

ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ. ΤΑ «ΑΝΟΡΓΑΝΑ» ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΗΣ ΓΗΣ.

Βράχια, πέτρες, χώμα, σκληρά και μαλακά υλικά του εδάφους είναι τα δομικά συστατικά της Γης, που γνωρίζουμε από την καθημερινή μας εμπειρία. Επίσης ασβεστόλιθοι, πωρόλιθοι, μάρμαρα, γρανίτες είναι μερικά από τα υλικά της που χρησιμοποιούμε στην οικοδομική και διακοσμητική και διαθέτουμε τις στοιχειώδεις γνώσεις και την εμπειρία να τα αναγνωρίζουμε. Τα υλικά όμως που συνιστούν το σύνολο του φλοιού της Γης παρουσιάζουν μια πολύ μεγάλη ποικιλομορφία. Αρχικά μπορούν να διακριθούν με βάση την ατομική τους δομή σε δύο γενικές κατηγορίες, στα κρυσταλλικά στερεά, τα οποία παρουσιάζουν μία τάξη στη διάταξη των ατόμων στο χώρο και στα ρευστά στα οποία απουσιάζει η τάξη. Στα ρευστά, εκτός από το νερό, συμπεριλαμβάνονται και ορισμένα τμήματα του εσωτερικού της Γης, όπως ο εξωτερικός πυρήνας και τα μάγματα, δηλαδή λιωμένα πετρώματα. Ωστόσο η Γη περιλαμβάνει στο σύνολο της πολυκρυσταλλικά συσσωματώματα ποικίλης σύστασης και διαφορετικών ιδιοτήτων, τα πετρώματα, τα οποία δεν είναι και τόσο σταθερά όσο νομίζουμε. Τα πετρώματα και τα ορυκτά τους διαθέτουν μνήμη. Διατηρούν πληροφορίες για τον τρόπο και τις συνθήκες δημιουργίας τους, τη θερμοκρασία σχηματισμού τους και πολλές άλλες, που με τα σύγχρονα μέσα οι επιστήμονες προσπαθούν να αποκρυπτογραφήσουν. Ενώ για τον περισσότερο κόσμο είναι αδιάφορα υλικά, για το γεωλόγο αποτελούν πλούσιες πηγές πληροφοριών, πληροφορίες όμως πολλές φορές «γραμμένες» σε άγνωστες «γραφές» που πρέπει πρώτα να αποκωδικοποιηθούν και μετά να «διαβαστούν». Επιπλέον, θα μπορούσαμε να τα παρομοιάσουμε σαν τα παλίμψηστα, τους παπύρους που ξαναχρησιμοποιήθηκαν, έχουν γραφεί, σβηστεί και ξαναγραφεί και μάλιστα πολλές φορές.

Τα πετρώματα που βρίσκονται στο φλοιό της Γης εμφανίζουν μια πολύ μεγάλη και θαυμαστή ποικιλία. Άλλα προέρχονται από τη στερεοποίηση διάπυρου υλικού του βάθους του μάγματος, ενώ άλλα προέρχονται από τη σύμπτυξη και τη συγκόλληση χαλαρών υλικών, δηλαδή ιζημάτων που αποτίθενται στην επιφάνεια της Γης, σε θαλάσσιες λεκάνες, λίμνες ή στην ξηρά, σε ποτάμια, πλαγιές και κοιλάτες. Στα πρώτα, που σχηματίζονται στο εσωτερικό του φλοιού από το μάγμα σε υψηλές θερμοκρασίες, δόθηκε το

όνομα πυριγενή, δηλαδή *πετρώματα της φωτιάς* και ιδιαίτερα σ' εκείνα που σταδιακά διαφοροποιούνται και σχηματίζονται στο βάθος με αργή σταδιακή κρυστάλλωση, δόθηκε το όνομα του θεού του κάτω κόσμου Πλούτωνα. Ονομάζονται δηλαδή πλουτώνια πετρώματα (*plutonic rocks*). Και είναι τα μεγαλύτερα σε όγκο στο γήινο φλοιό. Όλοι γνωρίζουμε τους γρανίτες, τα σπουδαιότερα πυριγενή-πλουτώνια πετρώματα. Σ' εκείνα τα πετρώματα της φωτιάς, που στερεοποιούνται γρήγορα σε επιφανειακές συνθήκες, τιμήθηκε το όνομα ενός άλλου ακούραστου τεχνίτη θεού του Ήφαιστου (*Volcanus* στα λατινικά). Τα πετρώματα αυτά έχουν το όνομα ηφαιστειακά (*volcanic rocks*).

Στα πετρώματα της δεύτερης μεγάλης κατηγορίας, που γεννιούνται κυριολεκτικά μέσα στο νερό ή με τη δράση του νερού, της ατμόσφαιρας και της βαρύτητας, δόθηκε ένα πιο πεζό όνομα, ιζηματογενή, από το όνομα των υλικών που αποτελούν την πρώτη ύλη τους, τα ιζήματα, ουσιαστικά λάσπες με διάφορες περιεκτικότητες χημικών ουσιών ή κομμάτια άλλων πετρωμάτων και μικροοργανισμών.

Τέλος, μια τρίτη μεγάλη κατηγορία πετρωμάτων, που δημιουργούνται από την αλλαγή, την μεταμόρφωση των ήδη υπαρχόντων πυριγενών ή ιζηματογενών πετρωμάτων, κάτω από συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, διαφορετικές από εκείνες που είχαν συντελέσει στο σχηματισμό του αρχικού πετρώματος, είναι οι σχιστόλιθοι ή μεταμορφωμένα πετρώματα. Αυτά είναι πετρώματα που άλλαξαν, ενώ εξακολουθούσαν να είναι σε στερεά μάλλον κατάσταση, όταν βρέθηκαν σε φυσικοχημικές συνθήκες διαφορετικές από εκείνες του αρχικού σχηματισμού τους. Υπέστησαν τα πάνδεινα σε ακραίες συνθήκες που θυμίζουν περιγραφές κόλασης. Ονομάζονται *μεταμορφωμένα* (*metamorphic rocks*) από την ελληνική λέξη «μεταμόρφωσις», που εκφράζει με τον καλύτερο τρόπο την σταδιακή αλλαγή, καθώς και σχιστολιθικά από τη δομή τους. Αν και όλα τα πετρώματα υπόκεινται σε μετασχηματισμούς, στα μεταμορφωμένα περιέχεται για πρώτη φορά η έννοια της αλλαγής και εξέλιξης για ανόργανη ύλη.

Κάθε μια από αυτές τις κύριες μεγάλες κατηγορίες των πετρωμάτων υποδιαιρείται σε άλλες μικρότερες, για να μπορούμε να τα ταξινομούμε, να τα μελετούμε και να τα μαθαίνουμε. Στην πραγματικότητα τα πετρώματα αποτελούν μια συνέχεια. Η μεγάλη ποικιλία τους προέρχεται από την ανάμειξη σχετικά μικρού αριθμού ορυκτών σε διάφορες αναλογίες. Τα ορυκτά είναι τα

βασικά συστατικά των γήινων υλικών. **Ορυκτά είναι όλα τα ομογενή, κρυσταλλικά υλικά, με συγκεκριμένη μοριακή δομή και σύσταση, ενώ πετρώματα είναι οι μεγάλες μονάδες υλικών, που αποτελούν το στερεό συνεκτικό σύνολο από ένα ανακάτωμα ορυκτών και είναι αυτά που συγκροτούν το γήινο φλοιό.**

Η λέξη **κρύσταλλος**, στη διεθνή βιβλιογραφία crystal, προέρχεται από το ρήμα κρυώνω και στην ελληνική γλώσσα έχει ομηρική προέλευση και διασώθηκε με την ίδια φθογγολογική προφορά και έννοια μέχρι σήμερα. Στην αρχή σήμαινε πάγος, γιατί αυτόν γνώριζαν στην ομηρική εποχή ως το μόνο κρυσταλλικό σώμα. Επίσης είχε την έννοια του καθαρού σώματος. Για πρώτη φορά η ονομασία κρύσταλλος δόθηκε σε καθαρό διαφανή χαλαζία των Άλπεων τον 17^ο αιώνα, γιατί θεωρήθηκε ότι είχε σχηματισθεί από νερό με έντονη και διαρκή ψύξη. *Οι κρύσταλλοι είναι γιγαντιαία χημικά μόρια που με συμμετρία έχουν τοποθετημένα τα άτομα διαφόρων στοιχείων στο πλέγμα τους.* Τα περισσότερα ορυκτά του γήινου φλοιού έχουν ως βάση του πλέγματος του το χημικό στοιχείο πυρίτιο (Si), όπως οι οργανικές ενώσεις έχουν τον άνθρακα (C). Πυρίτιο και άνθρακας έχουν αρκετές ομοιότητες, και διαφορές φυσικά, με σπουδαιότερη ότι και τα δύο στοιχεία διαθέτουν τέσσερις μονάδες συγγένειας, δηλαδή τέσσερα χέρια για να δημιουργούν πολύπλοκα και πολυποίκιλα μακρομόρια. Το ορυκτό αλάτι που χρησιμοποιούμε στη μαγειρική, οι νιφάδες του χιονιού, ο σιδηροπυρίτης, η γύψος είναι μερικά γνωστά αλλά μη πυριτικά κρυσταλλικά ορυκτά.

Όλα αυτά τα υλικά, ορυκτά και πετρώματα, τα ονομάζουμε ανόργανα, για να τα ξεχωρίζουμε από τις οργανικές ενώσεις και δομές. Αλλά η διάκριση αυτή πολλές φορές καθίσταται ασαφής. Για παράδειγμα, τα εκτεταμένα στρώματα ιζημάτων ανθρακικού ασβεστίου στους βυθούς των θαλασσών, που βρίσκονται σε διαδικασία πετροποίησης, προέρχονται από αντίστοιχο υλικό του θαλασσινού νερού και κυρίως από μικροοργανισμούς, δηλαδή από έμβια όντα. Το σκελετικό αυτό ανθρακικό υλικό ζωντανών οργανισμών είναι βιολογικής προέλευσης, που με τη διαδικασία της ιζηματογένεσης μετατρέπεται σε ανόργανο πέτρωμα, τους γνωστούς μας ασβεστόλιθους. Επίσης, οργανικής προέλευσης ανόργανοι κρύσταλλοι είναι οι *φυτόλιθοι* (διεθνώς *phytoliths*), οι οποίοι δημιουργούνται σε εσωτερικούς ιστούς των

φυτών, όπως και οι «πέτρες των νεφρών μας». Ένας θαυμάσιος οργανικός κρύσταλλος είναι και ο φακός του ματιού μας.

Ως μάγμα εννοούμε το διάπυρο λιωμένο υλικό, που προέρχεται από το βάθος της Γης, από το μανδύα ή τον κατώτερο φλοιό, το οποίο πιστεύουμε ότι βρίσκεται σε ολική ή μερικώς ρευστή κατάσταση, αποτελείται από πυριτικές κυρίως ενώσεις και αέρια και έχει θερμοκρασίες μεταξύ 600⁰ και 1300⁰ C. Όταν εκχύνεται στην επιφάνεια της Γης, τα αέρια διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα και τότε το λιωμένο αυτό υλικό ονομάζεται λάβα, αυτό που βλέπουμε σε εικόνες και κινηματογραφικές καταγραφές να ρέει σαν ποτάμι, πριν παγώσει και γίνει πέτρωμα. Το μαγματικό υλικό των σωθικών του πλανήτη μας αποτελεί την πρώτη και κύρια πηγή δημιουργίας ορυκτών και κατ' επέκταση πετρωμάτων με τη διαδικασία της σταδιακής κρυστάλλωσης, τόσο αυτών που δημιουργήθηκαν κάποτε και περπατάμε πάνω τους, αλλά και αυτών που δημιουργούνται και σήμερα κάτω από τα πόδια μας σε 3 ή 5 ή 15 χιλιόμετρα βάθος. Σε ορισμένες μάλιστα περιοχές συνεχίζει πιο έντονα και αδιάκοπα η διαδικασία της πετρογένεσης, ενώ σε άλλες σταμάτησε εδώ και εκατομμύρια χρόνια. Αργά αλλά σταθερά στο εσωτερικό του φλοιού και γρήγορα στην επιφάνεια μετά από κάθε ηφαιστειακή έκρηξη, δημιουργούνται νέα ορυκτά και πετρώματα. Γι' αυτό δεν πρέπει να αναφερόμαστε στα πετρώματα σε αόριστο χρόνο μόνο, να τα θεωρούμε δηλαδή ότι δημιουργήθηκαν κάποτε και παραμένουν σταθερά και αμετάβλητα, μια βαθιά και παγιωμένη αντίληψη μας.

Από τα 92 γνωστά φυσικά χημικά στοιχεία, στη δομή του γήινου φλοιού συμμετέχουν το οξυγόνο (O) σε χημικές κρυσταλλικές ενώσεις σε ποσοστό περίπου 46%, το στοιχείο πυρίτιο (Si) 28%, το αργίλιο (Al) 8%, ο σίδηρος (Fe) 6%, το ασβέστιο (Ca) 5%, ενώ τα απαραίτητα για την καλή λειτουργία του οργανισμού μας στοιχεία Μαγνήσιο (Mg), Νάτριο (N), Κάλιο (K) κυμαίνονται μεταξύ 1 και 3% και τα υπόλοιπα σπάνια πια χημικά στοιχεία σε ποσοστά μικρότερα του 1%. Πολλά από τα απαραίτητα ή πολύτιμα, με οικονομικούς όρους στοιχεία, όπως Χαλκός (Cu), Μαγγάνιο (Mn), Φωσφόρος(P), Χρυσός (Au), είναι ιδιαίτερα σπάνια και η αναζήτηση τους σε ικανές εκμεταλλεύσιμες συγκεντρώσεις προϋποθέτει επίπονη γεωλογική και εξορυκτική δουλειά.

Είναι όλα τα πετρώματα στερεά; Τα υλικά του γήινου φλοιού, ορίζονται ως στερεά κατάσταση της ύλης για ορισμένες φυσικοχημικές συνθήκες, όταν

για παράδειγμα βρίσκονται σε ορισμένες και σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Κατά το συμβατικό ορισμό παρουσιάζουν σταθερά σχήματα και όγκο. Πάλι συμβατικά τα διακρίνουμε σε κρυσταλλικά και άμορφα υλικά. Στα κρυσταλλικά τα άτομα, τα οποία τα συγκροτούν, συγκρατούνται με ισχυρές δυνάμεις και κυρίως είναι διευθετημένα με συγκεκριμένες διατάξεις. Συγκροτούν απλά ή πολύπλοκα τέλεια γεωμετρικά σχήματα, δομές δηλαδή που αποδεικνύουν σταθερή τάξη και αρμονία στη φύση. Εκείνοι που τα πρωτομελέτησαν διείδαν μια τάξη και απόλυτη συμμετρία στα υλικά του ανόργανου κόσμου. Οι φιλοσοφικές τους αντιλήψεις, που πήγαζαν από αυτήν την τάξη και τελειότητα, επεκτάθηκαν είτε σε όλο το σύμπαν, ή σε κοινωνιολογικές ακόμη ερμηνείες. Για ορισμένες φυσικοχημικές συνθήκες, για ορισμένες περιοχές του φλοιού και για ορισμένο χρόνο είναι μάλλον σταθερά με καθορισμένο σχήμα. Ακόμα όμως και για θεωρούμενες σταθερές συνθήκες τα άτομα των κρυστάλλων εκτελούν ελαφρές δονήσεις, πάλλονται, γύρω από την κανονική τους θέση και γενικά δεν μετακινούνται ελεύθερα στο χώρο. Κατ' εξαίρεση, κάποια δομικά τους χημικά στοιχεία κάπου-κάπου ξεφεύγουν από το κρυσταλλικό τους πλέγμα, αλλά αυτό είναι εξαίρεση, δεν αποτελεί τον κανόνα. Για τα ηλεκτρόνια τους όμως δεν ισχύει το ίδιο, αυτά μετακινούνται συχνότερα. Εξακολουθούμε να τα θεωρούμε ως στερεά κατάσταση της ύλης ακόμη και όταν σε ορισμένες περιοχές του εσωτερικού της Γης, τα άτομα αυτών των υλικών δεν έχουν καθόλου ηλεκτρόνια, τα οποία ρέουν αδιάκοπα.

Τα τέλεια κρυσταλλικά σώματα, όπως θέλει να τα ταξινομή και να τα σπουδάζει στατικά η κρυσταλλογραφία, δεν είναι και τόσο τέλεια. Υπάρχει μια μεγάλη ατέλεια στην φαινομενική τελειότητα τους. Όλοι σχεδόν οι κρύσταλλοι παρουσιάζουν σε κάποιο βαθμό μικρές δομικές ατέλειες. Αυτές μπορεί να είναι άτομα (ιόντα) που ξέφυγαν από την επιπήρηση των δυνάμεων συνοχής του πλέγματος και αποσπάσθηκαν ή ξένα άτομα που εισχώρησαν στο πλέγμα. Τότε μιλάμε για τις πρώτες ατέλειες των κρυστάλλων, τις ατέλειες σημείου. Εκτός από αυτές τις μικρές ατομικές ή σημειακές ατέλειες, οι κρύσταλλοι παρουσιάζουν και μεγαλύτερες, γραμμικές, επίπεδες ή τρισδιάστατες ατέλειες, τις εξαρμόσεις, κατά τις οποίες γίνονται ολισθήσεις τμημάτων του κρυστάλλου. Επιπλέον οι κρύσταλλοι μεγαλώνουν ή μικραίνουν όταν βρουν ζωτικό χώρο και κατάλληλες συνθήκες. Η ανάπτυξη των κρυστάλλων συμβαίνει κυρίως κατά τη διαδικασία της δημιουργίας τους σε

βαθείς κοιλότητες του γήινου εσωτερικού, ή της στερεοποίησης των ηφαιστειακών πετρωμάτων στην επιφάνεια, στους σταλακτίτες και σταλαγμίτες των σπηλαίων, στην απόθεση των ιζημάτων και τη διαδικασία της ιζηματογένεσης ή και της μεταμόρφωσης. Αυτή είναι μια διαδικασία αύξησης του μεγέθους τους με ανάλωση υλικών που βρίσκονται σε επαφή μαζί τους. Όλοι οι κρύσταλλοι αναπτύσσονται διαταράσσοντας την ισορροπία που υπάρχει μεταξύ του κρυσταλλικού υλικού και του αερίου, υγρού ή άμορφου στερεού υλικού, με τα οποία βρίσκονται σε επαφή. Μιλάμε για αύξηση και ανάπτυξη όταν αναφερόμαστε και σε ανόργανα υλικά! Πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι *γεωμορφές των σπηλαίων, σταλακτίτες, εκκεντρίτες, δίσκοι, «κοράλλια» και «μαργαριτάρια»* και γενικά ασβεστολιθικά «λουλούδια», που ξεκινούν από μια σταγόνα νερού, μεγαλώνουν, γίνονται ωραία σαν άνθη και συστάδες θάμνων. Κλείνουν τον κύκλο τους μαζί με το σπήλαιο μέσα στο οποίο αναπτύχθηκαν με το στάδιο του γήρατος, «μαραίνονται», καταστρέφονται και ανακυκλώνονται με τα άλλα ανόργανα υλικά.

Τα στερεά λοιπόν δεν είναι και τόσο στέρεα, μεγαλώνουν και αναπτύσσονται, ενώ παραμένουν σταθερά μόνο για ορισμένα χρονικά διαστήματα. Επίσης μικραίνουν και καταστρέφονται, δηλαδή ανακυκλώνονται, όπως καθετί σ' αυτόν τον πλανήτη. Μια άμεση αντίληψη της μεταβλητότητας των κρυστάλλων και της γρήγορης μετατροπής τους από άμορφη κατάσταση σε κρυσταλλική και το αντίστροφο αποκομίζουμε από την εμφάνιση του χιονιού. Οι νιφάδες του χιονιού είναι και αυτές κρύσταλλοι, μάλιστα μεγάλοι μονοκρύσταλλοι, όταν η ψύξη τους είναι αργή, ή συσσωματώματα μικρότερων κρυστάλλων, όταν είναι γρήγορη. Οι διαδικασίες κρυστάλλωσης του άμορφου νερού και της πολυκρυστάλλωσης της νιφάδας γίνονται με μικρές σχετικές αλλαγές της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και λαμβάνουν χώρα «μπροστά στα μάτια μας» σε λίγα λεπτά, ώρες, μήνες για τις συνηθισμένες χιονοπτώσεις ή χρόνια για τους ορεινούς και πολικούς «αιώνιους» πάγους. Οι κρύσταλλοι του στερεού νερού παρουσιάζουν τόσο μεγάλη ποικιλία, ανάλογα με το είδος του νερού και τον τρόπο κρυστάλλωσης, ώστε μερικοί επιστήμονες υποστηρίζουν σήμερα ότι κάθε κρύσταλλος είναι μοναδικός. Η γρήγορη διαδικασία κρυστάλλωσης του νερού, που γίνεται άμεσα αντιληπτή από τις εμπειρίες μας, συμβαίνει και στο φλοιό της Γης, στα εσώτερα της στρώματα,

αενάως, χωρίς διακοπή, με τη μόνη διαφορά ότι είναι πιο αργή και πραγματοποιείται σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Τα πάντα μεταβάλλονται γρήγορα ή αργά. Οι κρύσταλλοι των ορυκτών στην πραγματικότητα δεν είναι σταθεροί. Τα πετρώματα και τα ορυκτά τους, τα ανόργανα υλικά της Γης τα θεωρούμε ως τα πλέον σταθερά και αδρανή υλικά του κόσμου μας, όμως πολύ νωρίς ακόμη από τον 6^ο π. Χ. αιώνα ο Ηράκλειτος, ο θεωρητικός φιλόσοφος της φύσης, μας επισημαίνει ότι ακόμη και στην πιο αδρανή ύλη υπάρχει αδιόρατη ρευστότητα και κίνηση. Τα υλικά που συγκροτούν τη Γη δεν είναι τόσο σταθερά και στερεά όσο νομίζουμε, μεταβάλλονται και βρίσκονται σε συνεχή κίνηση.

Ρεολογία είναι ένας κλάδος της Φυσικής που ασχολείται με την παραμόρφωση και ροή των υλικών με το χρόνο. Η λέξη ρεολογία (geology) είναι επίσης ελληνική και χρησιμοποιείται στη διεθνή επιστημονική ορολογία (ρέω, ροή). Στη Ρεολογία ένα υλικό είναι ρευστό ανεξάρτητα από την ατομική του δομή, όταν ρέει υπό την επίδραση σταθερής δύναμης ή καλύτερα τάσης. Η Γη παρουσιάζει μία μεγάλη ποικιλία ρεολογικής συμπεριφοράς, γιατί τα διάφορα υλικά συμπεριφέρονται διαφορετικά στη δύναμη που εξασκείται σε αυτά, αλλά και συγχρόνως γιατί η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται και από άλλους συντελεστές, όπως η πίεση, η θερμοκρασία, η ένταση των εξασκούμενων δυνάμεων, η διάρκεια της φόρτισης των γήινων υλικών και ο χρόνος.

Υπάρχουν τρεις ακραίες κατηγορίες παραμόρφωσης των πετρωμάτων όσο αφορά την ρεολογική τους συμπεριφορά, η ελαστική, όταν τα υλικά σπάζουν, η πλαστική όταν τα υλικά απλά παραμορφώνονται και η ιξώδης, δηλαδή η συμπεριφορά των ρευστών. Ωστόσο υπάρχουν και ενδιάμεσοι τύποι παραμόρφωσης που είναι μάλιστα και οι πιο διαδεδομένοι στη φύση. Η ελαστικο-πλαστική, η ελαστικο-ιξώδης και η πλαστικο-ιξώδης παραμόρφωση. Ουσιαστικά υπάρχει μια συνέχεια των μορφών παραμόρφωσης, όπως συμβαίνει για όλα τα πράγματα και φαινόμενα στη φύση, που για λόγους ταξινόμησης, κατανόησης και μελέτης τα διαχωρίζουμε.

Ελαστική συμπεριφορά παρουσιάζουν τα πετρώματα όταν επανακτούν το αρχικό τους σχήμα μετά την κατάργηση της τάσης, δηλαδή η παραμόρφωση που προκαλεί η δύναμη που ασκείται σε αυτά είναι προσωρινή. Αυτό συμβαίνει ακατάπαυστα στο εσωτερικό του πλανήτη, αλλά

δεν είναι μετρήσιμο φαινόμενο και συνήθως το αγνοούμε. Μόνο όταν οι δυνάμεις που τα πιέζουν ξεπεράσουν ένα ορισμένο όριο τα πετρώματα σπάζουν, με αποτέλεσμα να δημιουργούν ρήγματα και ρωγμές στο γήινο φλοιό.

Κατά την πλαστική συμπεριφορά τα πετρώματα παραμορφώνονται αφού δεν επανακτούν το αρχικό τους σχήμα μετά την κατάργηση της εφαρμοσμένης τάσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη και όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα που επενεργεί στα πετρώματα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραμόρφωση που υφίστανται. Τις περισσότερες φορές βγαίνουν αγνώριστα και πολύ ταλαιπωρημένα από αυτή τη διαδικασία. Η πλαστική παραμόρφωση ακολουθεί την ελαστική και παρουσιάζεται στα πετρώματα που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη του φλοιού της Γης, όπου επικρατούν και υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Αντίθετα, στα ανώτερα στρώματα του φλοιού τα πετρώματα παραμορφώνονται ελαστικά και σπάζουν, όπως το γυαλί σε επιφανειακές συνθήκες, όταν η τιμή της εφαρμοσμένης δύναμης υπερβεί το όριο αντοχής τους. Ένα στερεό σώμα το οποίο παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από γραμμικές σχέσεις μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης, που την ονομάζουμε νευτώνεια συμπεριφορά. Αλλά όπως ήδη τονίστηκε επειδή ελαστική και πλαστική παραμόρφωση δεν ξεχωρίζουν, πολλά πετρώματα και κρυσταλλικά στερεά παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ακόμη και σε μικρά βάθη στο φλοιό, σε χαμηλές θερμοκρασίες, για παραμορφώσεις μικρότερες από 1%, όπως προκύπτει από μικρής χρονικής διάρκειας εργαστηριακά πειράματα. Το φαινόμενο έχει μεγάλη σημασία για τις λειτουργίες του γήινου φλοιού. Τα πετρώματα, συμπιέζονται, τανιούνται, σπάζουν, κάμπτονται, αλλάζουν σχήμα, αναδιπλώνονται και γενικά «ρέουν». Τα υλικά της Γης λοιπόν δεν είναι τόσο στερεά και σταθερά, όπως διδαχθήκαμε.

Στα πετρώματα σήμερα τόσο μακροσκοπικά παρατηρούμενα, όσο και στο μικροσκόπιο πολωμένου φωτός, διακρίνουμε μια εντυπωσιακή ποικιλία χρωμάτων, ολόκληρου του ορατού φάσματος και όλων των δυνατών αποχρώσεων που μπορεί να διακρίνει το ανθρώπινο μάτι.

Κύκλος ζωής των πετρωμάτων στο γεωλογικό χρόνο

Ο κόσμος των πετρωμάτων και των γεωλογικών στρωμάτων φαίνεται σταθερός. Και όμως αυτή η σταθερότητα είναι μια αυταπάτη που έχει τις ρίζες της στην ανθρώπινη εμπειρία του χρόνου.. Σε μεγάλες χρονικές κλίμακες τα πετρώματα δεν είναι καθόλου σταθερές μονάδες, όπως καθόλου σταθερός δεν είναι και ο γήινος φλοιός. Απεναντίας, τα πετρώματα φαίνεται να είναι ιδιαίτερα μεταβαλλόμενες και μεταλλασσόμενες δομές, που μεταπίπτουν από τη μια μορφή στην άλλη, αδιάκοπα. Δημιουργούνται, καταστρέφονται και αναγεννιούνται υπακούοντας στον κανόνα «οτιδήποτε παλιό γίνεται καινούργιο πάλι».

Τα πετρώματα σε συνθήκες της γήινης επιφάνειας, όπου κυκλοφορεί ασταμάτητα το νερό, ως βροχή, ως χιόνι, ως υπόγεια ή επιφανειακή ροή, όπου συναντούν μια διαρκώς κινούμενη ατμόσφαιρα, με πολλές κλιματικές εκδοχές και φυσικοχημικές διεργασίες, υπόκεινται αργά και σταθερά στη διαδικασία της φθοράς ή καλύτερα της αλλαγής. Αποικοδομούνται με την αποσάθρωση, σπάζουν, κομματιάζονται, διαλύονται και τελικά μεταφέρονται κοντά ή μακριά με την επενέργεια της βαρύτητας και τη βοήθεια του νερού, του ανέμου και των ζώνων με μια διαδικασία που αποκαλούμε *διάβρωση*. Διαλύονται στα ορυκτά τους, τις χημικές ενώσεις και τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται και αρχίζουν ένα κύκλο πάλι από την αρχή. Τα διάφορα αυτά υλικά της αποσάθρωσης και διάβρωσης συγκεντρώνονται σε μεγάλες ποσότητες σε πιο ήρεμα περιβάλλοντα. Συσσωρεύονται στις ήσυχες καμπές των ποταμών, στις πεδιάδες μετά από πλημμύρες, στους βυθούς λιμνών και θαλασσών, όπου σχηματίζουν στρώματα και μαζί με όλα τα αλλά δέχονται τα σκελετικά υλικά πολλών οργανισμών. Με μικρή πίεση ακόμη και των υπερκείμενων τους στρωμάτων και λίγη γήινη θερμότητα μπαίνουν σε μια διαδικασία λιθοποίησης μέχρι να γίνουν σκληρά και ανθεκτικά πετρώματα σαν τα μητρικά τους. Οι «εξωγενείς» αυτές διεργασίες, όπως λανθασμένα ονομάζονται στη γεωλογία, σκοπό έχουν να εξομαλύνουν το έντονο γήινο επιφανειακό ανάγλυφο μέχρι να το ισοπεδώσουν. Εξωγενείς ονομάστηκαν, γιατί αναφέρονται στις εκτός στερεάς Γης δυνάμεις και διεργασίες. Απεναντίας, είναι πολύ γήινες. Αν στα πετρώματα δρούσαν μόνο αυτές οι δυνάμεις θα είχαν προ πολλού ισοπεδώσει την επιφάνεια της Γης, θα την

είχαν κάνει μια απέραντη πεδιάδα, την οποία μάλλον θα κάλυπταν τα πολλά νερά της. Αυτό όμως δεν συμβαίνει, γιατί παράλληλα με τις «εξωτερικές» δυνάμεις επενεργούν και οι «ενδογενείς», οι δυνάμεις του εσωτερικού της Γης. Αυτές αδιάκοπα δημιουργούν νέα πετρώματα, τα *πυριγενή: πλουτώνια* και ηφαιστειακά, είτε μεταμορφώνουν άλλα, όπως ήδη προαναφέρθηκε. Θέτουν επίσης σε κίνηση το γήινο φλοιό, ανυψώνουν εδάφη, δημιουργούν σεισμούς και δουλεύουν υπόγεια για το χτίσιμο των οροσειρών.

Αλλά η εναλλαγή δεν σταματά εδώ. Όταν πετρώματα όλων των κατηγοριών βρεθούν, για κάποιο λόγο τεκτονικής κίνησης, σε βαθύτερα μέρη του φλοιού ή σε περιοχές έντονης τεκτονικής σύγκρουσης και πίεσης, τότε αντιμετωπίζουν εντελώς διαφορετικές συνθήκες από αυτές στις οποίες γεννήθηκαν, κυρίως πολύ υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Αργά και σταθερά αρχίζουν πάλι να αλλάζουν, να ανακρυσταλλώνονται μερικά ή ολικά και να μεταμορφώνονται. Ο όρος μεταμόρφωση (*metamorphosis*) που εύστοχα διατυπώθηκε από τον Αριστοτέλη, έχει σήμερα το ίδιο νόημα στην αγγλική γλώσσα και αποτελεί παγκόσμια ορολογία στη γεωλογία για το είδος αυτό των πετρωμάτων. Ίσως είναι η πιο πετυχημένη λέξη διεθνώς για να περιγράψει αυτήν τη σημαντική αλλαγή των ανόργανων υλικών του γήινου φλοιού. **Μεταμόρφωση στην πετρογένεση σημαίνει ότι κάτω από τις καινούριες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας τα ορυκτά συστατικά των πετρωμάτων, το ένα μετά το άλλο, αλλάζουν δομή και χημική σύσταση, με μετακίνηση χημικών στοιχείων μεταξύ τους, οπότε προκύπτουν νέα διαφορετικά ορυκτά.** Μάλιστα πολλά από αυτά τα ορυκτά έχουν αποτυπωμένη πάνω τους την ισχυρή πίεση που υπέστησαν και εμφανίζονται σαν λεπτότατα φύλλα με έντονη σχιστότητα. Από αυτή τους τη δομή προκύπτει το δεύτερό τους όνομα, *κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα ή σχίστες*. Στην κατηγορία αυτή των πετρωμάτων μπορεί να αλλάξουν μερικά μόνο ορυκτά και τα υπόλοιπα να παραμείνουν από το αρχικό πέτρωμα, οπότε μιλάμε για μερική μεταμόρφωση. Μπορεί όμως να αλλάξουν και όλα, οπότε έχουμε ολική μεταμόρφωση. Μπορεί ακόμη οι φυσικοχημικές διεργασίες που τα μεταμορφώνουν να είναι τόσο ισχυρές ώστε να τα αποδιοργανώσουν πλήρως, να καταστρέψουν την κρυσταλλική τους δομή, να τα κάνουν δηλαδή πάλι λιωμένο υλικό. Το υλικό αυτό, ως νέο μάγμα πλέον, μπορεί να επαναπαυθεί στη ρευστή του κατάσταση για «λίγο», αλλά αργά ή γρήγορα θα

μπει στον κύκλο της επαναδημιουργίας και θα συνεισφέρει στο σχηματισμό πυριγενών πετρωμάτων. Μ' αυτόν τον τρόπο έχουμε ένα διαρκή μετασχηματισμό των πετρωμάτων, που διαγράφει ένα μεγάκυκλο στο μεγάλο γεωλογικό χρόνο και τη δυναμική αυτής της αέναης διαδικασίας. Και τα πετρώματα λοιπόν κινούνται και μεταβάλλονται κάτω από τα πόδια μας με ρυθμούς φυσικά που δεν γίνονται αντιληπτοί στο μικρό χρονικό διάστημα μιας ανθρώπινης ζωής. Σε τέτοια κλίμακας μικρά χρονικά διαστήματα παρατηρούμε μια πρόσχωση ενός ποταμού μετά από μια πλημμύρα, την αλλαγή μιας παραλίας από χρόνο σε χρόνο, τη φθορά των μαρμάρινων μνημείων, τις αποκολλήσεις βράχων από τα ορεινά, τη μετακίνηση κροκαλών, χαλικιών και άμμου με τους χειμάρρους και τα ποτάμια, και φυσικά τη δημιουργία νέων ηφαιστειακών πετρωμάτων μετά την ψύξη της λάβας από νέα ηφαίστεια.

Τα στερεά πετρώματα του γήινου φλοιού δεν είναι και τόσο σταθερά και αμετάβλητα. Εκτός από τις καθημερινές δονήσεις των ατόμων των κρυστάλλων, τις απώλειες στοιχείων από το πλέγμα τους, τις κινήσεις ηλεκτρονίων μεταξύ τους, τις μικροεξαρμώσεις και γενικά τις φυσικοχημικές διεργασίες που υφίστανται παρουσιάζουν και μια μεγακινητικότητα με το πέρασμα του γεωλογικού χρόνου.

Τα πετρώματα που σχηματίστηκαν από τη σταδιακή ψύξη του μάγματος, τα πυριγενή, φαίνεται ότι κυριαρχούν στο στερεό φλοιό, αφού αποτελούν το 95% περίπου της μάζας του. Είναι δηλαδή το θεμέλιο του γήινου φλοιού. Στην επιφάνεια εμφανίζονται στο 17% της έκτασής της, γιατί είναι καλυμμένα από άλλα είδη πετρωμάτων, κυρίως ιζηματογενή. Τα ιζηματογενή, αν και είναι ένα μικρό τμήμα της συνολικής μάζας του φλοιού, εκτείνονται στο 76% της επιφάνειάς του, με ένα μέσο πάχος 800 μέτρων μόνο. Στην πραγματικότητα το πάχος τους κατά θέσεις μπορεί να είναι τα λίγα εκατοστά του χώματος, λίγα μέτρα αποθέσεις ιζημάτων ή και 10 χιλιόμετρα πάχος ιζηματογενούς πετρώματος, όπως στο Θερμαϊκό κόλπο της Θεσσαλονίκης ή στη λίμνη Βαϊκάλη της Σιβηρίας και σε πολλές περιοχές κοιτασμάτων πετρελαίου. Είναι όμως σημαντικότερα, γιατί προκύπτουν από τις επιφανειακές διεργασίες με τη συμμετοχή της ατμόσφαιρας, του νερού και της ζωής, όπως ήδη τονίστηκε. Είναι αλληλένδετα με τη ζωή και τις διεργασίες της. Αυτά τα πετρώματα αποτελούν ουσιαστικά τα άμεσα αρχεία καταγραφής

των υπολειμμάτων των οργανισμών, της ποικιλομορφίας τους, των κλιματικών διακυμάνσεων και γενικότερα της ιστορικής εξέλιξης του βιογεωπλανήτη.

Ο γεωλογικός αυτός κύκλος μετασχηματισμού των ορυκτών και πετρωμάτων, γνωστός ακόμη από την εποχή του Χουκ (R. Hooke 17^{ος} αιώνας), είναι ιδιαίτερα αργός, αλλά διαρκής και καθημερινός. Δείχνει την κινητικότητα και συνεχή μεταλλαγή της ύλης του γήινου φλοιού. Αποτελεί μια αέναη δυναμική διεργασία. Είναι ένα σημαντικότερο στοιχείο των διαδικασιών της συνεχούς εξέλιξης και ζωντανίας του πλανήτη μας. Δεν είναι όμως ανεξάρτητος από τους άλλους κύκλους αλλαγών, κυρίως του ίδιου του φλοιού, αλλά ιδιαίτερα του κύκλου του νερού.