνονται μεταξύ τους, με διεργασίες που διαρκούν περίπου 50 εκατομμύρια χρόνια, για την ολοκλήρωση μίας οροσειράς. Οι ήπειροι, που απλώνονται στη ράχη των πλακών μετατοπίζονται μαζί με αυτές και έτσι επιφέρουν συνεχείς αλλαγές στη γεωγραφία της Γης.

Στο όριο απόκλισης των πλακών, στις περιοχές με το πολύ μικρό πάχος, στο μέσο των ωκεανών συνήθως, το λιωμένο υλικό του βόθου, το μάγμα, αναβλύζει αργά και σταθερά προς τα πάνω, καθώς λόγω των ανοιγμάτων που δημιουργούνται ελαττώνεται η πίεση και προκαλεί μερική τήξη του υποκείμενου μανδύα. Η διεργασία αυτή δημιουργεί νέο φλοιό. Ο συνεχής όμως σχηματισμός νέου φλοιού δημιουργεί ένα πλεόνασμα υλικού, το οποίο πρέπει να καταναλωθεί κάπου αλλού. Αυτό επιτυγχάνεται στα αντιδιαμετρικά άκρα των πλακών εκεί που προσδιορίζονται τα όρια σύγκλισής τους, όπου η μια πλάκα καταβυθίζεται κάτω από την άλλη. Σε βάθη από 300 ως 700 χιλιόμετρα, η καταβυθιζόμενη πλάκα «λιώνει» και ανακυκλώνεται μέσα στο μανδύα, οπότε το πλεόνασμα φλοιού τείνει να ισοφαρίζεται με τις απώλειες διάλυσης (Υποβύθιση - Subduction). Επειδή οι πλάκες συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα που καλύπτει πλήρως την επιφάνεια της Γης, δεν είναι απαραίτητο ο νέος φλοιός που σχηματίζεται σε κάποιο όριο απόκλισης να καταναλωθεί εξ ολοκλήρου στην πλησιέστερη ζώνη καταβύθισης, αρκεί η συνολική ποσότητα του δημιουργούμενου φλοιού να αντισταθμίζεται από αυτήν του καταστρεφόμενου φλοιού.

Η μικρότερη πυκνότητά των ηπειρωτικών πλακών εμποδίζει την καταβύθισή τους. Έτσι, καταβυθίζεται πάντοτε η ωκεάνια πλάκα, που κατά κανόνα είναι πυκνότερη. Με αυτόν τον τρόπο, οι ήπειροι διατηρούνται μόνιμα,

ενώ ο ωκεάνιος πυθμένας συνεχώς ανανεώνεται με υλικό του γήινου εσωτερικού, του μανδύα.

Στα όρια της σύγκρουσης των πλακών συμβαίνει μια πολύπλοκη σειρά τεκτονικών γεγονότων, όπως *πτυχώσεις*, δηλαδή *κάμψεις* και *αναδιπλώσεις των πετρωμάτων* (πτυχές), *επωθήσεις* (=καβαλικέματα), *ρήγματα* και δημιουργία υψηλών οροσειρών (ορογένεση). Οι ηπειρωτικές πλάκες ανακυκλώνονται και ανασχηματίζονται με την επίδραση των ατμοσφαιρικών διεργασιών. Σήμερα εκτός από τις άμεσες παρατηρήσεις και μετρήσεις στον πλανήτη μας, έχουμε τη δυνατότητα να αναπαριστάνουμε τις κινήσεις των πλακών, τη δημιουργία βουνών, την αναδίπλωση και το σπάσιμο των στρωμάτων, με μαθηματικά εργαλεία και πολύπλοκους υπολογισμούς στους κομπιούτερς. Επίσης, προσπαθούμε να μιμηθούμε, όλες αυτές τις διεργασίες, μέσα στο εργαστήριο, με αναλογικά μοντέλα σε μικρογραφία. Προσπαθούμε να αναπαραστήσουμε τα υλικά του φλοιού, με κομμάτια διαφόρων υφασμάτων, άμμου, σιλικόνης, ακόμη και με αγνό μέλι. Το πυκνόρευστο μέλι πολλές φορές αναπαριστά τον μανδύα. Όλα αυτά τα υλικά πιέζονται ή μπαίνουν σε περιστρεφόμενες μηχανές (υπερφυγοκεντρίτες), που δημιουργούν πεδίο βαρύτητας 2 ή 5 ή 10 φορές ή και περισσότερες φορές ισχυρότερο από το γήινο. Όλα αυτά γίνονται σε εργαστηριακά παιχνίδια πειράματα, για να δειχθούν οι διεργασίες και τα ενδιάμεσα στάδια κινήσεων πλακών και πετρωμάτων, που δεν τις είδαμε ποτέ, ούτε πρόκειται να τις δούμε, γιατί συνέβησαν και θα συνεχίσουν να συμβαίνουν στο απέραντο βάθος του γεωλογικού χρόνου.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της σεισμικής και ηφαιστειακής δραστηριότητας στη Γη συγκεντρώνεται κατά μήκος των ορίων των πλακών, όπου σχηματίζονται υποθαλάσσια ηφαιστειακά βουνά (*μεσοωκεάνιες ράχεις*), βαθιές θαλάσσιες *τάφροι*, *αλυσίδες νησιών* (*νησιωτικά τόξα*) και *οροσειρές*. Ένα μέρος της σεισμικής και ηφαιστειακής δραστηριότητας εκδηλώνεται επίσης στο εσωτερικό των πλακών. Ενδιαφέροντα παραδείγματα αυτής της «ενδοπλακικής ή μεσοπλακώδους» δραστηριότητας είναι οι γραμμικές ηφαιστειακές αλυσίδες στις ωκεάνιες λεκάνες, όπως τα Νησιά Χαβάη και η δυτική προέκτασή τους, που έχει τη μορφή μιας σειράς πολύ υψηλών υφάλων και υποθαλάσσιων ορέων. Στο ένα άκρο μιας αλυσίδας νησιών αυτού του τύπου υπάρχει συνήθως ένα ενεργό ηφαίστειο, ενώ στην υπόλοιπη αλυσίδα

απαντούν προοδευτικά παλαιότερα σβησμένα ηφαίστεια. Τέτοια τοπογραφικά χαρακτηριστικά έχουν εξηγηθεί ως προϊόντα των «θερμών κηλίδων» του μανδύα (hot spots), δηλαδή των κέντρων δημιουργίας μάγματος που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος κάτω από τη λιθόσφαιρα, μέσα στο μανδύα και η προέλευση των οποίων δεν έχει διευκρινιστεί ακόμη. Στην επιφάνεια μιας πλάκας, η οποία βρίσκεται πάνω από μια θερμή κηλίδα σχηματίζεται ένα ηφαίστειο. Καθώς η πλάκα μετακινείται, το ηφαίστειο σβήνει, διαβρώνεται και τελικά βυθίζεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ ένα νέο ηφαίστειο σχηματίζεται πάνω από τη θερμή κηλίδα. Η ηφαιστειότητα των θερμών κηλίδων δεν περιορίζεται στις ωκεάνιες λεκάνες, αλλά ανάλογα φαινόμενα συμβαίνουν και στο εσωτερικό των ηπείρων, όπως στην περίπτωση του Εθνικού Πάρκου Γελοουστόουν (Yellowstone) στη δυτική Βόρεια Αμερική. Επίσης ενεργή ηφαιστειότητα, που συνοδεύεται και από έντονη σεισμικότητα, παρατηρείται στο μέσο σχεδόν της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας, στο περίφημο Ριφτ (*rift=μεγάλο τεκτονικό σπάσιμο και βύθισμα του φλοιού*), στο κέρασ της ανατολικής Αφρικής, στις περιοχές της Αιθιοπίας και της Κένυας. Εκεί μάλιστα πιστεύεται ότι, εδώ και ένα εκατομμύριο χρόνια, έχει αρχίσει μια «γρήγορη» διαδικασία διαχωρισμού της Αφρικανικής λιθόσφαιρας σε δύο.

Ένα άλλο παράδειγμα ενδοπλακικής, δηλαδή στο εσωτερικό μιας συμπαγούς ηπείρου, ενεργής παραμόρφωσης αποτελεί η Κίνα, όπου μεγάλα ρήγματα διασχίζουν μια μεγάλη ενδοχώρα και δραστηριοποιούνται συχνά με μεγάλους και καταστροφικούς σεισμούς. Αλλά και ο ευρύτερος ελλαδικός χώρος, αν και βρίσκεται στα όρια δύο μεγάλων λιθοσφαιρικών πλακών, της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής, στην πραγματικότητα είναι μια εκτεταμένη περιοχή, πέρα από τα όρια των πλακών, με έντονη τεκτονική παραμόρφωση και άρα σεισμικότητα, που επεκτείνεται βαθιά μέσα στην πλάκα της Ευρασίας.

Η κίνηση των πλακών στην επιφάνεια της Γης μπορεί να χαρακτηριστεί ως περιστροφή γύρω από έναν πόλο και περιγράφεται σε γενικές γραμμές από θεωρήματα της σφαιρικής γεωμετρίας, που διατύπωσε ο Ελβετός μαθηματικός Leonard Euler (Λέοναρντ Όυλερ) το 18^ο αιώνα. Επειδή όλες οι πλάκες συνδέονται μεταξύ τους, κάθε αλλαγή στην κίνηση σε οποιαδήποτε σημεία αντανακλάται σε ολόκληρο το σύστημα, παγκόσμια. Ουσιαστικά οι

πλάκες δεν είναι ανεξάρτητα κομμάτια, αλλά αλληλοεπηρεαζόμενα και αλληλοεξαρτώμενα τμήματα της λιθόσφαιρας.

Η Τεκτονική των πλακών αποτελεί μια μεγάλη επιστημονική επανάσταση, ανάλογη της καθιέρωσης του ατομικού προτύπου στη φυσική ή την ανακάλυψη του DNA στη βιολογία. Όσο πιο απλή είναι μια ιδέα, ένα «παράδειγμα» ή «μοντέλο», όπως είναι η θεωρία των Τεκτονικών ή Λιθοσφαιρικών Πλακών, τόσο πιο εύκολο είναι να χρησιμοποιηθεί, ακόμη και αν είναι εσφαλμένη. Αυτό δεν βλάπτει εφόσον εκείνο που έχει σημασία είναι να χρησιμοποιηθεί και να χρησιμεύσει στην κατανόηση των φυσικών διεργασιών. Η έννοια του «μοντέλου» έχει μια ευρύτερη αξία, δημιουργεί ένα πλαίσιο σκέψης, μέσα στο οποίο μπορεί κάποιος να δεισδύει και από εκεί και πέρα να αναπτύσσει υπέροχες και δημιουργικές ιδέες. Αυτό συμβαίνει και με το μοντέλο της Τεκτονικής των Πλακών, που ενοποιεί όλα τα γεωλογικά φαινόμενα, δίνει εξηγήσεις και κυρίως προοπτική για νέες σκέψεις και ανακαλύψεις, κάτι που αποδείχθηκε και συνεχίζει να αποδεικνύεται στα σαράντα χρόνια της εφαρμογής του. Η Θεωρία των Λιθοσφαιρικών Πλακών είναι σήμερα κυρίαρχη στο χώρο των γεωεπιστημών, αποτελεί το κυρίαρχο «Παράδειγμα», που δεσπόζει στην επιστημονική γεωλογική σκέψη, γιατί φαίνεται να δίνει ερμηνεία για τα «πάντα» και κυρίως τα κάνει κατανοητά. Η συντηρητική λειτουργία του προϋποθέτει την προσαρμογή όλων των δεδομένων στο πλαίσιο του. Οποιαδήποτε απόκλιση θεωρείται ακατανόητη, ύποπτη ή απορριπτέα. Η συντριπτική πλειοψηφία των επιστημόνων ακολουθεί αυτό το κυρίαρχο μοντέλο σήμερα.

Στο ξεκίνημά της η θεωρία ήταν ένα «παράδειγμα» προσδιορισμένο με ακρίβεια και σαφήνεια. Όσο εξελίσσεται όμως επιτρέπει να αναπτυχθούν οι αδυναμίες του χάρη κυρίως στις ανακαλύψεις, που το ίδιο κυρίαρχο παράδειγμα επιτρέπει να επιτευχθούν. Τα νέα δεδομένα συμβάλλουν, όπως συχνά συμβαίνει, στην επίσπευση της αναθεώρησής του. Η επιστημονική έρευνα γίνεται με τέτοια ταχύτητα σήμερα, που μοιάζει με αγώνα δρόμου χωρίς καμιά ιστορική σύνδεση με την πορεία των προηγούμενων «παραδειγμάτων», δηλαδή των θεωριών όπως για παράδειγμα τη θεωρία του «γεωσυσγκλίνου». Οι σύγχρονες θεωρίες έχουν τις ρίζες στο παρελθόν, ενώ οι παλιές απόψεις και ιδέες εξέθρεψαν το σήμερα.

Η παραδοχή ότι οι πλάκες είναι άκαμπτες και δεν παραμορφώνονται στο εσωτερικό τους αποτελεί ένα από τα αξιώματα της θεωρίας της Τεκτονικής των Πλακών, το οποίο όμως σήμερα αμφισβητείται σε σημαντικό βαθμό, αφού και σεισμοί μετά από παραμόρφωση των πετρωμάτων και ηφαιστειακές εκρήξεις σε ρήγματα-«ανοίγματα» του φλοιού, συμβαίνουν στο εσωτερικό τους. Η πρόοδος της επιστήμης δεν συμβαδίζει πάντοτε με το βαθμιαίο και μεγαλοπρεπή τρόπο που συνήθως της αποδίδεται. Χαρακτηρίζεται από άλματα προς τα εμπρός, με διατύπωση νέων θεωριών, νέων παραδειγμάτων. Ένα νέο παράδειγμα δεν μπορεί να αντικαταστήσει ένα υπάρχον, παρά μόνο όταν γίνει η αποδοχή της υπάρχουσας θεωρίας ως αποτυχημένης. Η θεωρία μπορεί να είναι ατελής. Η τεκτονική των πλακών δεν μπορεί να εξηγήσει πλήρως τις ορογενετικές διεργασίες ή να εξηγήσει την πολυπλοκότητα της ιστορίας των διακυμάνσεων της στάθμης της θάλασσας. Οι ήπειροι εκτελούν πράγματι στο σύνολο τους κατακόρυφες κινήσεις, ανοδικές και καθοδικές, αλλά οι πιθανοί μηχανισμοί για μια τέτοια διεργασία παραμένουν ασαφείς και είναι υπό αμφισβήτηση.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Μεσόγειος, όπου οι συγκρούσεις μεταξύ της Αφρικής και ενός πλήθους «μικροπλακών», που σχεδιάζονται και επαναπροσδιορίζονται συχνά από τους γεωεπιστήμονες με νέα δεδομένα, αποτελούν τεκτονικό παράδοξο, η αποσαφήνιση του οποίου αργεί ακόμη πολύ. Το ζήτημα γίνεται ακόμη δυσκολότερο, όταν κάποια από τα σημερινά όρια των πλακών, ειδικά στην ανατολική Μεσόγειο, φαίνονται να είναι τόσο συγκεχυμένα και ακανόνιστα, ώστε να μην μπορούν να καταταχθούν σε κανέναν από τους τρεις τύπους ορίων πλακών που προβλέπονται από τη βασική θεωρία. Είναι κατανοητό ότι οποιοδήποτε απλό παγκόσμιο τεκτονικό πρότυπο θα λειτουργούσε καλύτερα στους ωκεανούς, οι οποίοι, λόγω της μικρής τους ηλικίας, διατηρούν στοιχεία μιας σύντομης, χωρίς μακρόχρονα γεωλογικά συμβάντα, ιστορίας. Στις γερασμένες ηπείρους τα πράγματα γίνονται περισσότερο πολύπλοκα και η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών χωλαίνει μερικές φορές.

Όπως όλα τα «παραδείγματα» (θεωρίες) στην επιστήμη, η Τεκτονική των Πλακών είναι πολύ πιθανό να αντικατασταθεί κάποια στιγμή από μια καλύτερη θεωρία αλλά, αναμφισβήτητα οτιδήποτε και αν πρεσβεύει αυτή η νέα θεωρία, η μετατόπιση των ηπείρων θα αποτελεί τμήμα της. Σήμερα

πραγματικά, η «έκρηξη στη γνώση» στο χώρο των γεωεπιστημών την οποία προκάλεσε η θεωρία αυτή στη διάρκεια των 40 χρόνων της εφαρμογής της, τείνει να την οδηγήσει στην τροποποίηση της ή την αντικατάστασή της ακόμη, στα πλαίσια μιας «νέας επιστημονικής επανάστασης». Ήδη, οι γεωεπιστήμονες άρχισαν να εντοπίζουν τις αδυναμίες της και να σκέφτονται πέραν αυτής. Χαρακτηριστική είναι πλέον η προσθήκη στα τελευταία παγκόσμια γεωλογικά συνέδρια μιας νέας θεματολογίας με τίτλο: «*Beyond Plate Tectonics*», ας σκεφτούμε δηλαδή και πέρα από τις τεκτονικές πλάκες.

Μεγάλες αλλαγές του γήινου φλοιού

Αν τα όρια, η δομή, το σχήμα και το είδος κίνησης των σημερινών πλακών είναι ακόμη αντικείμενο μελέτης και αρκετές φορές αμφισβητούνται, εκείνα των πλακών του παρελθόντος αποδείχθηκαν ακόμη πιο περίπλοκα προβλήματα, που δεν μπορούσαν καν να φανταστούν οι γεωλόγοι. Η Ινδία ήταν κολλημένη με τη νότια Αφρική, τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής χάνονταν σε έναν τεράστιο ωκεανό, υπόλειμμα του οποίου είναι σήμερα η Μεσόγειος θάλασσα. Η Ισλανδία γεννήθηκε στο όριο της Αμερικανικής και Ευρασιατικής πλάκας, λόγω της συνεχούς απομάκρυνσής τους, από ηφαιστειακό υλικό που ξεχύθηκε και θεμελιώθηκε και στις δύο πλάκες. Η Ισλανδία θα εξακολουθεί να μεγαλώνει με συνεχείς ηφαιστειακές εκχύσεις, επειδή και οι πλάκες θα συνεχίσουν να απομακρύνονται.

Όμως το πιο παράδοξο φαινόμενο της κίνησης των πλακών εμφανίστηκε στη Γη όταν τα μεγάλα δάση πτεριδόφυτων και τα μεγάλα ερπετά άρχισαν να κατακλύζουν την ξηρά. Η γεωλογική εξέλιξη του φλοιού οδήγησε το σύνολο σχεδόν της ξηράς σε μια πλευρά του πλανήτη και τη θάλασσα στο υπόλοιπο τμήμα του. Ήταν τότε που οι τεκτονικές πλάκες συνέκλιναν. Το πόσο φριχτά παραμορφωμένη θα πρέπει να ήταν τότε η Γη μας δεν το γνωρίζουμε. Αν είχε σχήμα παραπλήσιο μιας μπάλας του ράγκμπι, δεν προσδιορίστηκε ακόμη. Η ξηρά της Λιθανθρακοφόρας εποχής και μέχρι την Ιουρασική ονομάστηκε *Παγγαία*. Αυτή η μεγάλη ξηρά, η μεγάλη ενιαία ήπειρος διήρκεσε περίπου για 130 εκατομμύρια χρόνια με δραματικές επιπτώσεις στο παγκόσμιο κλίμα. Ένα κλίμα ηπειρωτικό, θερμό και υγρό, όπως δείχνουν τα

φυτά, που τελικά σχημάτισαν τα εκτεταμένα κοιτάσματα γαιανθράκων. Τους γαιάνθρακες αυτούς εκμεταλλεύτηκε συστηματικά ο άνθρωπος με τη βιομηχανική επανάστασή του, στα τραίνα και τις μηχανές του μόλις το 18^ο, 19^ο και αρχές του 20^{ού} αιώνα.

Από το τέλος της Ιουρασικής εποχής και για περισσότερο από 100 εκατομμύρια χρόνια συντελείται ο διαμελισμός της Παγγαίας, με τη δημιουργία νέων τεκτονικών πλακών, που σε γενικές γραμμές απομακρύνονται, και το διαχωρισμό της σε επιμέρους ηπείρους. Πραγματοποιείται η δημιουργία νέων οροσειρών, που κόλλησαν στις ηπείρους και γενικά τη συνεχή απομάκρυνση των ηπείρων, μέχρι τη σημερινή τους μορφή και θέση, που δεν είναι όμως μόνιμη. Η διαδικασία αυτή της απομάκρυνσης των ηπείρων είναι ένα ταξίδι που συνεχίζεται και έχει ακόμη μέλλον. Απόδειξη αυτής της συνεχιζόμενης δυναμικής αποτελούν η σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα στα ευρύτερα όρια των ηπείρων σήμερα. Πώς δημιουργούνται όμως τα βουνά στα όρια των πλακών;

Εκτός από τα βουνά που γνωρίζουμε στις ηπείρους υπάρχουν και τα υποθαλάσσια, τα «αόρατα» σε μας ή καλύτερα τα «άγνωστα» βουνά. Τα μεγάλα και απόκρημνα όρη που βρίσκονται στα μεγάλα βάθη των ωκεανών, όπως στο μέσο του Ατλαντικού, έχουν εντελώς διαφορετικό τρόπο δημιουργίας απ' ό,τι τα βουνά της ξηράς. Σχηματίζονται συνέχεια στα όρια απόκλισης δύο πλακών από το υλικό του μανδύα, που σχηματίζει τόσο πλουτώνια πυριγενή πετρώματα στο λεπτότατο φλοιό, όσο και ηφαιστειακά, από τις υποθαλάσσιες ηφαιστειακές εκρήξεις και λάβες, που ψύχονται στα βάθη των 2, 3 και 5 χιλιάδων μέτρων ακόμη. Ένα τέτοιο βουνό που έφτασε μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας είναι η νήσος Ισλανδία. Τα νησιά Χαβάη είναι ένα άλλο σύμπλεγμα ηφαιστειακών βουνών (Kilauea, Mauna-Loa κ.α.) με πάνω από 4.000 μέτρα ύψος από το βυθό του Ειρηνικού ωκεανού.

Τα γνωστά μας ψηλά και απόκρημνα βουνά, τα βουνά των ηπείρων και γενικά οι οροσειρές είναι από τις καλύτερα μελετημένες περιοχές του πλανήτη μας. Είναι κατ' εξοχήν χώροι όπου βγήκαν καινούργια συμπεράσματα για τις γεωλογικές διεργασίες, δοκιμάστηκαν υποθέσεις και θεωρίες, εμπλουτίστηκαν ή απορρίφθηκαν απόψεις και ιδέες. Από τη θεωρία της ανύψωσης, που θεωρούσε ως αιτία δημιουργίας των βουνών την άνοδο του μάγματος από τα βάθη του φλοιού και του μανδύα, που πίεζε και ανύψωνε τμήματα

πετρωμάτων του ανώτερου φλοιού, μέχρι τη θεωρία της συστολής της Γης λόγω της σταδιακής ψύξης της, όπου η εξωτερική επιφάνεια συρρικνωνόταν και εμφάνιζε ρυτιδώσεις, τις οροσειρές, φτάσαμε στην πιο ολοκληρωμένη θεωρία του *γεωσυγκλίτου*. Γεωσύγκλινα είναι τα βαθιά βαθουλώματα του φλοιού που εκτός από τις μεγάλες ποσότητες νερού, συγκεντρώνουν αντίστοιχες ποσότητες φερτών υλικών, των ιζημάτων. Το «γεωσύγκλινο» ως θεωρία έγινε πηγή νέων ιδεών, νέων δεδομένων και ολοκληρωμένης απάντησης της καταπληκτικής και ιδιαίτερα πολύπλοκης διεργασίας της δημιουργίας των βουνών. Την οριστική όμως απάντηση έδωσε αργότερα η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών με τις τεράστιες μετακινήσεις, ως κύριο μηχανισμό απομάκρυνσης των ηπείρων, οι οποίες, ως μεγάλες μπουλντόζες εκεί που συγκλίνουν, συσσωρεύουν και ανυψώνουν τεράστιες ποσότητες αποθέσεων από τα γεωσύγκλινα των ωκεανών και τα ανασηκωμένα ιζήματά τους, μέχρι να χτίσουν τα βουνά. Έτσι στα βουνά σήμερα βρίσκουμε κομμάτια από παλιό θαλάσσιο φλοιό, πετρώματα με απολιθώματα μικροοργανισμών, που αρχικά δημιουργήθηκαν σε βαθιές θάλασσες, ασβεστόλιθους ρηχών νερών, υποθαλάσσιες ηφαιστειακές διεισδύσεις. Χαρακτηριστικό είναι το τοπωνύμιο «*Αθαλάσσα*», μιας περιοχής της Λευκωσίας στην Κύπρο. Μια ζωντανή λαϊκή λέξη, που δεν τη βρίσκουμε στα λεξικά, αποτελούμενη από το στερητικό α και τη λέξη θάλασσα, για να δηλώσει μια περιοχή που παρότι έχει τα χαρακτηριστικά της θάλασσας στα στρώματα των πετρωμάτων της, δηλαδή άμμους και πάρα πολλά απολιθωμένα κοχύλια, παρ' όλα αυτά δεν είναι θάλασσα.

Εντυπωσιακές περιπτώσεις δημιουργίας μεγάλων αλυσίδων νέων οροσειρών αποτελούν στην Ευρώπη οι Άλπεις, τα Πυρηναία, η Πίνδος και γενικά τα ψηλά βουνά της Ελλάδας, τα Ιμαλάια στην Ασία, τα Βραχώδη όρη και οι Άνδεις στη Βόρεια και Νότια Αμερική αντίστοιχα. Όλες αυτές είναι γνωστές στη γεωλογική βιβλιογραφία ως οι νεότερες οροσειρές του πλανήτη μας του αλπικού ορογενετικού κύκλου. Τα παλιότερα πετρώματα που συνήθως περιέχουν είναι 200 εκατομμυρίων χρόνων περίπου, ενώ το χτίσιμό τους συνέβη σε λιγότερο από 100 εκατομμύρια χρόνια. Οι γεωλογικές διαδικασίες, όπως ανύψωση, διάβρωση, σεισμοί συνεχίζουν μέχρι σήμερα. Παλιότερες οροσειρές, που είναι κατά κανόνα πολύ χαμηλότερες, είτε νεκρώθηκαν και δεν παρουσιάζουν έντονη γεωλογική δραστηριότητα, ή

σχεδόν ισοπεδώθηκαν και μόνο τα πεδινά υπολείμματα τους υπάρχουν σήμερα.

Τα Ιμαλάια μαζί με το οροπέδιο των 4.000 με 5.000 μέτρων υψόμετρο του Θιβέτ, αποτελούν τη μεγαλύτερη ορεινή μάζα του πλανήτη μας με συνολικό μήκος 2.500 χιλιομέτρων, μεταξύ Βόρειας Ινδίας και νοτιοδυτικής Κίνας. Αυτή η μεγάλη οροσειρά ήταν το αποτέλεσμα της σύγκρουσης της Ινδικής τεκτονικής πλάκας με την Ευρασιατική, σε μια αργή διαδικασία που διήρκεσε 60-80 εκατομμύρια χρόνια και φυσικά συνεχίζεται χωρίς να γίνεται αντιληπτή, παρά μόνο όταν συμβαίνουν αυτοί οι ιδιαίτερα ισχυροί σεισμοί, όπως ο τελευταίος πολύ καταστροφικός του Πακιστάν (2005). Η πολύ μεγάλη κίνηση της Ινδίας για περισσότερο από 2.000 χιλιόμετρα, από το νοτιότερο άκρο της Αφρικής μέχρι τη σημερινή της θέση, εξαφάνισε έναν ολόκληρο ωκεανό, την Τηθύ, συσσωρεύσε και ανύψωσε τον ίδιο τον ωκεάνιο φλοιό με ότι κουβαλούσε επάνω του, με τελικό αποτέλεσμα να αναδυθούν τα πιο ψηλά βουνά του κόσμου. Πιο ψηλά βουνά της πρόσφατης γεωλογικής εποχής, γιατί μέχρι να ανυψωθούν και να φτάσουν στο τωρινό τους υψόμετρο ήταν και αυτά χαμηλά, όπως λόφοι ή μέτριου υψομέτρου βουνά. Σήμερα βρίσκονται στην ακμή τους, αλλά μετά από μερικά εκατομμύρια χρόνια θα χαμηλώσουν πάλι, όπως χαμήλωσαν και εξαφανίστηκαν αλλοτινές οροσειρές.

Με ανάλογη διαδικασία στο χώρο της Μεσογείου ή καλύτερα της ίδιας θάλασσας της Τηθύος σχηματίστηκαν τα βουνά της Ελλάδας. Πριν από 140 εκατομμύρια χρόνια περίπου άρχισε να αναδύεται μια συμπαγής ξηρά στο σημερινό ελλαδικό χώρο, η Αιγηίδα μέσα από τη θάλασσα, την Τηθύ, και βρίσκονταν όπου το σημερινό Αιγαίο. 65 εκατομμύρια χρόνια διήρκεσε η διαδικασία της διαμόρφωσης της. Πριν από 5 εκατομμύρια χρόνια από σήμερα άρχισε ο καταποντισμός της, ως και τα δέκα χιλιάδες χρόνια πριν σήμερα. Οι υψηλές εκείνες κορφές της Αιγηίδος με τη χαρακτηριστική γεωμορφολογία τους είναι τα σημερινά νησιά του Αιγαίου- και στο κέντρο του οι Κυκλάδες. Οι κορφές των πανύψηλων βουνών της Αιγηίδας, που έγιναν νησιά, δεν έπαψαν να είναι βουνοκορφές. Παραμένουν όχι μόνον όπως ήταν αιχμηρές, απότομες και κοφτές, αλλά έχουν υποστεί και τις συνέπειες της φυσικής και ανθρωπογενούς αποσάθρωσης και διάβρωσης. Έχουν, γι' αυτό το λόγο, απότομες κρημνώδεις ακτές

Τηθύς ήταν ο μεγάλος παγκόσμιος ωκεανός πριν από 250 εκατομμύρια χρόνια και μέχρι πριν από 100 εκατομμύρια, από τα υλικά του οποίου «ξεπήδησαν» οι σημερινές μεγάλες οροσειρές. Αποτελεί τρέχουσα παγκόσμια γεωλογική ορολογία, που πήρε το όνομα του από την Τηθύ, την κόρη του Ουρανού και της Γαίας, σύζυγο του Ωκεανού, ενώ παιδιά της ήταν τα ποτάμια, οι πηγές και όλα τα τρεχούμενα νερά. *Αιγηίδα* είναι επίσης γεωλογικός-παλαιογεωγραφικός όρος, που περιγράφει την ενιαία συμπαγή ξηρά του Αιγαίου, μετά την αλπική ορογένεση και πριν διαμελιστεί στα χιλιάδες νησιά και βραχονησίδες, που ξέρουμε σήμερα.

Μια επίσης γλαφυρή γλώσσα χρησιμοποιεί ο Απολλόδωρος (2^{ος} αιώνας π.Χ.) για να περιγράψει την πρώτη δημιουργία ηφαιστειακού νησιού στην καλδέρα της Σαντορίνης το 197 π. Χ. «... η γαρ θάλαττα έτεκεν γη...», μια ποιητική γλώσσα που έχασε αργότερα η επιστήμη. Η περιγραφή συμπληρώνεται από τον Στράβωνα με εντυπωσιακές αφηγήσεις για τις φλόγες και τους καπνούς που ξεπηδούσαν μέσα από το θαλασσινό νερό της καλδέρας. Η διαδικασία δημιουργίας νέας ηφαιστειακής ξηράς στη Σαντορίνη άρχισε πριν από 2,5 περίπου εκατομμύρια, με μια διαδικασία που δημιουργεί, καταστρέφει και ξαναδημιουργεί. Μετά την τελευταία μεγάλη έκρηξη του ηφαιστείου, πριν από 3.350 χρόνια, το 1630 π. Χ. περίπου, ξαναδημιούργησε ξηρά μέσα στην καλδέρα μόλις το 47 μ. Χ. και στη συνέχεια από το 1570 χτίζει σιγά-σιγά νέα γη από τη λάβα με τις εκρήξεις του 1707, του 1866, ενώ την τελευταία νεότερη προσθήκη ηφαιστειακής γης την οικοδόμησε μεταξύ 1925 και 1950.

Η Κύπρος αναδύθηκε γεωλογικά μέσα από τη θάλασσα. Η γένεση του νησιού είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς μοναδικών και πολύπλοκων γεωλογικών διεργασιών, που την καθιστούν σημαντικό παράδειγμα παγκόσμιου γεωλογικού ενδιαφέροντος και που αξίζει να τις διατρέξουμε στα γρήγορα. Ο γεωλογικός της πυρήνας είναι το όρος Τρόδος. Οι κάτοικοι της Κύπρου και οι πολλοί επισκέπτες της δεν υποψιάζονται ότι οι δασώδεις πλαγίες και κορυφές του Τρόδος είναι κομμάτια ωκεάνιου φλοιού του βυθού της Τηθύος. Ο ωκεανός της Τηθύος, από τον παλαιοζωικό αιώνα ακόμη, σκέπαζε το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του πλανήτη μας, καθώς και τμήμα του φλοιού σε βάθος μεγαλύτερο των δύο χιλιομέτρων, το οποίο έμελε να αποτελέσει το γεωλογικό υπόβαθρο της μεγαλονήσου. Εκεί που άρχισαν

να συγκρούονται οι λιθοσφαιρικές πλάκες της Ευρασίας και Αφρικής, υποθαλάσσια ηφαίστεια, λάβες σαν μαξιλάρια, *οφιόλιθοι* με τη φιδίσια λάμψη τους και σκληρό διοξειδίο του πυριτίου, που προερχόταν από δισεκατομμύρια μικροπλακτονικών οργανισμών, τις *ραδιολάρειες*, με τη μορφή *κερατολίθων*, άρχισαν να οικοδομούν το υποθαλάσσιο βουνό του Τρόοδος. Ακόμη και πλουτώνια πετρώματα του μανδύα, όπως οι *δουνίτες*, *γάββροι* και οι *χαρτζβουργίτες*, συμμετείχαν στη δομή του. Αυτό το υπέροχο γεωλογικό σύμπλεγμα εμπλουτίστηκε με πολύ χαλκό, που έκανε την Κύπρο μεγάλη οικονομική δύναμη κατά την ομώνυμη εποχή του Χαλκού. Επίσης προικίστηκε με χρωμίτη, αμίαντο, κασσίτερο, άργυρο και χρυσό. Όλα αυτά άρχισαν πριν από 100 εκατομμύρια και συνεχίστηκαν μέχρι σχεδόν τις μέρες μας, πριν από 10.000 χρόνια, με πολύπλοκες γεωλογικές διεργασίες.

Πριν από 70 εκατομμύρια χρόνια η Αραβική πλάκα άρχισε να κινείται προς τα δυτικά και να περιστρέφει αργά, αλλά σταθερά, το μικρό πρωτονησί της Κύπρου. Επίσης η Ευρασιατική μεγαπλάκα άρχισε να σπρώχνει από βορρά προς νότο, ιζήματα βαθιάς και ρηχής θάλασσας, ασβεστόλιθους και μάρμαρα και να δημιουργεί σιγά-σιγά την άλλη μεγάλη οροσειρά του Πενταδάκτυλου. Όταν η ωκεάνια πλάκα κόπηκε, μια ρηχή θάλασσα περιέβαλε τα νησιά Τρόοδος, Πενταδάκτυλος και τα άλλα μικρότερα. Ένα μεγάλο ποτάμι επίσης από τη σημερινή Τουρκία τροφοδοτούσε, με στροβιλίζοντα υλικά διάβρωσης της μεγάλης ξηράς της Ανατολίας, την Κύπρο και για εκατομμύρια χρόνια την μεγάλωνε, με έναν τύπο πετρώματος που το ονομάζουμε *φλύσχη* ή *τουρβιδίτη*. Τέλος, οι ψαμμίτες, οι μάργες, οι μεγάλες στρογγυλεμένες πέτρες, οι άμμοι με τα χιλιάδες κοχύλια των πολύ ρηχών θαλασσών και λιμνοθαλασσών, γέμιζαν την μεγάλη κοιλάδα της Μεσαορίας. Η μεγάλη και τελευταία ώθηση ανύψωσης έγινε πριν από 2 μόλις εκατομμύρια χρόνια. Η διάβρωση όμως των πετρωμάτων του νησιού δεν επέτρεψε τον Πενταδάκτυλο να γίνει ψηλότερος από 1.000 μέτρα, ενώ το βουνό Όλυμπος της Κύπρου ξεχώρισε και έφτασε τα 1950 μέτρα. Γενικά η Κύπρος παρέμεινε ημιορεινή και λοφώδης. Έτσι αργά αναδύθηκε η νέα ξηρά της Κύπρου, ένα πανέμορφο και πλούσιο νησί.

Οι γεωλογικές διεργασίες συνεχίζουν ασταμάτητα, τόσο στον ελλαδικό χώρο, όσο και σε κάθε γωνιά του πλανήτη. Αλλού διαβρώνουν και χαμηλώνουν τα βουνά, σκάβουν τις χαράδρες, αποθέτουν στα χαμηλά τόνους

φερτών υλικών μετά από κάθε πλημμύρα, ιζήματα λάσπης ρηχαίνουν τις λίμνες, επεκτείνουν τα δέλτα των ποταμών σε βάρος της θάλασσας, τροποποιούν τις ακτές, αυξάνουν το πάχος της λάσπης των ωκεάνιων βυθών.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι η Γη τείνει να κρατά ορισμένες ισορροπίες στις γεωλογικές διεργασίες. Δεν δημιουργεί μόνο βουνά, αλλά αρχίζει την αποικοδόμησή τους αμέσως μετά τη γένεση τους. Οι διαδικασίες τεκτονικής ανύψωσης των βουνών αντιστρατεύονται από τις διεργασίες της διάβρωσης. Η διάβρωση, με ρυθμούς ανάλογους της ανύψωσης, προσπαθεί να χαμηλώσει τις νέες οροσειρές και να τις κρατήσει, ώστε να μην φτάνουν σε υπερβολικά ύψη.

Σεισμοί και ηφαιστειακές εκρήξεις.

Ο φλοιός της Γης θεωρείται από τους περισσότερους ανθρώπους κάτι το πολύ σταθερό. Στο προηγούμενο κεφάλαιο τονίστηκε η αργή, αλλά πολύ σημαντική κινητικότητα του. Η αντίληψη της σταθερότητάς του μολονότι είναι βαθιά ριζωμένη ψυχολογικά μέσα μας, κλονίζεται σημαντικά σε βίαιες αναταράξεις του, όπως είναι για παράδειγμα οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, οι κατολισθήσεις ή τα *θαλάσσια σεισμικά κύματα*, τα γνώριμα πλέον *τσουνάμι*. Μόνο όταν συμβούν τέτοιου είδους ασυνήθιστα παροξυσμικά φαινόμενα, τότε στρέφεται και το δημόσιο ενδιαφέρον στις δυναμικές διεργασίες του γήινου φλοιού. Σεισμός και διάδοση των σεισμικών κυμάτων είναι το ρίγος της Γης, όταν συνταράζεται σύγκορμα. Ένα ρίγος που μεταδίδεται και στον άνθρωπο με όλες της ψυχολογικές συνέπειές του.

Οι μικρότερες κινήσεις του γήινου φλοιού περνούν από το σύνολο σχεδόν των ανθρώπων απαρατήρητες, μπορεί όμως να είναι εξίσου σημαντικές. Ρήγματα έρπουν αργά, ασεισμικά, κτίσματα και ολόκληρα χωριά γλιστρούν σιγά-σιγά, εδάφη βουλιάζουν ανεπαίσθητα. Τα αντιλαμβανόμαστε μόνο όταν αρχίζουν να επιδρούν επικίνδυνα στις κατασκευές μας. Ανεπαίσθητοι επίσης μικροί σεισμοί ή άλλες άγνωστές μας ακόμη φυσικοχημικές διεργασίες αναγκάζουν τμήματα του φλοιού να ολισθαίνουν σιγά-σιγά. Υπεραντλήσεις υπόγειων νερών δημιουργούν επικίνδυνες καθιζήσεις εδαφών. Υπόγεια έγκοιλα βυθίζουν επιφανειακά στρώματα πετρωμάτων. Οι σύγχρονες δορυφορικές μετρήσεις μικρομετακινήσεων σε

μεγάλες σεισμογενείς ζώνες στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών δείχνουν ανεπαίσθητες μικρομετακινήσεις ρηγμάτων ιδιαίτερα αργές, με ανάλογα όμως αποτελέσματα με εκείνα των σεισμών. Για να επιτευχθεί μια τέτοια μετακίνηση, αντίστοιχη της σεισμικής, απαιτείται χρόνος από μια βδομάδα για πολύ μεγάλα και ιδιαίτερα ενεργά ρήγματα, μέχρι και ένας ολόκληρος χρόνος για μεγάλες σεισμικές ζώνες και αρκετά χρόνια για μικρότερα ρήγματα.

Μικροδονήσεις συμβαίνουν συνεχώς, κάθε λεπτό, κάθε δευτερόλεπτο, κάτω από τα πόδια μας μέσα στη Γη, απλά δεν τις αντιλαμβανόμαστε και για το λόγο αυτό δεν μας ενδιαφέρουν. Δεν θα ενδιέφεραν ποτέ την πλειοψηφία των ανθρώπων, παρά μόνο ελάχιστους επιστήμονες, αν κάποτε δεν γινόταν μεγαλύτερες, ισχυρότερες, δηλαδή σεισμοί, και μας απειλούσαν. Το έναυσμα, το αίτιο, για τη γένεση μικρών και μεγάλων σεισμών είναι ακριβώς το ίδιο. Οι μεγάλοι σεισμοί συμβαίνουν σε μεγάλα σπασίματα του φλοιού, αντίστοιχα οι μικροί οφείλονται σε μικροδιαρρήξεις.

Καθημερινά στη Γη μας συμβαίνουν κατά μέσο όρο δύο αισθητοί σεισμοί μεγαλύτεροι από 2 βαθμούς της κλίμακας ρίχτερ και ένας τουλάχιστον μέτριος ως ισχυρός κάθε βδομάδα. Οι ισχυροί όμως σεισμοί, που είναι σχετικά πιο σπάνιοι, είναι από τα πιο καταστροφικά, φοβερά φυσικά φαινόμενα που είναι γνωστά στο ανθρώπινο είδος. Ιστορικές καταγραφές περιέχουν πολλές περιγραφές σεισμών, οι οποίοι προκάλεσαν εκτεταμένες καταστροφές, χιλιάδες θανάτους και σημαντικά οικονομικά και κοινωνικά αποτελέσματα σ' όλο τον κόσμο. Πάνω από 820.000 άνθρωποι σκοτώθηκαν στο σεισμό του Sian (Κίνα) το 1556, ενώ 240.000 θύματα αναφέρονται επίσης στην ίδια χώρα κατά τη διάρκεια του σεισμού της Tangshan το 1976, μεγέθους 7,8 της κλίμακας πού πήρε το όνομα του εφευρέτη της, Richter. Στην περιοχή της Μεσογείου είναι γνωστοί πολλοί καταστροφικοί σεισμοί, όπως της Κρήτης το 365 μ. Χ. με περίπου 50.000 θύματα και μεγάλο τσουνάμι, της Μεσσήνης στη νότια Ιταλία, ο οποίος συνέβη στις 28 Δεκεμβρίου 1908 μεγέθους 7,5 με 120.000 νεκρούς, στη Λισσαβόνα (Πορτογαλία) την 1η Νοεμβρίου 1755 ($M = 8.7$) με 60.000 νεκρούς, στην Καλαβρία, επίσης Ιταλία, το Φεβρουάριο του 1788 με 50.000 θύματα. Η εξαφάνιση μιας ολόκληρης πόλης, της Ελίκης στην Αχαΐα το 373 π.Χ. ήταν αποτέλεσμα ισχυρού σεισμού. Η ισχυρή δόνηση στα βορειοδυτικά της Μικράς Ασίας (Τουρκία) στις 26 Δεκεμβρίου 1939 ($M = 8.0$) είχε 25.000 νεκρούς, ο

σεισμός της 30ης Νοεμβρίου του 1980 στο Έμπολι της Ιταλίας ($M = 6.8$) με πάνω από 10.000 νεκρούς και πρόσφατα ο ισχυρός σεισμός της Νικομήδειας (Izmit-Kocaeli) στην Τουρκία (17 Αυγούστου 1999) με περισσότερους από 25.000 νεκρούς, και των Ιμαλαΐων (Πακιστάν-Κασμίρ Ινδίας) το 2005 με 80.000 απώλειες ανθρωπίνων ζωών. Σε όλες τις περιπτώσεις οι θάνατοι και οι τραυματισμοί οφείλονται στην κατάρρευση των ανθρωπίνων κατασκευών, όχι στην ίδια τη φύση. Οι σεισμοί απειλούν τον άνθρωπο και τις κατασκευές του, το ανθρωπογενές περιβάλλον, τα υπόλοιπα έμβια όντα δεν τα επηρεάζουν σχεδόν καθόλου.

Οι πρώτες γεωλογικές παρατηρήσεις και απόψεις για τους σεισμούς αναδεικνύονται από τους προσωκρατικούς φιλόσοφους, τον Αριστοτέλη, τον Ερατοσθένη, τον Πλίνιο, το Στράβωνα, αλλά σε περιορισμένη κλίμακα σε σχέση με άλλους επιστημονικούς κλάδους. Ο Αναξιμένης, για παράδειγμα έκανε μία πολύ καλή προσέγγιση των αιτίων δημιουργίας των σεισμών, με μία περιγραφή που αναφέρεται με μεγάλη ακρίβεια στη μετατόπιση των «ρηγμάτων», αλλά εξηγώντας τη με λάθος συλλογισμό. Θεώρησε ότι οι σεισμοί γίνονται όταν η γη ραγίζει και η πτώση των σπασμένων τοιχωμάτων της την κάνει και τρέμει. Αναφέρει όμως ότι ο λόγος που η γη ραγίζει είναι η παρατεταμένη ξηρασία. Κάνει έτσι ένα συσχετισμό του φαινομένου του σεισμού με ένα από τα θεμελιώδη «στοιχεία» του κόσμου, το νερό. Αντίθετα, περιγραφή συγκεκριμένων σεισμών και των αντίστοιχων συνοδών φαινομένων τους είναι συστηματική και σε ορισμένες περιπτώσεις ιδιαίτερα ακριβής κατά την κλασική, ελληνιστική και ρωμαϊκή περίοδο. Το πρώτο στον κόσμο θαλάσσιο σεισμικό κύμα (γνωστό ως τσουνάμι σήμερα), που πιθανά συνδέεται με υποθαλάσσιο σεισμό του Θερμαϊκού το 479 π. Χ., περιγράφεται από τον Ηρόδοτο κατά την πολιορκία της Ποτίδαιας από τους Πέρσες. Εντυπωσιακή είναι επίσης η ακριβής περιγραφή και εξήγηση μέσα σε λίγες λέξεις του Θουκυδίδη για το αντίστοιχο κύμα τσουνάμι στο Μαλιακό-Ευβοϊκό κατά τη διάρκεια του μεγάλου σεισμού του 426 π.Χ.

Το πρώτο μνημείο στον κόσμο στη μνήμη νεκρών από σεισμούς, με το όνομα *Σεισματίας*, ανεγέρθηκε στη Σπάρτη μετά τον αφανιστικό σεισμό του 464 π.Χ. Έκτοτε, μνημεία για το «αποτρόπαιο» και «καταστροφικό» αυτό φυσικό γεγονός εμφανίζονται ξανά μόλις κατά το δεύτερο μισό του 20ου

αιώνα στο Βαλπαρέζο της Χιλής το 1960, στην Κίνα 1976 (Tang-Sang), στην Ιαπωνία (δεκαετία '80 και '90 Kobe) και στην Taiwan (1999-2003).

Στο σεισμό του 373 π.Χ. στην Αχαΐα (το μέγεθός του υπολογίζεται σήμερα σε 6,5 με 7,0), ο οποίος είχε επίσης δημιουργήσει ισχυρό θαλάσσιο σεισμικό κύμα τσουνάμι, από το οποίο καταστράφηκε η μητρόπολη των δώδεκα Ιωνικών πόλεων Ελίκη, αναφέρεται ο Αριστοτέλης. Αναφορές για το σεισμό αυτό έγιναν επίσης και από το Στράβωνα, ο οποίος μιλάει και για επιφανειακό ρήγμα, τον Πausανία, το Διόδωρο το Σικελιώτη και τον Ρωμαίο συγγραφέα Αιλιανό. Εκείνος όμως που θεωρείται ότι συνέταξε πρώτος πλήρη και συστηματικό κατάλογο σεισμών για τον ευρύτερο ελλαδικό χώρο είναι ο Δημήτριος ο Καλλατιανός, γεωγράφος και ιστορικός από την πόλη Καλλάτινα της περιφέρειας Οδησσού, τον 3^ο π.Χ. αιώνα. Δυστυχώς το βιβλίο αυτό δεν διασώθηκε, παρά μόνο λίγες αναφορές από το Διογένη Λαέρτιο και κυρίως από το Στράβωνα: *«Δημήτριος δ' ο Καλλατιανός τούς καθ' όλην την Ελλάδα γενομένους ποτέ σεισμούς διηγούμενος...»*. Στα βυζαντινά χρόνια έχουμε επίσης θαυμάσιες περιγραφές σεισμών, που μας παρέχουν πολλές χρήσιμες πληροφορίες, πάντα όμως ως φαινόμενα θεϊκής οργής και καμία προσπάθεια ερμηνείας του φαινομένου. *«Θεοήλατος οργή του μεγάλου σεισμού...»* περιγράφεται σε βυζαντινό χρονικό ένας μεγάλος σεισμός που έπληξε την Κύπρο το 1221.

Παρ' όλη την καταστρεπτική δύναμη αυτού του φαινομένου, το δέος και γενικά τη συναισθηματική φόρτιση που προκαλεί, ελάχιστα ήταν γνωστά για τη φύση του, για τις αιτίες που το προκαλούν. Και ο εκρηκτικός για τις επιστήμες 19^{ος} αιώνας πέρασε με περιγραφές μόνο των εκδηλώσεων διαφόρων σεισμών, χωρίς να εμβαθύνει στις αιτίες του. Μόλις στις αρχές του 20^{ου} αιώνα άρχισε να μελετάται με επιστημονικά όργανα και μεθοδολογία, μετά την ανάπτυξη της θεωρίας των κυμάνσεων στη φυσική. Και φυσικά στο τελευταίο τέταρτο του αιώνα μετά την καθιέρωση της θεωρίας των λιθοσφαιρικών πλακών άρχισε να σχηματίζεται μια λογική αντίληψη γι' αυτό το φαινόμενο. *Οι σεισμοί αντιπροσωπεύουν την ξαφνική θραύση (αστοχία) των γεωλογικών υλικών (πετρωμάτων), ως αντίδραση στην εξασκούμενη σ' αυτά τεκτονική δύναμη (τάση)*. Η τάση συσσωρεύεται για κάποιο διάστημα χρόνου, για πολλά χρόνια, συνήθως δεκάδες, εκατοντάδες ή και χιλιάδες ακόμα, ειδικά κατά μήκος γνωστών ενεργών περιοχών του φλοιού της Γης,

ευαίσθητων και ασθενέστερων, δηλαδή πιο εύκολων στο σπάσιμο, όταν η συσσωρευμένη τάση ξεπεράσει κάποιο όριο αντοχής των πετρωμάτων. Μια αλλαγή στο βαθμό παραμόρφωσης των πετρωμάτων θα έπρεπε να προηγείται της αστοχίας, αλλά η περιορισμένη χρονικά και τοπικά επέκταση, όπως και η μεγάλη σημασία των αλλαγών στο βαθμό παραμόρφωσης που προηγείται των σεισμών, δεν είναι γνωστές.

Ο φλοιός της Γης, ηπειρωτικός ή θαλάσσιος, στο διάβα της μακράς του ιστορίας των 4,5 δισεκατομμυρίων ετών «έσπασε» πάρα πολλές φορές με μικρά ή μεγάλα «σπασίματα», που στη γεωλογία ονομάζουμε *ρήγματα* με μήκος από λίγα χιλιοστά μέχρι δεκάδες χιλιόμετρα. Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι μεγάλοι επιφανειακοί σεισμοί προκαλούν διαρρήξεις μέσα στο φλοιό της Γης ή προκαλούνται από προϋπάρχουσες διαρρήξεις, όταν δραστηριοποιούνται. Ένας σεισμός σχετίζεται με ένα ρήγμα ή συνήθως με μια ζώνη ρηγμάτων ή ομάδες ρηγμάτων, ενώ οι μεγάλοι βάθους δονήσεις εμφανίζονται να είναι γενικά συνδεδεμένες με λιθοσφαιρικές πλάκες και μάλλον δεν σχετίζονται με επιφανειακά φαινόμενα, όπως τα ρήγματα. Πολλά από αυτά τα ρήγματα λειτούργησαν κάποτε στο παρελθόν για μεγάλο χρονικό διάστημα και σήμερα παρουσιάζονται ανενεργά ή νεκρά. Απέμειναν μόνο τα αποτυπώματά τους στα πετρώματα, ώστε να τα μελετούν οι γεωλόγοι. Αντίθετα, νεότερης γεωλογικής ηλικίας ρήγματα του γήινου φλοιού - για τους γεωλόγους μερικών χιλιάδων ή εκατοντάδων χιλιάδων ετών - επαναλειτουργούν κατά ορισμένα χρονικά διαστήματα, σπάζουν όσα τμήματά τους δεν έσπασαν σε προηγούμενους σεισμούς και προκαλούν νέους σεισμούς. Δεν σπάζουν δηλαδή μονομιάς, μια και έξω, αλλά σταδιακά και επεισοδιακά σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, χωρίς κανονικότητα όπως δυστυχώς αποδεικνύεται.

Από γεωλογική άποψη, σημαντικές είναι οι επιφανειακές επιδράσεις των σεισμών στο γεωλογικό περιβάλλον, η σχέση μεταξύ ρηγμάτων και σεισμών και η αναγνώριση και ο χαρακτηρισμός των ενεργών ρηγμάτων μέσα σε ένα γεωλογικό περιβάλλον. Η εξακρίβωση ενός ενεργού ρηγματος αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο στις μελέτες για να εκτιμηθεί η πιθανότητα γένεσης σεισμού, καθώς και το μέγεθός του.

Η χώρα μας και κυρίως η ηπειρωτική διασχίζεται από πολλά τέτοια ρήγματα στη δράση των οποίων κατά τα τελευταία 1 με 2 εκατομμύρια χρόνια

οφείλεται κυρίως η διαμόρφωση και η ομορφιά του ελληνικού τοπίου, τα γεωθερμικά πεδία, οι θερμές πηγές και οι σεισμοί φυσικά. Τα περισσότερα από τα γνωστά ενεργά ρήγματα του ελλαδικού χώρου, πάνω στα οποία είναι χτισμένα πολλά χωριά και πόλεις, που επιβιώνουν για εκατοντάδες και χιλιάδες χρόνια, έχουν μήκη 8-15 χιλιόμετρα και εκτείνονται σε αντίστοιχα βάθη 5 έως 20 χιλιομέτρων. Από πρακτική πλευρά αυτό σημαίνει ότι όταν ενεργοποιηθούν δίνουν κατά κανόνα σεισμούς μεγέθους 6 έως 7 βαθμών της γνωστής κλίμακας μεγέθους σεισμών Ρίχτερ.

Οι μεγάλοι επιφανειακοί σεισμοί αφήνουν έντονα τα «σημάδια» τους στον ανώτατο φλοιό και στην επιφάνεια της Γης, τα οποία είναι αναγνωρίσιμα σήμερα από τους γεωλόγους. Η αναγνώριση, κατανόηση και ποσοτική έκφραση των επιδράσεων των σεισμών στο ανάγλυφο της γήινης επιφάνειας, επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση του ιδιαίτερα πολύπλοκου αυτού φαινομένου και συμβάλλουν στον προσδιορισμό της σεισμικότητας και σεισμικής επικινδυνότητας μιας περιοχής. Η Γεωλογία εξετάζει τους σεισμούς ως φυσικό φαινόμενο, ως στιγμιαίο τεκτονικό γεγονός, που μέσα στα πλαίσια της γεωλογικής διαχρονικότητας (ακτουαλισμός), αποτελούν μια από τις κύριες αιτίες διαμόρφωσης του φλοιού. Οι σεισμοί αποτελούν τις αρχιτεκτονικές διεργασίες του γήινου φλοιού.

Το έναυσμα για τη γένεση μικρών και μεγάλων σεισμών είναι ακριβώς το ίδιο. Οι μικροί σεισμοί είναι καθημερινό φαινόμενο και φαίνεται να είναι συχνοί και «τυχαίοι», ενώ οι μεγάλοι συμβαίνουν σπανιότερα, σε ορισμένες θέσεις του φλοιού και έχουν την τάση να συσσωρεύονται χρονικά, δηλαδή να εκδηλώνονται ο ένας μετά τον άλλο σε σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα. Δηλαδή από την ίδια «πηγή», το ρήγμα ή από μια ευρύτερη περιοχή του φλοιού μπορεί να συμβαίνουν πάρα πολλοί μικροί, αρκετοί μετρίου μεγέθους και λίγοι μεγάλοι σεισμοί σε μικρό χρονικό διάστημα, ενώ για πολύ χρόνο η σεισμική «πηγή» είναι δυνατή να ηρεμεί και να ησυχάζει.

Ο στερεός φλοιός της Γης βρίσκεται σε κατάσταση φαινομενικής ηρεμίας, η οποία υποκρύπτει ένταση, όπως η χορδή ενός τεντωμένου τόξου, που αν και φαίνεται ακίνητη, στην πραγματικότητα βρίσκεται σε δυναμική κατάσταση φόρτισης. Αντίστοιχα και ο φαινομενικά ήρεμος και σταθερός φλοιός είναι σαν μια τεντωμένη χορδή, που βρίσκεται σε κρίσιμη κατάσταση, ή

καλύτερα ορισμένες περιοχές του, συνεχώς στο χείλος μιας μικρής ή μεγάλης διάρρηξης και ανακατάταξης. Σε αυτές τις περιοχές αργά ή γρήγορα συμβαίνουν σεισμοί με μια ανακατάταξη των πετρωμάτων της περιοχής. Τα πετρώματα που μετατοπίζονται βρίσκονται επάνω σε ένα επίπεδο αστάθειας μεγάλου μήκους, αυτό που ονομάζεται γεωλογικό ρήγμα. Αλλά οι σεισμοί δεν γίνονται μόνο σε ένα ρήγμα, αν και τα μέχρι στιγμής μοντέλα μας αυτό προτείνουν. Οι σεισμοί συμβαίνουν από ή καλύτερα πάνω σε μια ομάδα ρηγμάτων μικρών ή μεγάλων, που οι διαστάσεις τους αρχίζουν από τις κρυσταλλικές εξαρμόσεις, από τις μικρορωγμώσεις της τάξης χιλιοστών στις μάζες των πετρωμάτων και από λίγα εκατοστά φτάνουν ορισμένα μέτρα ή και δεκάδες μέτρα μέχρι και πολλά χιλιόμετρα. «Όταν ξεκινάει ένας σεισμός» από μια μικρή διάρρηξη, «δεν γνωρίζει πόσο μεγάλος θα γίνει», κατά τη γλαφυρή έκφραση ενός σύγχρονου Αμερικανού σεισμολόγου του Christopher Scholz. Ανεπαίσθητες μικροδιαρρήξεις συμβαίνουν συνέχεια στα πετρώματα κάτω από τα πόδια μας και αποτελούν την καθημερινή κινητική λειτουργία του φλοιού. Κάποια στιγμή συνενώνονται και μεγαλώνουν γρήγορα, ευτυχώς όμως μόνο σε περιοχές τεκτονικά φορτισμένες και ώριμες να διαρραγούν, και σε λίγα δευτερόλεπτα μπορεί να φτάσουν χιλιόμετρα, οπότε εκλύονται μεγάλες συσσωρευμένες ποσότητες ενέργειας. Φυσικά όπως όλα τα πράγματα στη φύση, έτσι και ο σεισμός έχει όρια, δεν μπορεί δηλαδή η διάρρηξη που ξεκίνησε από ένα σημείο να συνεχίζεται σε όλα τα γειτονικά ή και σε απομακρυσμένα μικρά και μεγάλα ρήγματα, γιατί τότε το ντόμινο θα ενεργοποιούσε όλα τα ρήγματα του πλανήτη και κατά συνέπεια θα είχαμε καθημερινά και συνεχώς μεγάλους σεισμούς ή μάλλον η Γη θα είχε θρυμματιστεί πριν από πολύ χρόνο.

Ένας διαφορετικός ορισμός του σεισμού, που δεν περιγράφουν τα βιβλία γεωλογίας και σεισμολογίας, θα μπορούσε να διατυπωθεί ως εξής. Τα σεισμικά κύματα μεταφέρουν και αναδιατάσσουν στο σώμα της Γης ενέργεια, μια ενέργεια που συσσωρεύεται σε ορισμένα κομβικά σημεία του γήινου φλοιού, από την πίεση των πετρωμάτων και τις φυσικοχημικές διεργασίες που συμβαίνουν σ' αυτά. Είναι θέμα ισοκατανομής της ενέργειας στο φλοιό. Κάτι που έχει περιγραφεί στη φύση για πολλές μεταβολές, ακόμη και για τα ζωντανά κύτταρα. Η απελευθέρωση της ενέργειας από ένα δοσμένο σημείο (σεισμική πηγή) πραγματοποιείται με μια ξαφνική δράση, το σεισμό, ή

καλύτερα τη διάδοση της ενέργειας από το ένα σημείο σ' όλα τα άλλα, μέχρι η ενέργεια να γίνει ίδια παντού και να τερματιστεί κάθε δραστηριότητα, ώστε το σύστημα να ισορροπήσει. Μέχρι τότε όμως διαρκεί αυτή η ισορροπία και ισοκατανομή της ενέργειας; Η απάντηση είναι ότι όλα αρχίζουν πάλι από την αρχή. Μπαίνουμε δηλαδή σ' ένα «σεισμικό κύκλο», με επανασυσσώρευση ενέργειας, όχι μόνο σε άλλη πηγή, που τυχόν βρίσκεται «μακράν της ισορροπίας», αλλά και από την ίδια πηγή, το ίδιο το ρήγμα που έδωσε το σεισμό και αρχίζει να επαναφορτίζεται. Υπολογιστικά πειράματα σε κομπιούτερς ισοκατανομής της ενέργειας σε διάφορα σημεία ενός συστήματος έδειξαν διαφορετικά πράγματα. Μετά από ορισμένο χρόνο το σύστημα συμπεριφέρεται μη γραμμικά και επαναλαμβάνεται, επανέρχεται δηλαδή ξανά και ξανά στην αρχική του κατάσταση, στην οποία βρισκόταν όταν πήρε για πρώτη φορά την αυξημένη δόση ενέργειάς του. Αποκτά δηλαδή «μνήμη» και «θυμάται» την αρχική του κατάσταση μετά από μια διαδρομή. Ξαναφορτίζεται ο ίδιος όγκος πετρώματος ή η περιοχή γύρω από τον ίδιο χώρο και μετά από 100, 1.000 ή 5.000 χρόνια ξαναδιασκορπίζει ξαφνικά, μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, την επανασυσσωρευμένη ενέργεια του, δηλαδή δημιουργεί ακόμη ένα σεισμό. Αυτή τη δράση η πηγή την επαναλαμβάνει για χιλιάδες και εκατομμύρια χρόνια, μέχρι να σβήσει και κάποια άλλη πηγή να πάρει τη θέση της, «Όπου έσεισται θα σείσει» κατά την αρχαιοελληνική έκφραση.

Πότε όμως το ρήγμα επαναλαμβάνει αυτές τις επαναδραστηριοποιήσεις του; σε τακτά χρονικά διαστήματα; Η απάντηση είναι όχι, γιατί διαφορετικά θα το γνωρίζαμε και το πρόβλημα της πρόβλεψης των σεισμών θα ήταν όχι μόνο πανεύκολο, αλλά εμπειρικά λυμένο για τις περιοχές που θα είχαμε καλό ιστορικό αρχείο σεισμών. Η πολυπλοκότητα της φύσης δεν επιτρέπει να λύνονται τόσο εύκολα τα προβλήματα που θέτει, όσο ευφείς άνθρωποι και αν προσπαθούν να τα λύσουν, όσο και αν καταπληκτικές μηχανές (κομπιούτερ) μπαίνουν στην υπηρεσία τους. «Φύσις κρύπτεσθαι φιλεί», η φύση κρύβει τα μυστικά της κατά τον Ηράκλειτο.

Τα ηφαίστεια

Τις ηφαιστειακές εκρήξεις τις γνωρίζουμε ως ιδιαίτερα βίαια και καταστροφικά φυσικά φαινόμενα. Σε αντίθεση με όλα τα άλλα γεωλογικά φαινόμενα που εξελίσσονται με πολύ αργούς ρυθμούς, οι σεισμοί κυρίως και οι εκρήξεις των ηφαιστείων είναι γρήγορα φαινόμενα. Σε λίγα λεπτά, σε λίγες ώρες και μέρες ένα ηφαίστειο μπορεί να σκορπίσει τεράστιες ποσότητες στάχτης σε αποστάσεις χιλιομέτρων, να διασπείρει σε ολόκληρο τον πλανήτη λεπτόκοκκη στάχτη, να εκτοξεύσει τεράστιες ποσότητες *πυροκλαστικών* υλικών, που με «αεροδυναμικές ταχύτητες», αντίστοιχες με αυτές των σύγχρονων αεροπλάνων, να σαρώσουν τα πάντα γύρω τους, να δημιουργήσει θαλάσσια σεισμικά κύματα, να καλύψει με τις ροές λάβας δάση, λίμνες, ποτάμια, χωριά και πόλεις. Μόνο η στάχτη που διασκορπίζεται σε πολύ μεγάλες εκτάσεις υπολογίζεται ότι κυμαίνεται από 1 μέχρι 100 κυβικά χιλιόμετρα για τις μεγάλες εκρήξεις, ενώ πολύ λεπτόκοκκη στάχτη διατρέχει ολόκληρη την ατμόσφαιρα και αγκαλιάζει όλο τον πλανήτη. Επιπλέον όταν το ηφαιστειακό υλικό συναντιέται με το νερό καταστρέφει και ταυτόχρονα δημιουργεί. Στους βυθούς των ωκεανών εξαφανίζει σε λίγες ώρες ολόκληρα οικοσυστήματα, αλλά δίνει και χώρο για να αναπτυχθούν νέα. Έχει υπολογισθεί ότι η λάβα που φτάνει στη θάλασσα, εκτός από τους υδρατμούς και τα άλλα αέρια που παράγει, δημιουργεί και μεγάλες ποσότητες υδροχλωρίου (HCl) και «μολύνει» μ' αυτόν τον τρόπο την ατμόσφαιρα. Μια μόλυνση όμως φυσική. Για παράδειγμα για τις εκρήξεις της Χαβάης του 1840, 1919 και 1950 υπολογίσθηκε ότι παραγόταν και διέφευγε υδροχλώριο 200 μέχρι 2.200 τόνων την ημέρα. Μια «περιβαλλοντική καταστροφή» που δεν θα μπορούσαν να την προκαλέσουν πολλές χημικές βιομηχανίες μαζί.

Η αρχέγονη ύλη του πλανήτη πετιέται ξαφνικά από τα σπλάχνα του, συνταράζει ανθρώπους και τα δημιουργήματά τους και μετά τη γέννηση νέας ξηράς, όπως μετά τις οδύνες ενός τοκετού, γαληνεύει και πάλι. Η φύση δεν γνωρίζει αυτό που εμείς θεωρούμε καλό και κακό. Οι ηφαιστειακές εκτονώσεις της αποτελούν μια ουσιαστική φυσιολογική διαδικασία του πλανήτη, μια διαδικασία γήινου τοκετού, δημιουργίας νέας ξηράς και εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας με αέρια. Τα ηφαιστειακά πετρώματα που δημιουργούνται από τα ποτάμια και τους πίδακες της λάβας παίρνουν τα πιο παράξενα σχήματα,

ώστε να μας εντυπωσιάζουν τα τοπία που κατασκευάζουν οι βίαιες δυνάμεις της Γης.

Τα ηφαίστεια στα πρώτα στάδια σχηματισμού του φλοιού, της υδρόσφαιρας και της ατμόσφαιρας έπαιξαν σημαντικότατο ρόλο. Δημιούργησαν και εξακολουθούν να δημιουργούν νέες ξηρές, νέα εδάφη κατάλληλα για την εγκατάσταση πολλών μορφών ζωής. Όταν καταστρέφουν μια περιοχή δίνουν σχεδόν αμέσως τη δυνατότητα να αναπτυχθούν γρήγορα νέα οικοσυστήματα, ουσιαστικά ανανεώνουν πολλά οικοσυστήματα. Τροφοδότησαν και συνεχίζουν να τροφοδοτούν με αρχέγονη ύλη την επιφάνεια της Γης, ουσιαστικά τη βιόσφαιρα. Είναι εντυπωσιακό πόσο γρήγορα κατακλύζεται και εμπλουτίζεται από ζωή μια νέα ηφαιστειακή γη και πόσο γρήγορα παρουσιάζει μια μεγάλη βιολογική ποικιλομορφία. Τα ηφαίστεια έδωσαν στο παρελθόν και συνεχίζουν να δίνουν και σήμερα στην ατμόσφαιρα αέρια και νερό και κατέχουν ένα σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κλίματος. Μπορούν για ορισμένα χρόνια να επιβραδύνουν ή να επιταχύνουν τις διαδικασίες μεταβολής της θερμοκρασίας σε παγκόσμια κλίμακα. Όλες οι μεγάλες ηφαιστειακές εκρήξεις, που συνέβησαν σε ιστορικά χρόνια και μελετήθηκαν καλά, γνωρίζουμε ότι προκάλεσαν τρομακτικές αλλαγές στην ατμόσφαιρα, πρόσκαιρες όμως. Η έκρηξη για παράδειγμα του ηφαιστείου Λακί της Ισλανδίας το 1783 επέφερε τέτοιας έκτασης ασυνήθιστες αλλαγές στην ατμόσφαιρα και στην κυκλοφορία της, ώστε να μειωθούν για ένα χρόνο οι βροχοπτώσεις και πολλά ποτάμια στο βόρειο ημισφαίριο να στερέψουν, μεταξύ αυτών και ο μεγάλος τροφοδότης γλυκού νερού, Νείλος. Επίσης η ίδια έκρηξη χάρισε και ένα από τα πιο ψυχρά καλοκαίρια των τελευταίων αιώνων. Η έκρηξη του ηφαιστείου Τόμπορα στη Σουμπόβα της Ινδονησίας το 1815 προκάλεσε έναν ιδιαίτερα ψυχρό χειμώνα στην Ευρώπη, με ιδιαίτερα ακραίες θερμοκρασίες. Τα ηφαίστεια μας προκαλούν δέος, αλλά και θαυμασμό. Μας θυμίζουν την αρχική κοσμογονική δημιουργία, αλλά και τις χθόνιες ρίζες της ζωής.

Το τσουνάμι ή θαλάσσιο σεισμογενές κύμα

Το σεισμικό κύμα τσουνάμι δεν έχει καμία σχέση με τα μεγάλα θαλάσσια κύματα του ωκεανού, που οφείλουν τη δημιουργία τους σε ατμοσφαιρική επίδραση και στα 10 με 20 μέτρα βάθος νερού εξαφανίζονται. Αν και ο πρώτος ορισμός αυτού του κύματος δόθηκε από τον Θουκυδίδη, η λέξη τσουνάμι είναι ιαπωνική και σημαίνει το κύμα του λιμανιού.

Το τσουνάμι είναι ένα στιγμιαίο κύμα ορμής, που δημιουργείται από τη βίαιη ανακατάταξη των πετρωμάτων στο βυθό του ωκεανού, συνήθως μετά από ισχυρό σεισμό. Μπορεί να δημιουργηθεί και από υποθαλάσσια κατολίσθηση ή ηφαιστειακή έκρηξη. Αποτελείται από μια τεράστια στήλη νερού, που πολλές φορές ξεπερνά και τα 1.000 μέτρα. Είναι μια σειρά επιμέρους σύμφωνων κυμάνσεων, που «ενώνουν» τα μόρια νερού, τα οποία μ' αυτόν τον τρόπο αποκτούν «μνήμη σύνδεσης» και σαν συρμός κυμάνσεων κινείται μεταφέροντας τεράστια ενέργεια, περίπου στο 1/10 του σεισμού που το προκάλεσε. Έχει μεγάλο μήκος, της τάξης πολλών χιλιομέτρων και μικρό πλάτος κύματος όταν διατρέχει τον ωκεανό. Το μήκος, το πλάτος και η ταχύτητα του θηριώδους αυτού κύματος μεταβάλλονται συνεχώς καθ' όλη τη διάρκεια της διαδρομής του, αφού εξαρτώνται από το βάθος και τις γεωμορφολογικές ανωμαλίες του θαλάσσιου πυθμένα. Καμιά μαθηματική σχέση δεν μπορεί να περιγράψει πλήρως αυτή την κίνηση. Αν και ευφυή μοντέλα σε υπολογιστές την προσεγγίζουν ικανοποιητικά και ερμηνεύουν τα περισσότερα εμπειρικά δεδομένα και μετρήσεις. Παράλληλα, ένας πολύπλοκος εσωτερικός στροβιλισμός ανασκάπτει το βυθό, ανασηκώνει άμμο και μικροοργανισμούς και σαν μαύρος τοίχος, ακολουθεί τη μοναχική του πορεία. Το τσουνάμι είναι ένα «μοναχικό κύμα υψηλής ταχύτητας και χαμηλών απωλειών ενέργειας», που θα μπορούσε να ταξιδεύει γύρω-γύρω από τη Γη πολλές φορές, αν υπήρχαν κατάλληλες συνθήκες χωρίς τριβές και εμπόδια. Το ονόμασαν και «μοναχικό οδεύον κύμα» μεγάλης ενέργειας ή «σολιτόνιο κύμα», που εμφανίζεται από το πουθενά, ταξιδεύει γρήγορα μόνο του και προσπαθεί να διαδοθεί παντού. Εμφανίζεται συνήθως με καλό καιρό, πλήττει τις ακτές για λίγα μόνο λεπτά και πριν και μετά από αυτό η θάλασσα συνεχίζει να έχει τη συνηθισμένη δραστηριότητά της με μικρό ή μεγάλο κυματισμό, σαν να μη συνέβη τίποτα. Όταν όμως φτάνει σε ρηχές θάλασσες ανυψώνεται λόγω της μεγάλης ενέργειας που μεταφέρει, μεγαλώνει το πλάτος του όπως προαναφέρθηκε, διαθλάται, ανακλάται, στροβιλίζεται και ξεσπά πια

στις ακτές με τη μορφή «κεφαλής κόμπρας» ή σαν τοίχος νερού με ταχύτητες 30-40 Km/h, ανάλογα με την παράκτια γεωμορφολογία, εκτονώνοντας όση ενέργεια του απέμεινε. Τότε η φύση «σκοτώνει» άμεσα, ζωντανά του βυθού, κοινωνίες κοραλλιών στα αβαθή, φύκια και όσους ζωικούς οργανισμούς δεν μπορέσουν να ξεφύγουν από τη χερσαία ακτίνα δράσης του, η οποία μπορεί να είναι από λίγα μέτρα ως λίγα χιλιόμετρα. Το τσουνάμι σκοτώνει λοιπόν άμεσα και όχι έμμεσα όπως συμβαίνει με τους σεισμούς, που προκαλούν θανάτους και τραυματισμούς κυρίως τα δημιουργήματα του ανθρώπου, δηλαδή τα κτήρια που πλήττονται εξαιτίας του σεισμού, παθαίνουν ζημιές ή καταρρέουν. Τα ζώα και ο πρωτόγονος άνθρωπος δεν κινδύνευσαν σχεδόν ποτέ από σεισμούς