

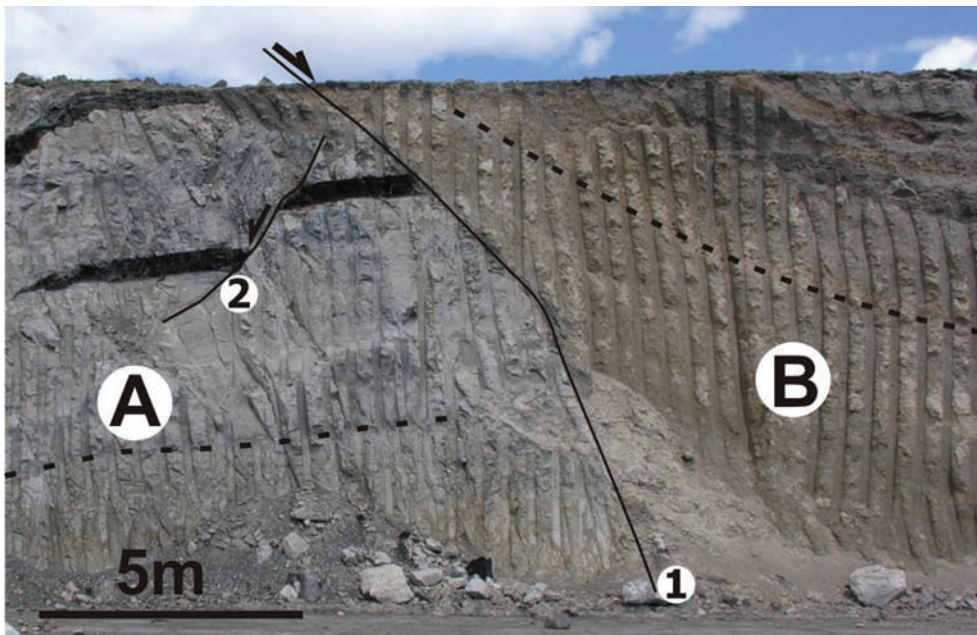


Τα πετρώματα δίπλα από έναν οδικό άξονα, μέσα σε ένα λατομείο ή ακόμα και σε μια παραλία, είναι συνήθως κατακερματισμένα. Σε μερικές περιπτώσεις δύο ενότητες πετρωμάτων διαφορετικού χρώματος και σύστασης οριοθετούνται από μια επιφάνεια ή μια ζώνη εκατέρωθεν της οποίας τα πετρώματα διακόπτουν τη συνέχειά τους (Εικ. 5.1). Με μια πιο προσεκτική ματιά και μέσα στη μάζα των πετρωμάτων εμφανίζονται συχνά διάφορες ασυνέχειες. Αυτές οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι η ύπαρξη ασυνεχειών στα πετρώματα είναι ο κανόνας και όχι η εξαίρεση.

Τι είναι όμως οι σεισμοί και ποια είναι η σχέση τους με τις ασυνέχειες; Οι σεισμοί, κατά κοινή αποδοχή των γεωεπιστημών, προκαλούνται όταν γίνονται στιγμιαίες κινήσεις σε ικανό βάθος, μέσα στο φλοιό της Γης, κατά μήκος ρηγμάτων. Απόδειξη αυτού είναι ότι κατά περιπτώσεις οι κινήσεις στη διάρκεια των σεισμών εκδηλώνονται μέχρι την επιφάνεια της Γης ως σεισμικές διαρρήξεις παρακείμενες ρηγμάτων. Σεισμοί όμως

Εικόνα επιφυλλίδας: Ρήγμα στη διώρυγα της Κορίνθου, το οποίο χαρακτηρίζεται από διακλάδωση και καμπύλωση των στρωμάτων εκατέρωθέν του. Το ρήγμα της φωτογραφίας είναι ένα από τα πολλά που τέμνουν τα πρανή της διώρυγας. Ένα από αυτά τα ρήγματα είχε κινηθεί κατά τη διάρκεια των σεισμών της Κορίνθου το 1981.





Εικ. 5.1. Ρήγματα στο πεδίο εξόρυξης λιγνίτη της Πτολεμαΐδας, Δυτική Μακεδονία. Στην εικόνα το ρήγμα (1) εμφανίζεται ως μια επιφάνεια που χωρίζει τον γκρι χρώματος σχηματισμό (Α) (λιμναίες αποθέσεις) στο αριστερό τμήμα της εικόνας από τον καφέ-κίτρινο σχηματισμό (Β) (ποταμο-χερσαίου περιβάλλοντος απόθεση) στα δεξιά της. Επίσης στο αριστερό τμήμα της εικόνας διακρίνεται ένας οριζόντιος λιγνίτη (καθοδηγητικός οριζόντιος) ο οποίος διακόπτεται επίσης από ένα μικρής μετατόπισης ρήγμα (2).

γίνονται και σε ρήγματα που δεν έχουν επιφανειακή εμφάνιση. Τότε θεωρείται ότι αυτά είναι **θαμμένα** στο εσωτερικό της Γης. Επειδή οι σεισμοί, οι ασυνέχειες και τα ρήγματα συσχετίζονται, η μελέτη των κατακερματισμένων ή διαρρηγμένων πετρωμάτων είναι θεμελιώδης για την κατανόηση των σεισμών.

Έτσι, ενώ πριν από μερικές δεκαετίες οι γεωλόγοι αντιμετώπιζαν τις ασυνέχειες μόνο για τις ανάγκες της κοιτασματολογίας, η αντιμετώπιση του προβλήματος των σεισμών τους ανάγκασε να επινοήσουν νέες τεχνικές μελέτης τους. Αυτές τους οδήγησαν στο να εστιάσουν την προσοχή τους στις περιοχές γύρω από τα ρήγματα. Μερικά εντυπωσιακά ρήγματα παρατίθενται υπό μορφή παραδειγμάτων στο βιβλίο αυτό και αποτελούν προνομιακές θέσεις όπου οι εξειδικευμένοι γεωλόγοι επιδιώκουν να συλλέξουν τα δεδομένα τους. Οι προνομιακές θέσεις παρατήρησης αναδείχθηκαν επειδή στο παρελθόν ή στη διάρκεια ενός σεισμού παρατηρούνται ή παρατηρήθηκαν επιφανειακές διαρρηξίσεις. Οι περιοχές αυτές θεωρούνται ως οι περιοχές, όπου οι ενδογενείς διεργασίες αποτυπώνονται στην επιφάνεια της Γης.

Στα επόμενα κεφάλαια και για την κατανόηση των διεργασιών που γίνονται στο

εσωτερικό της Γης θα παρατεθούν βασικές έννοιες για τη δράση των δυνάμεων στο εσωτερικό της και τις αλλαγές που αυτές προκαλούν.

5.1. Ορισμοί

Οι ασυνέχειες στα πετρώματα ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, αυτές που περιλαμβάνουν κίνηση και ονομάζονται **ρήγματα** και αυτές που περιλαμβάνουν μικρή ή αμελητέα κίνηση και ονομάζονται **διακλάσεις**. Το αποτέλεσμα των κινήσεων είναι τα μεγάλα ρήγματα να συσσωρεύουν σημαντικές κινήσεις στο πέρασμα του γεωλογικού χρόνου. Έτσι, λόγω της κίνησης στα ρήγματα, πετρώματα διαφορετικού περιβάλλοντος απόθεσης ή ηλικίας ή βάθους σχηματισμού συνορεύουν (Εικ. 5.1).

Επειδή οι παρατηρήσεις κατακερματισμένων ή διαρρηγμένων πετρωμάτων είναι συνηθισμένες οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στην πλειονότητά τους τα πετρώματα που απαρτίζουν το φλοιό της Γης υφίστανται τη δράση δυνάμεων. Οι δυνάμεις αυτές είναι η βαρύτητα, το βάρος των υπερκειμένων πετρωμάτων στα υποκείμενά τους και οι οριζόντιες δυνάμεις που συσσωρεύονται λόγω της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών (δες και 2^ο κεφάλαιο).

5.2. Δύναμη, Τάση και Παραμόρφωση

5.2.1. Δύναμη και Τάση

Η **δύναμη** είναι ένα ανυσματικό μέγεθος (που καθορίζεται από το μέγεθός του, τη διεύθυνσή του, τη φορά του και το σημείο εφαρμογής του). Η ανάλυση μιας δύναμης επί ενός άξονα είναι ίση με το γινόμενο του μεγέθους της δύναμης επί το συνημίτονο (cos) της γωνίας που σχηματίζει η διεύθυνση της δύναμης με τον άξονα αυτό. Έτσι αν αναλύσουμε μια δύναμη F σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων (X,Y,Z) τότε οι συνιστώσες της δύναμης είναι:

$$F_x = F \cos \alpha, F_y = F \cos \beta, F_z = F \cos \gamma \tag{5.1}$$

και το άθροισμα των τετραγώνων των δυνάμεων θα είναι

$$F^2 = F_x^2 + F_y^2 + F_z^2 \tag{5.2}$$

επειδή, $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$ (5.3)

Στην περίπτωση που πάνω σε ένα σώμα δρουν περισσότερες από μια δυνάμεις, η συνισταμένη τους προέρχεται από την ανυσματική τους σύνθεση. Οι δυνάμεις που δρουν σε ένα σώμα μπορούν να χωρισθούν σε δύο κατηγορίες: τις **εσωτερικές** και τις **εξωτερικές**. Οι εσωτερικές δυνάμεις είναι αυτές που τείνουν να συγκαταούν ένα σώμα σε ενιαία μορφή και εξαρτώνται από τη μάζα του. Ως παράδειγμα τέτοιας δύναμης

αναφέρονται οι δυνάμεις μεταξύ των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα ενός ορυκτού ή πετρώματος. Αυτές οι δυνάμεις εξισορροπούνται εσωτερικά και έτσι δεν προκαλούν κίνηση ή παραμόρφωση στο σώμα. Επιπλέον οι δυνάμεις αυτές καθορίζουν τις ιδιότητες του υλικού (σκληρότητα, διατμητική αντοχή κλπ.). Οι εξωτερικές δυνάμεις είναι αυτές που ασκούνται επί ενός σώματος από τα γειτονικά προς αυτό σώματα και προκαλούν την κίνηση και παραμόρφωση του σώματος η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δομών τις οποίες και μελετάμε στα πετρώματα. Διακρίνονται δυο είδη εξωτερικών δυνάμεων: (1) **Δυνάμεις μάζας** που ενεργούν σε κάθε τεμάχιο-τμήμα της μάζας ανεξάρτητα από τα γειτονικά του. Τέτοια δύναμη είναι η βαρύτητα και οι ηλεκτροστατικές ή μαγνητικές δυνάμεις. (2) **Δυνάμεις επιφάνειας** που προκαλούνται από τη δράση ενός σώματος ή τμήματος αυτού σε ένα άλλο κατά μήκος μιας κοινής τους επιφάνειας. Παράδειγμα τέτοιας δύναμης είναι η τριβή.

Οι δυνάμεις που εφαρμόζονται σε μια επιφάνεια προκαλούν την **τάση**. Τάση είναι η δύναμη που ασκείται ανά μονάδα επιφάνειας. Έχει τις ίδιες μονάδες με την πίεση, αλλά είναι άνυσμα όπως η δύναμη. Όταν η δύναμη δρα κάθετα σε μια επιφάνεια προκαλεί τάση που εκφράζεται με τη εξίσωση:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (5.4)$$

Όταν η δύναμη δρα υπό γωνία προς ένα επίπεδο η τάση που παράγεται αναλύεται σε δύο συνιστώσες: την τάση που είναι κάθετη σ' αυτό και ονομάζεται **ορθή** (σ_n) και την τάση που είναι παράλληλη σ' αυτό και ονομάζεται **διατμητική** (τ). Τα δυο αυτά ανύσματα ορίζονται από τις σχέσεις:

$$\sigma_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} = \frac{dF_n}{dA} \quad \text{και}$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_s}{\Delta A} = \frac{dF_s}{dA} \quad (5.5)$$

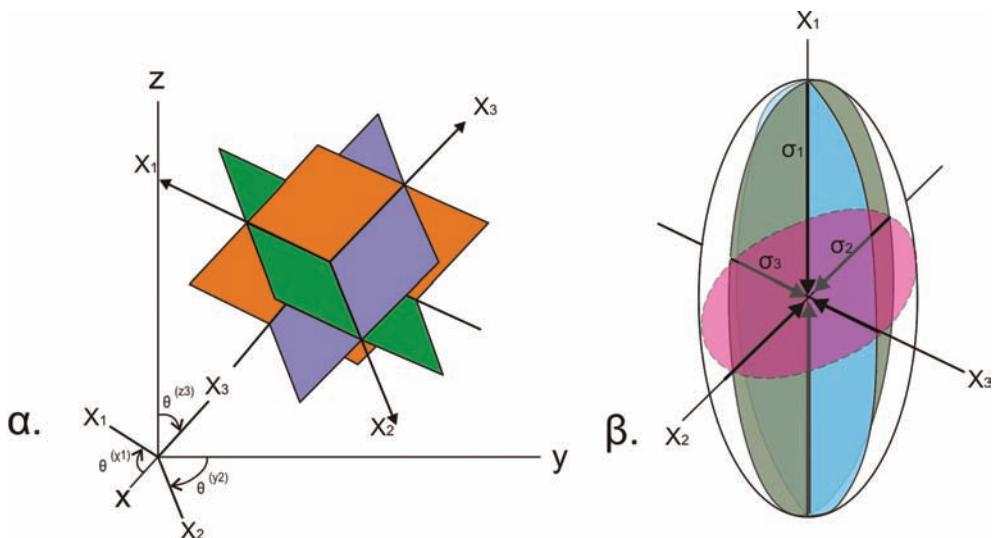
όπου F_n και F_s είναι δυνάμεις που δρουν κάθετα και παράλληλα στο επίπεδο εφαρμογής τους αντίστοιχα.

Οι μονάδες της τάσης είναι το pascal (Pa) ή το bar ($1 \text{ bar} = 10^6 \text{ dynes/cm}^2$). Ένα Pa αντιστοιχεί στην τάση που προκαλείται από τη δύναμη ενός Newton επί μιας επιφάνειας ενός m^2 ($\text{kgmsec}^{-2}/\text{m}^2$). Επειδή το Pa είναι μικρή μονάδα συνήθως χρησιμοποιείται το megapascal ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ pascals}$) το οποίο είναι ισοδύναμο με 10 bars. Ενδεικτικά αναφέρονται ότι μια στήλη πετρώματος ύψους 1 km προκαλεί πίεση 25-30 MPa στη βάση της, ενώ η αντοχή των πετρωμάτων του φλοιού κυμαίνεται μεταξύ 10-100 MPa. Η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της Γης και σε θερμοκρασία 25 °C ισούται με 101325 Pa.

Υπάρχουν δυο κύριοι τύποι τάσης: η **συμπιεστική** και η **εφελκυστική τάση**. Οι συμπιεστικές τάσεις τείνουν να ελαττώσουν το χώρο που καταλαμβάνει το πέτρωμα, ενώ όταν η τάση που εφαρμόζεται τείνει να αυξήσει το χώρο που καταλαμβάνει το

πέτρωμα ονομάζεται εφελκυστική. Τάσεις συμπίεσης ή εφελκυσμού μπορούν να δρουν σε μια, δύο ή τρεις διαστάσεις και τότε προκαλούν αντίστοιχα μοναξονικές, διαξονικές ή τριαξονικές εντατικές καταστάσεις. Η **συνολική τάση** (τριαξονική εντατική κατάσταση, για περισσότερες λεπτομέρειες δες και εγχειρίδια Τεκτονικής Γεωλογίας) όταν ένα πέτρωμα βρίσκεται σε ισορροπία ορίζεται από τρεις κύριους άξονες τάσης. Η περιγραφή της τάσης σε τρεις διαστάσεις εξάγεται κατ' αναλογία από την περιγραφή της σε δύο διαστάσεις. Αποδεικνύεται θεωρητικά ότι οι κύριοι άξονες της τάσης περιλαμβάνονται σε τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα που ονομάζονται **κύρια επίπεδα** τάσης (Εικ. 5.2α). Ο προσανατολισμός των κυρίων επιπέδων αλλά και αξόνων της τάσης σε σχέση με ένα εξωτερικό σύστημα συντεταγμένων σχηματίζει τρεις γωνίες (Εικ. 5.2α, $\theta^{(x1)}$, $\theta^{(y2)}$ και $\theta^{(z3)}$). Στα κύρια επίπεδα της τάσης η διατμητική τάση είναι μηδενική.

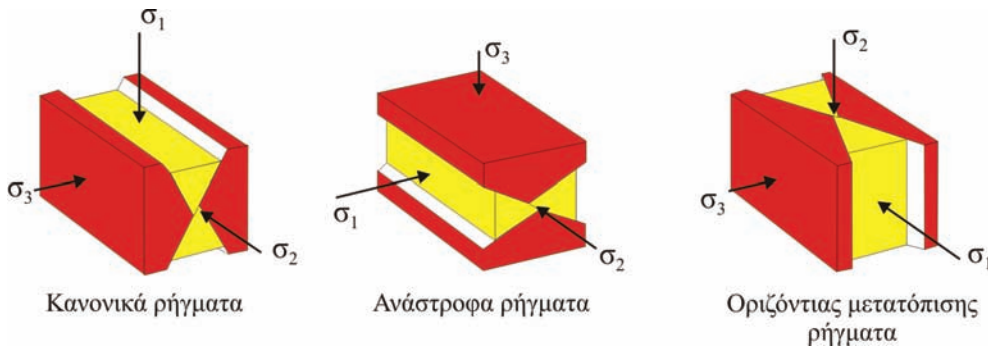
Οι κύριοι άξονες της τάσης συμβολίζονται διεθνώς με τα γράμματα του ελληνικού αλφαβήτου ως σ_1 , σ_2 και σ_3 και ονομάζονται **μέγιστος**, **ενδιάμεσος** και **ελάχιστος** άξονας της τάσης, αντίστοιχα ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). Για την τρισδιάστατη γραφική αναπαράστασή τους χρησιμοποιείται το τριαξονικό ελλειψοειδές (Εικ. 5.2β). Το ελλειψοειδές αυτό ονομάζεται **ελλειψοειδές της τάσεως** και κάθε άξονάς του αντιστοιχεί σε ένα κύριο άξονά της. Με βάση τη διαφορά των απολύτων τιμών των τάσεων καθορίζεται και το σχήμα του ελλειψοειδούς π.χ. πεπλατυσμένο, επιμηκυμένο κτλ. Για απλούστευση θεωρείται ότι ο άξονας της τάσης σ_1 είναι κατακόρυφος, και οι άλλοι δύο άξονες σ_2 και σ_3 περιέχονται στο οριζόντιο επίπεδο (Εικ. 5.2). Η τάση που εφαρμόζεται σε ένα



Εικ. 5.2. (α) Προσανατολισμός των κυρίων επιπέδων της τάσης σε σχέση με ένα εξωτερικό σύστημα συντεταγμένων, (β) Η γραφική αναπαράσταση της τάσης με τη χρήση ενός τρισδιάστατου ελλειψοειδούς.

πέτρωμα μπορεί να προκαλέσει **παραμόρφωση** αν είναι αρκετή ώστε να ξεπεράσει την αντοχή του.

Η θεωρία του Anderson (1942) ήταν η πρώτη προσπάθεια σύνδεσης των αξόνων της τάσης με το σχηματισμό των ρηγμάτων (Εικ. 5.3). Η θεωρία αφορά το σχηματισμό νέων ρηγμάτων σε πετρώματα και τη γεωμετρική σχέση μεταξύ των αξόνων της τάσης, του προσανατολισμού των ρηγμάτων και του τύπου της ολίσθησης σε αντιθετικά ρήγματα (για τον ορισμόδες 6° κεφάλαιο). Η παραδοχή της θεωρίας είναι ότι τα ρήγματα σχηματίζονται εκεί που η διατμητική τάση αποκτά τη μέγιστη τιμή της, δηλαδή σε γωνία 45° σε σχέση με τον κύριο άξονα της τάσης (σ_1) και τον άξονα της ελάχιστης τάσης (σ_3) (Εικ. 5.3). Έτσι σχηματίζονται δύο αντιθετικά ρήγματα που τέμνονται σε μια γραμμή που είναι παράλληλη με τον ενδιάμεσο άξονα της τάσης (σ_2).



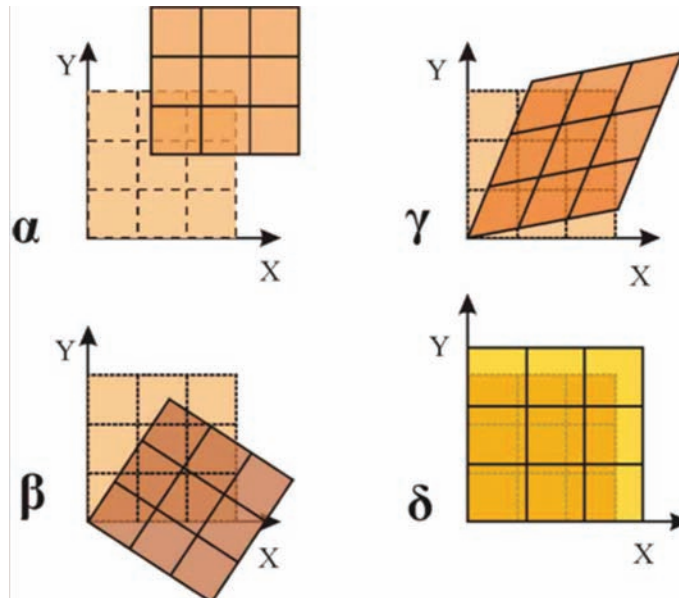
Εικ. 5.3. Τύποι ρηγμάτων και προσανατολισμός των κυρίων αξόνων των τάσεων.

5.2.2. Παραμόρφωση

Παραμόρφωση είναι η αλλαγή στο σχήμα ή στο μέγεθος ενός σώματος (πετρώματος) ως αποτέλεσμα των ασκούμενων σε αυτό δυνάμεων. Η παραμόρφωση μπορεί να είναι **ελαστική**, **εύθραυστη** ή **πλαστική**. Όταν ένα πέτρωμα υφίσταται τη δράση μιας δύναμης, τα συστατικά του μέρη είναι δυνατό να μετατοπίζονται. Οι μετατοπίσεις που προκαλούνται ανήκουν σε τέσσερις τύπους ή σε συνδυασμούς αυτών (Εικ. 5.4 και Πίνακας 5.1):

- Μετατόπιση απολύτως στερεού σώματος.
- Περιστροφή απολύτως στερεού σώματος.
- Αλλαγή σχήματος.
- Αλλαγή όγκου.

Όλες αυτές οι αλλαγές μπορούν να περιγραφούν με ανύσματα που εφαρμόζονται σε υλικά σημεία του σώματος. Τα ανύσματα αυτά αποτελούν τις τροχιές της κίνησης



Εικ. 5.4. Οι τέσσερις τύποι της μετατόπισης: (α) μετατόπιση απολύτως στερεού σώματος, (β) περιστροφή απολύτως στερεού σώματος, (γ) αλλαγή σχήματος και (δ) αλλαγή όγκου.

των υλικών σημείων από την αρχική τους θέση πριν την παραμόρφωση στην τελική τους θέση μετά την παραμόρφωση.

Η παραμόρφωση που υφίσταται ένα πέτρωμα μπορεί να καθορισθεί από πολλά είδη μετρήσεων που προσδιορίζουν π.χ. αλλαγές στα μήκη ευθειών ή αλλαγές στη γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους ή σε σχέση με ένα εξωτερικό σύστημα συντεταγμένων. Αν θεωρήσουμε την παραμόρφωση που υφίστανται οι ακμές και οι γωνίες ενός στερεού σώματος τότε διακρίνουμε δύο περιπτώσεις. Αν όλα τα ανύσματα που περιγράφουν την κίνηση είναι ίσα μεταξύ τους τότε η παραμόρφωση ονομάζεται **ομοιογενής** (homogeneous). Κατά την ομοιογενή παραμόρφωση ευθείες ή παράλληλες γραμμές παραμένουν ευθείες διατηρώντας τον αρχικό παραλληλισμό τους (Εικ. 5.4α). Σε κάθε άλλη περίπτωση όλες οι ευθείες γίνονται καμπύλες γραμμές, οι γωνιακές σχέσεις αλλάζουν και η παραμόρφωση αυτού του είδους ονομάζεται **ετερογενής** (inhomogeneous). Παράδειγμα ετερογενούς παραμόρφωσης είναι η πτύχωση.

Αν θεωρήσουμε την παραμόρφωση που υφίσταται ολόκληρο το στερεό σώμα (πέτρωμα), τότε διακρίνουμε δύο τύπους παραμόρφωσης την **απλή διάτμηση** (simple shear) και την **καθαρή διάτμηση** (pure shear). Η απλή διάτμηση χαρακτηρίζεται από κίνηση όλων των σημείων επί παράλληλων επιπέδων (Εικ. 5.5α και β). Η κίνηση κάθε σημείου θεωρείται ότι γίνεται επί επιπέδων παραλλήλων προς το επίπεδο (xz) ενώ κάθε σημείο μετακινείται σε σχέση με το παρακείμενό του απειροελάχιστα. Τα ανύ-

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: Τύποι μετατόπισης**Μετατόπιση απολύτως στερεού σώματος**

Το πέτρωμα κατά την κίνησή του διατηρεί το αρχικό σχήμα και τον προσανατολισμό κάθε ευθείας στο εσωτερικό του. Το άνωσμα που περιγράφει την κίνηση ενός υλικού σημείου του πετρώματος περιγράφει την κίνηση όλων των σημείων του (Εικ. 5.4α).

Περιστροφή απολύτως στερεού σώματος

Η μετατόπιση συντελείται με διατήρηση του αρχικού σχήματος και στροφή του περί ένα κέντρο. Κάθε σημείο του σώματος κινείται ανάλογα με την απόστασή του από το κέντρο στροφής (Εικ. 5.4β).

Αλλαγή σχήματος

Η μετατόπιση συντελείται με αλλαγή σχήματος. Διακρίνεται η ομοιογενής και η ανομοιογενής μετατόπιση όπου για τα διάφορα σημεία του πετρώματος η μετατόπιση είναι σταθερή ή ποικίλλει (Εικ. 5.4γ).

Αλλαγή όγκου

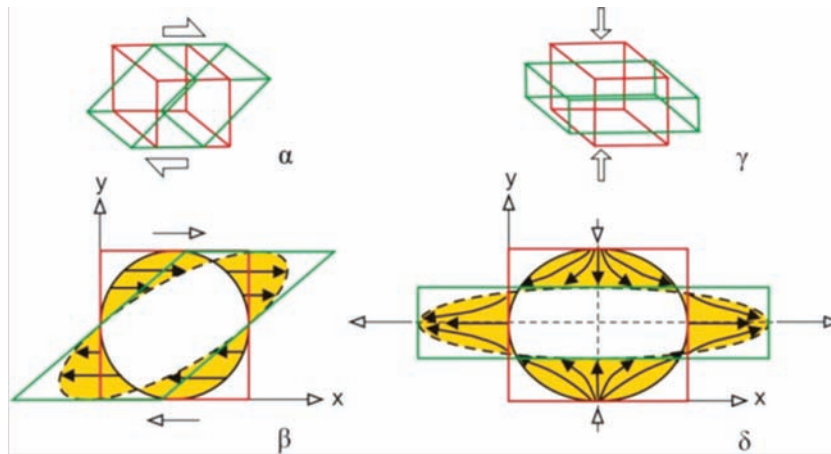
Το πέτρωμα αλλάζει όγκο και η μετατόπιση προκαλείται από την αλλαγή αυτή χωρίς αυτό να αλλάζει θέση στο χώρο (Εικ. 5.4δ).

Οι δύο πρώτοι τύποι κίνησης αντιστοιχούν κυρίως σε αλλαγή θέσης του πετρώματος στο χώρο, ενώ οι άλλοι δυο τύποι μετατόπισης αντιστοιχούν σε αλλαγές με κίνηση γειτονικών τμημάτων του πετρώματος. Οι τέσσερις διακριτοί τύποι μετατόπισης μπορεί να συνδυάζονται ώστε πολλές φορές η μετατόπιση του πετρώματος να οφείλεται σε ταυτόχρονη μετατόπιση- στροφή- αλλαγή σχήματος- και αλλαγή όγκου.

σματα που περιγράφουν αυτή την κίνηση δεν είναι ίσα μεταξύ τους αλλά εξαρτώνται από την απόστασή τους από τον άξονα των (x) (Εικ. 5.5α, β). Η παραμόρφωση αυτή δεν περιλαμβάνει αλλαγή όγκου ή οποιαδήποτε αλλαγή στον άξονα (z). Το επίπεδο (xy) ονομάζεται επίπεδο παραμόρφωσης επειδή όλες οι κινήσεις γίνονται στο επίπεδο αυτό. Η παραμόρφωση μπορεί να ονομασθεί επίπεδη ή διαξονική ή περιστροφική επειδή η αρχική γωνία μεταξύ του άξονα (x) σε σχέση με τον άξονα (y) αλλάζει.

Ανάλογα με τα προηγούμενα και για αλλαγές που γίνονται επί του επιπέδου (xy) διακρίνεται επίσης και η καθαρή διάτμηση που χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφη διαστολή κατά τον άξονα των (x) και ομοιόμορφη συστολή στον άξονα των (y) (Εικ. 5.5γ, δ). Όπως στην απλή διάτμηση έτσι και στην καθαρή διάτμηση θεωρείται ότι δεν γίνονται μεταβολές όγκου και αλλαγές στη διεύθυνση του άξονα (z). Αποτέλεσμα αυτού του είδους παραμόρφωσης είναι ένας νοητός κύκλος στο μη- παραμορφωμένο πέτρωμα να μετατρέπεται σε έλλειψη της οποίας οι άξονες συμπίπτουν με τους

άξονες του αρχικού κύκλου. Στους δύο τύπους παραμόρφωσης αυτό που διαφέρει σημαντικά είναι ο τρόπος κίνησης των υλικών σωματιδίων (Εικ. 5.5β και δ).



Εικ. 5.5. Απλή (α, β) και καθαρή διάτμηση (γ, δ). Στην απλή διάτμηση οι τελικοί άξονες σχηματίζουν γωνία με τους αρχικούς ενώ στην καθαρή διάτμηση οι άξονες παραμένουν σταθεροί, για το λόγο αυτό η καθαρή διάτμηση ονομάζεται και μη περιστροφική παραμόρφωση.

Υπάρχουν πολλοί παράμετροι που συμβάλλουν στον τύπο της παραμόρφωσης σε ένα πέτρωμα, όπως η πίεση, η θερμοκρασία, η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος, η παρουσία ή η απουσία ρευστής φάσης, ο τύπος της τάσης, ο ρυθμός παραμόρφωσης κ.άλ. Γενικότερα όμως θεωρείται ότι η θερμοκρασία, ο ρυθμός παραμόρφωσης και ο τύπος της τάσης συμβάλλουν σημαντικά στην παραμόρφωση. Έχουν διαπιστωθεί τα ακόλουθα για το ρόλο των τριών παραγόντων.

Θερμοκρασία: Ένα ελαστικό-ιξώδες (viscoelastic) υλικό θραύεται πιο εύκολα όταν είναι κρύο, ενώ συμπεριφέρεται πιο πλαστικά όταν είναι ζεστό.

Ρυθμός παραμόρφωσης: Αν ένα υλικό διασταλεί (εκταθεί) απότομα τότε δημιουργούνται διαρρήξεις, ενώ αν το ίδιο ποσό παραμόρφωσης εφαρμοσθεί με αργό ρυθμό τότε το υλικό θα παραμορφωθεί πλαστικά.

Τύπος της τάσης: Αν επιχειρήσουμε να θραύσουμε ένα υλικό συμπιέζοντας το (συστολή) θα δούμε ότι αυτό είναι πρακτικά αδύνατο. Αντίθετα αν το υλικό διασταλεί η θραύση του γίνεται πιο εύκολα. Έτσι, τα περισσότερα υλικά θραύονται ευκολότερα με εφελκυσμό παρά με συμπίεση.

Με βάση τις σύγχρονες μεθόδους τεκτονικής γεωλογίας και σε μια μεγάλη ποικιλία πετρωμάτων είναι δυνατό πολλές από τις παραμέτρους της παραμόρφωσης να ποσοτικοποιηθούν. Η ποσοτικοποίηση της παραμόρφωσης όταν επιτυγχάνεται καθορίζει την αλλαγή του μήκους μιας ευθείας ή μιας γωνίας κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στο βιβλίο Τεκτονική Γεωλογία (Κουκουβέλας 1998).

5.2.3. Τάση: αίτιο ή αποτέλεσμα της παραμόρφωσης;

Οι βασικές αρχές της μηχανικής στην παραμόρφωση των πετρωμάτων περιγράφουν την εύθραυστη και την πλαστική παραμόρφωση (Εικ. 5.6). Όμως επειδή στις συνθήκες της ανώτερης λιθόσφαιρας επικρατεί η εύθραυστου τύπου παραμόρφωση, ο σχολιασμός στο κεφάλαιο αυτό θα περιοριστεί κυρίως σε αυτή. Επιπλέον, η εύθραυστη παραμόρφωση αποτελεί το κύριο τεκτονικό στυλ στη μελέτη της ενεργού τεκτονικής (Εικ. 5.6, άνω σειρά).

Η παραμόρφωση (strain) γενικότερα περιγράφει τις αλλαγές σε ένα στερεό σώμα όσον αφορά το τελικό σχήμα του σε σχέση με το αρχικό του. Η τάση περιγράφει τις δυνάμεις που ενεργούν σε κάθε σημείο αυτού του στερεού σώματος. Αν οι τάσεις είναι αρκετά υψηλές τότε το πέτρωμα θα «ανταποκριθεί» σε αυτές με παραμόρφωση. Η τάση δεν είναι άμεσα μετρήσιμη ούτε ορατή, ωστόσο είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε και να εκτιμήσουμε το καθεστώς και τον προσανατολισμό των τάσεων που εφαρμόστηκαν με βάση την κινηματική των ρηγμάτων (παραμόρφωση) που δημιουργήθηκαν ως αποτέλεσμα αυτής (για τον τρόπο υπολογισμού της τάσης από δεδομένα ρηγμάτων δεξ και υποκεφάλαιο 6.7).

Γενικά, η παραμόρφωση των πετρωμάτων λόγω ενδογενών διεργασιών είναι μια μετρήσιμη παράμετρος ακόμα και σε ρηξιγενείς ζώνες ηλικίας πολλών εκατομμυρίων ετών, π.χ. στο εσωτερικό ορογενών ή ιζηματογενών λεκανών, με τη βοήθεια μεθόδων ανάλυσης της παραμόρφωσης της τεκτονικής γεωλογίας (Κουκουβέλας 1998). Στην περίπτωση ενεργών ρηξιγενών ζωνών η παραμόρφωση μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια σύγχρονων γεωλογικών και γεωδαιτικών τεχνικών (επίγειες μέθοδοι σάρωσης με laser, GPS, κ.ά., δεξ και 4^ο κεφάλαιο). Αντίθετα, η τάση συνήθως συμπεραίνεται αφαιρετικά και χρήζει ιδιαίτερης μεταχείρισης σε σχέση με τις τοπικές τεκτονικές συνθήκες, τον προσδιορισμό του παραμορφωμένου συστήματος και την ομοαξονικότητα των αξόνων παραμόρφωσης και τάσης (Twiss and Moores, 1992). Για τα προβλήματα στον προσδιορισμό της τάσης δεξ στα υποκεφάλαια 6.7 και 6.9.

Σήμερα θεωρείται ότι η παραμόρφωση του στερεού φλοιού της Γης οφείλεται στην αντίδραση της λιθόσφαιρας στην τάση που εφαρμόζεται στα όρια των

λιθοσφαιρικών πλακών ή σε μεγάλης κλίμακας ρηξιγενείς ζώνες. Η κατανόηση της προέλευσης και η διάκριση των διαφορετικών τύπων της τάσης, καθώς και ο προσδιορισμός του προσανατολισμού και του μεγέθους της, αποτελούν σημαντικά εργαλεία στην ανάλυση της τεκτονικής παραμόρφωσης και της σεισμοτεκτονικής. Ο προσδιορισμός των «παλαιο»-τάσεων οι οποίες ήταν ενεργές κατά τη διάρκεια του σχηματισμού των υπό εξέταση τεκτονικών δομών μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τη γεωλογική εξέλιξη μιας περιοχής. Κατ'αντιστοιχία ο προσδιορισμός του σύγχρονου πεδίου τάσεων μιας περιοχής είναι σημαντικός για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Ιδιαίτερα σε ενεργά ρήγματα που σχετίζονται με σεισμούς η κινηματική και η δυναμική ανάλυσή τους χρησιμεύει για να συσχετίζονται τα γεωλογικά στοιχεία στην επιφάνεια της Γης με τα σεισμολογικά δεδομένα που προέρχονται από σειсмоγράμματα.



Εικ. 5.6. Γεωλογικές-τεκτονικές δομές που σχηματίζονται κάτω από διαφορετικούς τύπους τάσης και διαφορετικά στυλ παραμόρφωσης. Παραδείγματα εύθραυστης παραμόρφωσης από αριστερά προς τα δεξιά, ανάστροφο ρήγμα στην Σάμη Κεφαλληνίας, κανονικό ρήγμα στους Χαλκιάδες Θεσσαλίας, οριζόντιας μετατόπισης ρήγμα στη ρηξιγενή ζώνη του Αγίου Ανδρέα, Καλιφόρνια. Παραδείγματα πλαστικής παραμόρφωσης, από αριστερά προς τα δεξιά, πτυχές στο Μαρμάρι Ευβοίας, boudinages στη Βερδικούσα Θεσσαλίας, και πλαστικά ρήγματα στον Κινίδαρο Νάξου.

Παρόλη όμως τη σπουδαιότητα της κατανόησης της έννοιας της τάσης, αυτή παραμένει έως σήμερα μια πολύπλοκη έννοια και έχει αποτελέσει έντονο αντικείμενο συζήτησης στην επιστημονική κοινότητα. Τα τελευταία χρόνια έχουν επικρατήσει δύο διαφορετικές απόψεις για τη σχέση τάσης και παραμόρφωσης. Η μια

άποψη θεωρεί τις τάσεις ως ανεξάρτητες μεταβλητές που δρουν στις γεωλογικές δομές, ενώ η παραμόρφωση αποτελεί την «ανταπόκριση» των πετρωμάτων στην επιβολή των τάσεων (Pollard et al. 1993). Η αντίθετη άποψη θεωρεί ότι η παραμόρφωση εντός του σώματος αποτελεί την ανεξάρτητη μεταβλητή που προκαλεί το «κτίσιμο» των τάσεων στη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου στα πετρώματα. Σύμφωνα με την άποψη αυτή η τάση είναι εξαρτώμενη ανταπόκριση της παραμόρφωσης (Tikoff & Wojtal 1999).

Σε περιπτώσεις όπου έχουμε ετεροαξονική παραμόρφωση (απλή διάτμηση) οι κύριες διευθύνσεις της μετατόπισης δεν είναι παράλληλες ούτε με τους άξονες της απειροελάχιστης παραμόρφωσης ούτε με τους άξονες της πεπερασμένης τελικής παραμόρφωσης. Αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση της ανισοτροπίας του πετρώματος και τις διαταραχές της διεύθυνσης μετατόπισης-κίνησης. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι η ταχύτητα μετατόπισης των ορίων του υπό παραμόρφωση συστήματος «ελέγχει» την παραμόρφωση, ενώ οι τάσεις «υιοθετούν» διευθύνσεις και μεγέθη ώστε να «συμμορφωθούν» με αυτές τις νέες συνθήκες.

Σε διάφορα αναλογικά μοντέλα οι συνθήκες στα όρια του παραμορφωμένου συστήματος, παρόλο που αναφέρονται ως τάσεις, στην πραγματικότητα είναι ταχύτητα ή ρυθμός μετατόπισης (του πιστονιού ή της πλάκας αντίστοιχα). Έτσι η παραμόρφωση (μετατόπιση) πάρα η τάση αποτελεί την ανεξάρτητη μεταβλητή στις περισσότερες πειραματικές διατάξεις στην τεκτονική. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι τάσεις αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της συσσωρευμένης μετατόπισης στο παραμορφωμένο σύστημα.

Μια άλλη προϋπόθεση ώστε να συμπεράνουμε τις τάσεις από την παραμόρφωση είναι η ιστροπία του υλικού που παραμορφώνεται. Στα ισότροπα υλικά η κατανομή των τάσεων με βάση την παραμόρφωση είναι εύκολα κατανοητή. Αντίθετα στα ανισότροπα υλικά, η ανάλυση αυτή είναι πολύπλοκη. Η ετεροαξονική παραμόρφωση λόγω των ανισοτροπιών του υλικού μπορεί να οδηγήσει σε αντιφατικά αποτελέσματα στην ερμηνεία του πεδίου τάσεων (paleostress) κατά την εξέλιξη της παραμόρφωσης σε διαδοχικές τεκτονικές φάσεις (δες και υποκεφάλαια 6.7 και 6.8). Για τις ανάγκες όμως του συγγράμματος θα θεωρήσουμε ως επικρατούσα την άποψη ότι η τάση είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή και η παραμόρφωση το αποτέλεσμα της.