

2. Τεκτονική Ροή και Παραμόρφωση

2.1 Γενικές έννοιες

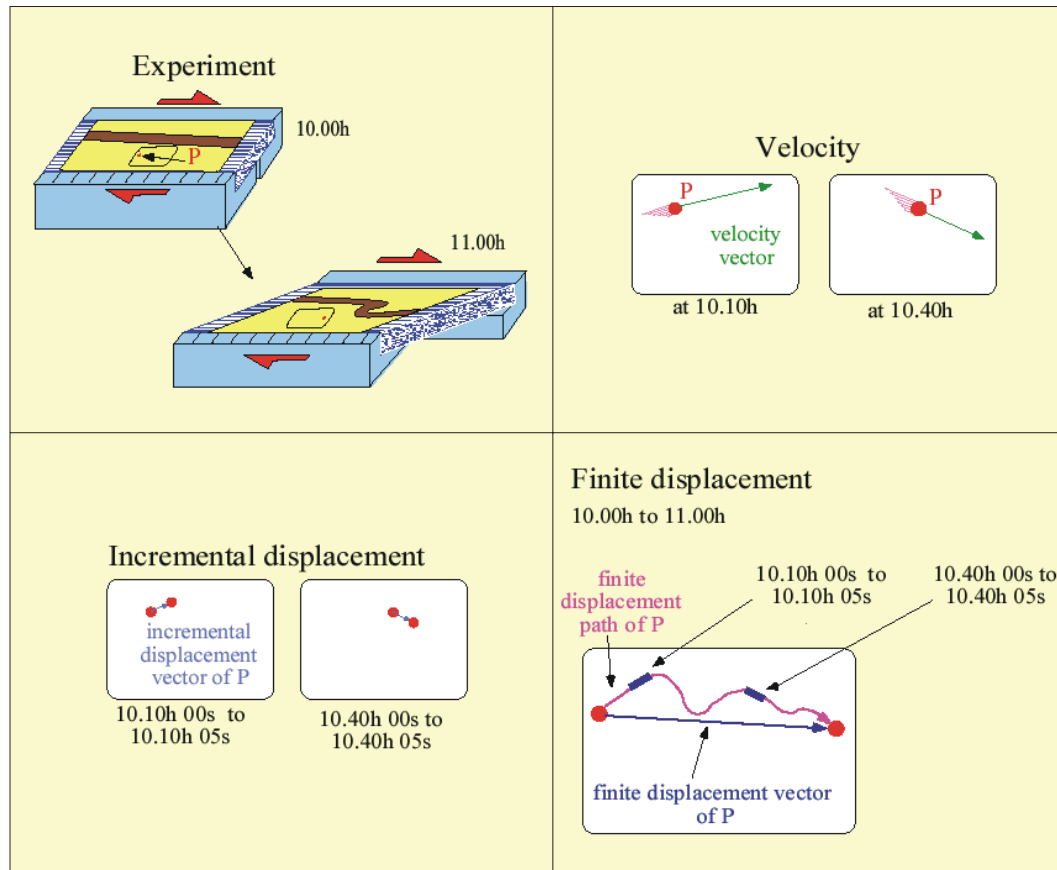
Παρατηρώντας και εξετάζοντας τον τελικό τεκτονικό ιστό ενός πετρώματος σήμερα, όπως αυτός έχει διαμορφωθεί μέσα στο χρόνο, πιθανώς να μπορέσουμε να ανακατασκευάσουμε ολόκληρη ή μέρος από την τεκτονική ιστορία και εξέλιξη του πετρώματος. Η όλη διαδικασία αφορά κατά κύριο λόγο τη μελέτη της μεταβολής του σχήματος του γεωλογικού σώματος, που εντάσσεται στο πεδίο της *κινηματικής (kinematics)*, δηλαδή στη μελέτη της κίνησης των επιμέρους σωματιδίων του υλικού που παραμορφώθηκε, χωρίς αναφορά στις δυνάμεις (τάσεις) που προξένησαν αυτή την κίνηση.

Ας παρακολουθήσουμε το παράδειγμα της Εικ. 2.1 όπου σε ένα κιβώτιο διάτμησης εξομοιώνεται πειραματικά η πτύχωση ενός σκουρόχρωμου ορίζοντα μέσα σε ένα ανοιχτόχρωμο υλικό με διαφορετική πυκνότητα. Έστω ότι το πείραμα διαρκεί μία ώρα (10:00 – 11:00). Κατά τη διάρκεια αυτή ένα σωματίδιο P μετακινήθηκε αναφορικά με τον πυθμένα του κιβωτίου αλλά και με τα υπόλοιπα σωματίδια.

Κάθε χρονική στιγμή μπορούμε να αντιστοιχίσουμε στο P μια ταχύτητα και μια κατεύθυνση της κίνησης, με ένα βέλος που αναπαριστά το *άνυσμα της ταχύτητας (velocity vector)*. Ακολουθώντας το P για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα (π.χ. 5 sec) το ίχνος που θα διαγράψει είναι μια ευθεία γραμμή παράλληλη στο άνυσμα της ταχύτητας και ονομάζεται *άνυσμα επαυξητικής μετατόπισης (incremental displacement vector)*. Σε μια άλλη χρονική στιγμή τα δύο αυτά μεγέθη για το P μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικά. Αυτό σημαίνει ότι η *τροχιά μετατόπισης (displacement path, αναφέρεται και ως τροχιά σωματιδίου – particle path)* από την αρχική μέχρι την τελική θέση αποτελείται από το άθροισμα των επιμέρους ανυσμάτων επαυξητικής μετατόπισης, σε κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί ένα επιμέρους άνυσμα ταχύτητας. Μπορούμε επίσης να ενώσουμε το αρχικό με το τελικό σημείο της τροχιάς του P με ένα άνυσμα που ονομάζεται *άνυσμα πεπερασμένης μετατόπισης (finite displacement vector)*.

Αν η παραπάνω διαδικασία ακολουθηθεί για πολλά επιμέρους σωματίδια P, τότε σε μια χρονική στιγμή θα δημιουργηθεί ένα πρότυπο ανυσμάτων ταχύτητας που ονομάζεται *πρότυπο -τεκτονικής- ροής (flow pattern)*. Το πρότυπο των ανυσμάτων επαυξητικής μετατόπισης ονομάζεται *πρότυπο επαυξητικής παραμόρφωσης (incremental deformation pattern)*, το πρότυπο των τροχιών μετατόπισης ως *τροχιά παραμόρφωσης (deformation path)* και το πρότυπο των ανυσμάτων πεπερασμένης μετατόπισης ως *πρότυπο πεπερασμένης παραμόρφωσης (finite deformation pattern)*. Η διαδικασία της συσσώρευσης της παραμόρφωσης με

το χρόνο είναι γνωστή με το όνομα *προοδευτική παραμόρφωση* (*progressive deformation*), και η *πεπερασμένη παραμόρφωση* (*finite deformation*) αντιπροσωπεύει τη διαφορά στη γεωμετρία ανάμεσα στο αρχικό και τελικό στάδιο του παραμορφωμένου σώματος.

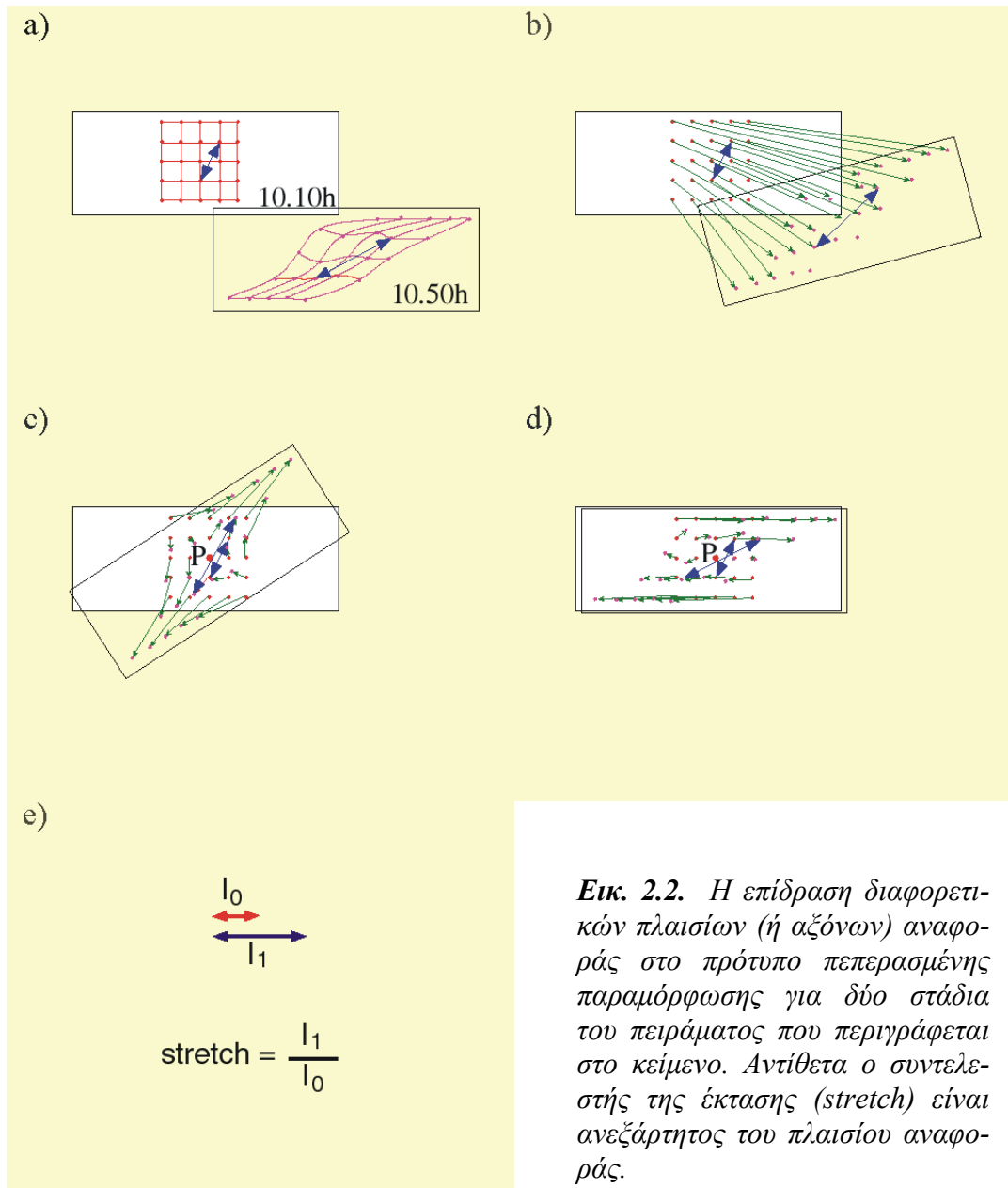


Εικ. 2.1. Σχηματική αναπαράσταση του ανύσματος της ταχύτητας, του ανύσματος επαυξητικής μετατόπισης και του ανύσματος περασμένης μετατόπισης ενός σωματιδίου P σε ένα πείραμα παραμόρφωσης σε κιβώτιο διάτμησης.

Με βάση τη λογική που περιγράφηκε στο παραπάνω πείραμα φαίνεται πως μπορεί κανείς να αναπαραστήσει την τεκτονική ροή και την παραμόρφωση. Όταν τα στάδια που συσχετίζουμε είναι κοντά χρονικά το ένα στο άλλο τότε μπορούμε να καταλήξουμε στο πρότυπο επαυξητικής παραμόρφωσης και τις τροχιές πεπερασμένης μετατόπισης. Αυτό όμως δεν είναι τόσο απλό στην πράξη δεδομένου ότι εξετάζοντας την παραμόρφωση ενός γεωλογικού σώματος συνήθως συσχετίζουμε στάδια που χρονικά απέχουν πολύ μεταξύ τους. Άρα στην προκειμένη περίπτωση το στοιχείο που θα έχουμε είναι το άνυσμα πεπερασμένης μετατόπισης, το οποίο όμως δεν μας δίνει πολλά στοιχεία για την ιστορία της παραμόρφωσης. Άρα στην ουσία το πρότυπο της τεκτονικής ροής μπορεί να αναπαρασταθεί ικανοποιητικά μόνο για επιμέρους στάδια της παραμόρφωσης.

Το σχήμα των προτύπων που περιγράφησαν στο παραπάνω πείραμα σχετίζονται άμεσα με το πλαίσιο αναφοράς (*reference frame*) ή τους άξονες αναφοράς (*reference axes*), που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή (Εικ. 2.2). Στα πειραματικά δεδομένα ως πλαίσιο αναφοράς χρησιμοποιείται το κιβώτιο διάτμησης ή το κέντρο του δείγματος στο οποίο ασκεί-

ται η παραμόρφωση. Στη μικροτεκτονική ως πλαίσιο αναφοράς χρησιμοποιούνται συνήθως τμήματα από το δείγμα. Στην μεγάλη κλίμακα χρησιμοποιείται π.χ. το αυτόχθονο υπόβαθρο, ή ένα γεωγραφικό πλαίσιο όπως π.χ. μια πόλη ή ο Βορράς.

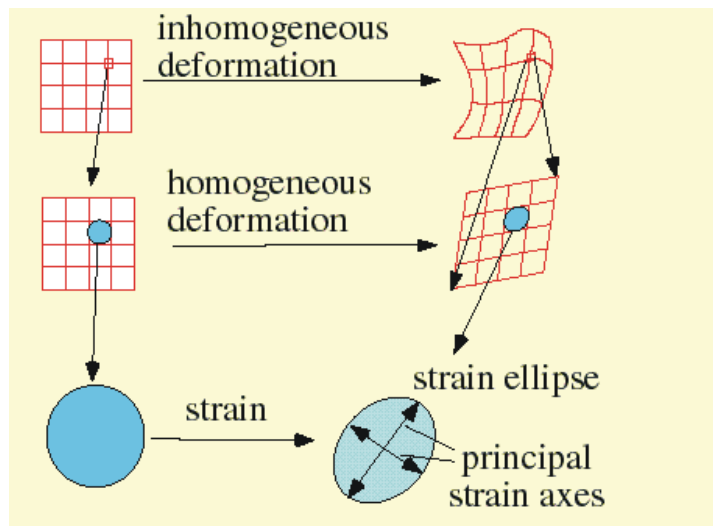


Χρησιμοποιούνται όμως και άλλοι συντελεστές που είναι ανεξάρτητοι από το πλαίσιο αναφοράς, όπως π.χ. η σχετική πεπερασμένη μετατόπιση δύο σωματιδίων, που υπολογίζεται από τη απόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων σε δύο διαφορετικά στάδια (Εικ. 2.2). Ο λόγος της απόστασης των δύο σωματιδίων στο τελικό στάδιο προς την απόστασή τους στο αρχικό καλείται *έκταση (stretch)* της γραμμής που ενώνει τα δύο σωματίδια και δεν εξαρτάται από το πλαίσιο αναφοράς. Στην περίπτωση της τεκτονικής ροής, ο *ρυθμός έκτασης (stretching rate)*, δηλαδή η έκταση στη μονάδα του χρόνου, είναι επίσης ανεξάρτητος από το πλαίσιο αναφοράς.

2.2 Ομοιογενής και Ανομοιογενής Τεκτονική Ροή και Παραμόρφωση

Σε γενικές γραμμές η -τεκτονική- ροή σε ένα γεωλογικό σώμα είναι ανομοιογενής, όπως π.χ. το πρότυπο ροής στο πείραμα που περιγράφηκε στα προηγούμενα διαφέρει από θέση σε θέση και το αποτέλεσμα μετά από ορισμένο χρόνο είναι η ανομοιογενής παραμόρφωση. Οι πτυχές και τα boudins που δημιουργούνται σε ένα επίπεδο στρώμα αποτελούν έκφραση της ανομοιογενούς παραμόρφωσης.

Η τεκτονική ροή στη φύση είναι σε γενικές γραμμές ανομοιογενής και δύσκολο να περιγραφεί με αριθμούς ή απλές φράσεις. Χαρακτηριστικό της ομοιογενούς παραμόρφωσης είναι ότι ευθύγραμμες και παράλληλες "γραμμές-δείκτες" παραμένουν ευθύγραμμες και παράλληλες και ότι κάθε κύκλος παραμορφώνεται σε έλλειψη οι άξονες της οποίας ταυτίζονται με τους άξονες του ελλειψοειδούς παραμόρφωσης (Εικ. 2.3).

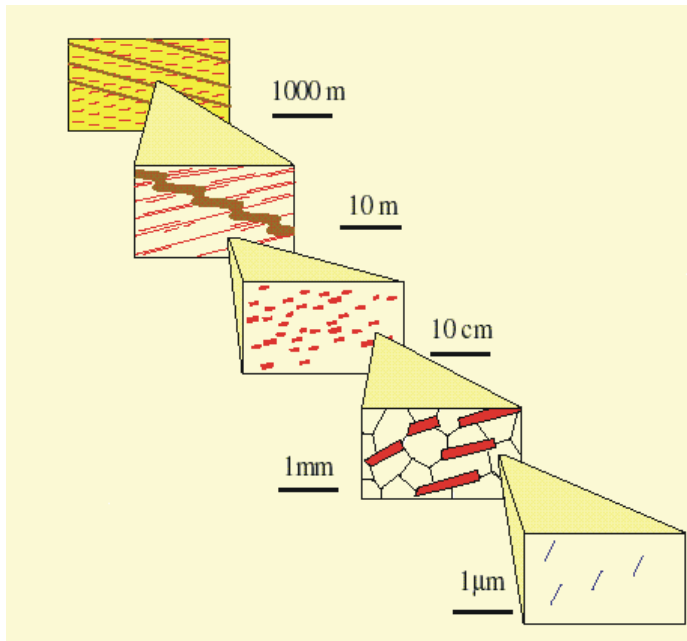


Εικ. 2.3. Χαρακτηριστικά της ομοιογενούς και ανομοιογενούς παραμόρφωσης. Χαρακτηριστικό της ομοιογενούς παραμόρφωσης είναι ότι ευθύγραμμες και παράλληλες "γραμμές-δείκτες" παραμένουν ευθύγραμμες και παράλληλες και ότι κάθε κύκλος παραμορφώνεται σε έλλειψη.

Η ομοιογενής ροή και παραμόρφωση μπορούν να αναπαρασταθούν πλήρως από 4 αριθμούς, τους *τανυστές* (*tensors*). Αυτό τελικά μπορεί να εφαρμοσθεί σε αρκετές περιπτώσεις δεδομένου ότι η απόκλιση της τεκτονικής ροής από το να είναι ανομοιογενής εξαρτάται από την κλίμακα παρατήρησης (Εικ. 2.4). Έτσι σε κάθε πέτρωμα υπάρχουν τμήματα και κλίμακες παρατήρησης που η τεκτονική ροή μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ομοιογενής.

Στο σχήμα της Εικ. 2.4a η στρωμάτωση και η φύλλωση σε κλίμακα Km θεωρούνται ομοιογενείς. Αντίθετα σε κλίμακα μέτρων (Εικ. 2.4b) στρωμάτωση και φύλλωση είναι ανομοιογενείς. Σε επίπεδο cm η φύλλωση είναι ομοιογενής (Εικ. 2.4c), σε επίπεδο λεπτής τομής ανομοιογενής (Εικ. 2.4d) και σε επίπεδο κρυστάλλου επίσης ομοιογενής (Εικ. 2.4e).

Ακολουθεί ένα παράδειγμα αριθμητικής περιγραφής της ομοιογενούς ροής και παραμόρφωσης. Στο πείραμα που περιγράφηκε στα προηγούμενα θεωρούμε ένα μικρό χρονικά τμήμα του πειράματος όπου η παραμόρφωση και η ροή μπορούν να θεωρηθούν ομοιογενείς (Εικ. 2.5a). Σε μία δεδομένη χρονική στιγμή ένα κανονικό πρότυπο των ανυσμάτων της ταχύτητας είναι αυτό που χαρακτηρίζει το πρότυπο της τεκτονικής ροής (Εικ. 2.5b).



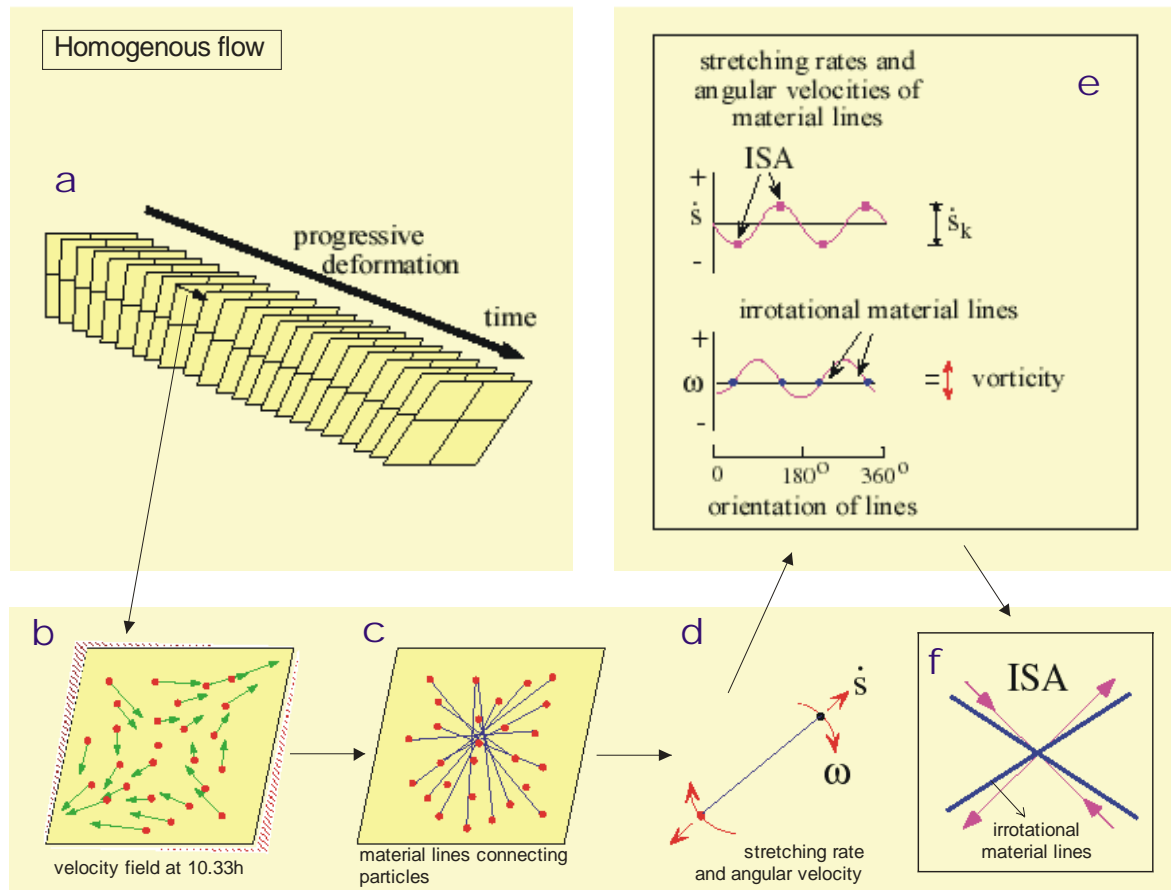
Εικ. 2.4. Η θεώρηση ότι η τεκτονική ροή και η παραμόρφωση είναι ομοιογενείς ή μη είναι άμεσα εξαρτήσιμη από την κλίμακα παρατήρησης.

Θεωρούμε στη συνέχεια ζεύγη από σημεία της ύλης, που συνδέονται μεταξύ τους με ευθείες γραμμές, τις *γραμμές ύλης* (*material lines*, Εικ. 2.5c) και καταγράφουμε το *ρυθμό έκτασης* \dot{S} (*stretching rate* \dot{S}) και τη *γωνιακή ταχύτητα* ω (*angular velocity* ω) αυτών των γραμμών (Εικ. 2.5d). Μπορούν να κατασκευασθούν χ - ψ διαγράμματα του ρυθμού έκτασης και της γωνιακής ταχύτητας σε σχέση με τον προσανατολισμό των γραμμών, μιας και όλες οι παράλληλες γραμμές δίνουν ίδιες τιμές στην ομοιογενή ροή (Εικ. 2.3). Το αποτέλεσμα των διαγραμμάτων αυτών είναι δύο καμπύλες που έχουν το ίδιο γενικό σχήμα για κάθε τύπο ροής απλά μεταβάλλονται ως προς την κατακόρυφη έννοια για διαφορετικούς τύπους ροής (Εικ. 2.5e). Το μήκος κύματος των καμπυλών αυτών μπορεί επίσης να μεταβάλλεται, αλλά είναι πάντα το ίδιο και για τα δύο διαγράμματα για ένα συγκεκριμένο τύπο ροής. Το \max και \min των καμπυλών αυτών απέχουν πάντα 45° . Αν οι καμπύλες αυτές παρουσιάζουν άλλο σχήμα, τότε η ροή δεν είναι ομοιογενής. Τα ειδικά χαρακτηριστικά της ομοιογενούς -τεκτονικής- ροής παρουσιάζονται στις Εικ. 2.5 και 2.6.

Υπάρχουν δύο γραμμές κατά μήκος των οποίων ο ρυθμός έκτασης λαμβάνει τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του, που ονομάζονται *άξονες στιγμιαίας έκτασης* (*instantaneous stretching axes – ISA*). Οι άξονες αυτοί είναι ορθογώνιοι σε κάθε τύπο ροής. Επίσης υπάρχουν δύο γραμμές κατά μήκος των οποίων η γωνιακή ταχύτητα λαμβάνει μηδενική τιμή, που ονομάζονται *irrotational material lines* (*γραμμές ύλης χωρίς περιστροφή*). Το μήκος κύματος της καμπύλης του ρυθμού έκτασης (\dot{S}) ονομάζεται \dot{S}_κ και αποτελεί ένα μέτρο του ρυθμού έκτασης. Η ανύψωση της γραμμής συμμετρίας της καμπύλης της γωνιακής ταχύτητας είναι ένα μέτρο της *στροβιλότητας* (*vorticity*).

Στην περίπτωση που η καμπύλη του ρυθμού έκτασης είναι συμμετρική ως προς τον άξονα μηδενικού ρυθμού έκτασης, δεν συνεπάγεται μεταβολή του χώρου στη ροή και οι γραμμές μηδενικού ρυθμού έκτασης είναι ορθογώνιες (Εικ. 2.6). Η ροή στην περίπτωση αυτή ονομάζεται *ισοχωρική* (*isochoric*). Στην Εικ. 2.6 παρουσιάζονται τρεις τύποι ισοχωρικής ροής. Στη στήλη a παρουσιάζονται οι καμπύλες του ρυθμού έκτασης (\dot{S}) και της γωνιακής ταχύτητας (ω) των γραμμών ύλης (*material lines*) σε σχέση με τον προσανατολισμό των γραμ-

μόν α_k . Στη στήλη b παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των γραμμών ύλης με βέλη που δείχνουν τη φορά του ρυθμού έκτασης και της γωνιακής ταχύτητας. Στη στήλη c παρουσιάζονται τα ανύσματα της ταχύτητας (flow pattern – πρότυπο -τεκτονικής- ροής).



Εικ. 2.5. Η αριθμητική περιγραφή και τα ειδικά χαρακτηριστικά της ομοιογενούς -τεκτονικής- ροής.

Στην περίπτωση που η καμπύλη της γωνιακής ταχύτητας είναι συμμετρική σε σχέση με τον άξονα μηδενικής γωνιακής ταχύτητας, οι γραμμές μηδενικής γωνιακής ταχύτητας (irrotational lines) θα είναι ορθογώνιες και παράλληλες με τους άξονες ISA. Η ροή τότε είναι *ομοαξονική (coaxial)*, ή όπως αλλιώς είναι γνωστή *ροή καθαρής διάτμησης (pure shear flow)*, που χαρακτηρίζεται από ορθορομβική συμμετρία (Εικ. 2.6).

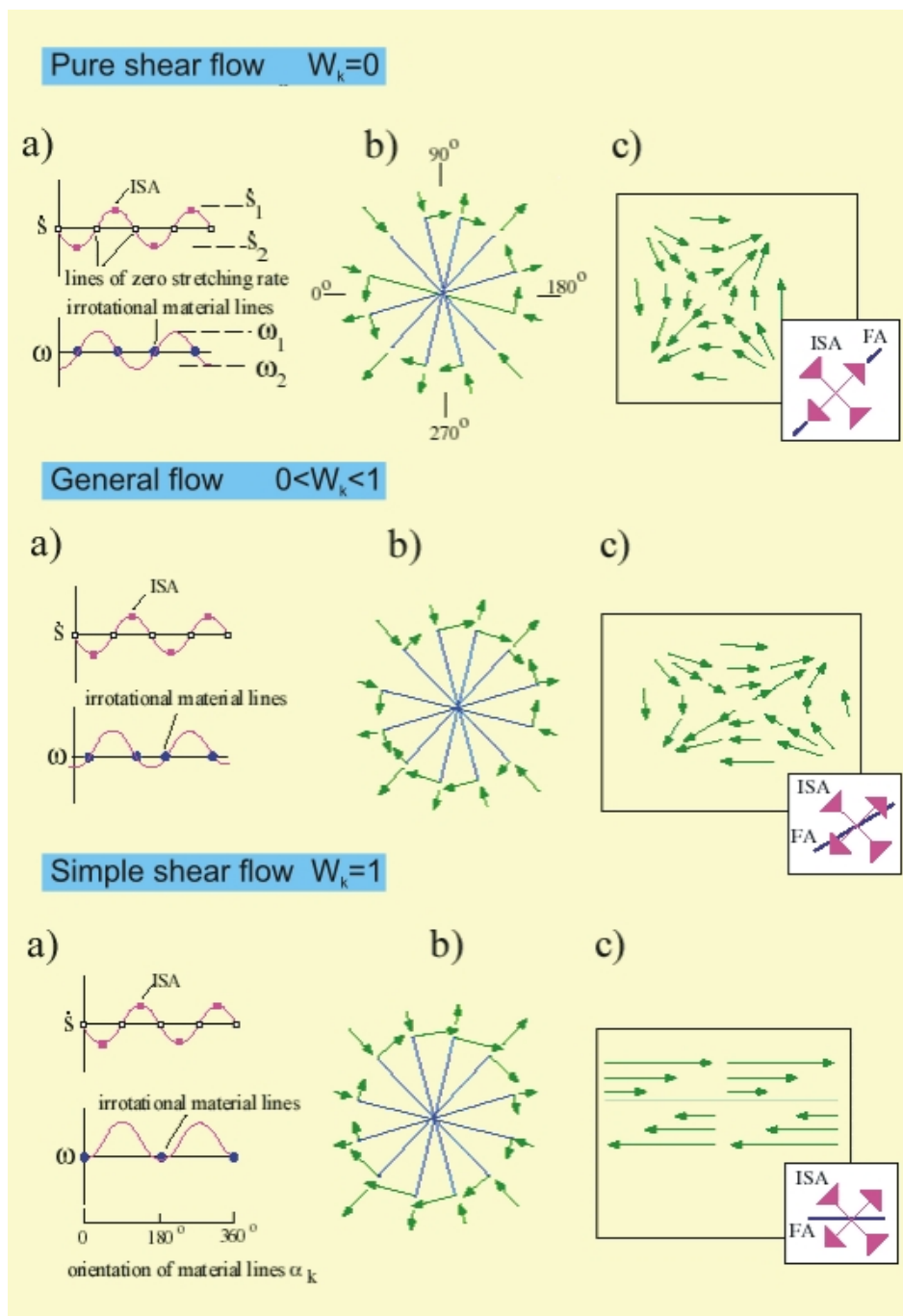
Αν σε όλες τις γραμμές ύλης αυξήσουμε τη γωνιακή ταχύτητα η καμπύλη θα μετακινηθεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω, για δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη περιστροφή αντίστοιχα. Τότε η ροή θα είναι μη-ομοαξονική (non-coaxial) αφού οι irrotational lines δεν θα είναι παράλληλες με τους άξονες ISA (Εικ. 2.6). Η απόκλιση της καμπύλης της γωνιακής ταχύτητας από τον άξονα αποτελεί ένα μέτρο του περιστροφικού χαρακτήρα της ροής, δηλαδή της *στροβιλότητας (vorticity)*.

Υπάρχει μια ειδική περίπτωση όπου η καμπύλη της γωνιακής ταχύτητας εφάπτεται του άξονα μηδενικής γωνιακής ταχύτητας και υπάρχει μόνο μία irrotational line. Αυτός ο τύ-

πος ροής είναι γνωστός σαν ροή απλής διάτμησης (*simple shear flow*, Εικ. 2.6). Όλοι οι μη-ομοαξονικοί τύποι ροής παρουσιάζουν μονοκλινή συμμετρία.

Η αριθμητική περιγραφή των μεγεθών που παρουσιάστηκαν μπορεί να δοθεί από τους παρακάτω τύπους:

$$\begin{aligned}\check{S}_k &= \check{S}_1 - \check{S}_2 = \omega_1 - \omega_2 \\ W_k &= (\omega_1 + \omega_2)/2 \check{S}_k \\ A_k &= (\check{S}_1 + \check{S}_2)/2 \check{S}_k\end{aligned}$$



Εικ. 2.6. Οι τρεις τύποι ισοχωρικής -τεκτονικής- ροής.

Το $\dot{\Sigma}_k$ και αποτελεί ένα μέτρο του ρυθμού έκτασης (strain rate). Το W_k είναι γνωστό ως *αριθμός κινηματικής στροβιλότητας* (kinematic vorticity number) και αποτελεί ένα μέτρο της περιστρεψής ενός τύπου ροής. Το A_k είναι γνωστό ως *αριθμός κινηματικής διόγκωσης* (kinematic dilatancy number) και αποτελεί ένα μέτρο του ρυθμού με τον οποίο μία επιφάνεια διογκώνεται με το χρόνο. Π.χ. ροή απλής διάτμησης χωρίς μεταβολή της περιοχής το $W_k = 1$ και το $A_k = 0$. Η ροή καθαρής διάτμησης έχει $W_k = 0$ και $A_k = 0$ (Εικ. 2.6). Όλες οι πιθανές γεωμετρίες των προτύπων ροής προσδιορίζονται από τα W_k και A_k , δεδομένου ότι το $\dot{\Sigma}_k$ το ρυθμό συσσώρευσης της παραμόρφωσης για ένα συγκεκριμένο τύπο ροής και το α_k περιγράφει τον προσανατολισμό σε σχέση με ένα εξωτερικό πλαίσιο αναφοράς.

Αν η -τεκτονική- ροή, με τη μορφή κάποιου από τα πρότυπα της Εικ. 2.6, λαμβάνει χώρα σε ένα υλικό για κάποιο χρόνο, οι γραμμές ύλης περιστρέφονται κατά έναν άξονα που ταυτίζεται με την επεκτεινόμενη γραμμή ύλης χωρίς περιστροφή (extending irrotational material line). Αυτός ο άξονας μεταφορικά "προσελκύει" (attracts) τις γραμμές ύλης κατά την προοδευτική παραμόρφωση. Στους περισσότερους τύπους της ομοιογενούς ροής στις τρεις διαστάσεις (βλπ. επόμενο κεφάλαιο) υπάρχει μια γραμμή ύλης με αυτή την ιδιότητα που συνήθως έχει τη μορφή γραμμής ή το συνηθέστερο επιπέδου. Δεδομένου λοιπόν ότι οι γραμμές ύλης περιστρέφονται γύρω από τέτοιους άξονες ή επίπεδα, ο μέγιστος άξονας της τελικής (πεπερασμένης? – finite) έλλειψης καταπόνησης (βλπ. επόμενο κεφάλαιο) και άρα και τα περισσότερα στοιχεία του τεκτονικού ιστού στα πετρώματα θα κάνουν το ίδιο. Οι συγκεκριμένες αυτές διευθύνσεις που συμβαίνει αυτό καλούνται *προσελκυστές? του τεκτονικού ιστού* (fabric attractor, FA στην Εικ. 2.6). Ακόμα και αν η ροή δεν είναι ομοιογενής οι fabric attractor θα υφίστανται με τη μορφή καμπυλών και θα "έλκουν" τα στοιχεία του τεκτονικού ιστού. Η διαδικασία αυτή είναι συχνά η αιτία της δημιουργίας πολλών φυλλώσεων και γραμμώσεων στα παραμορφωμένα πετρώματα.

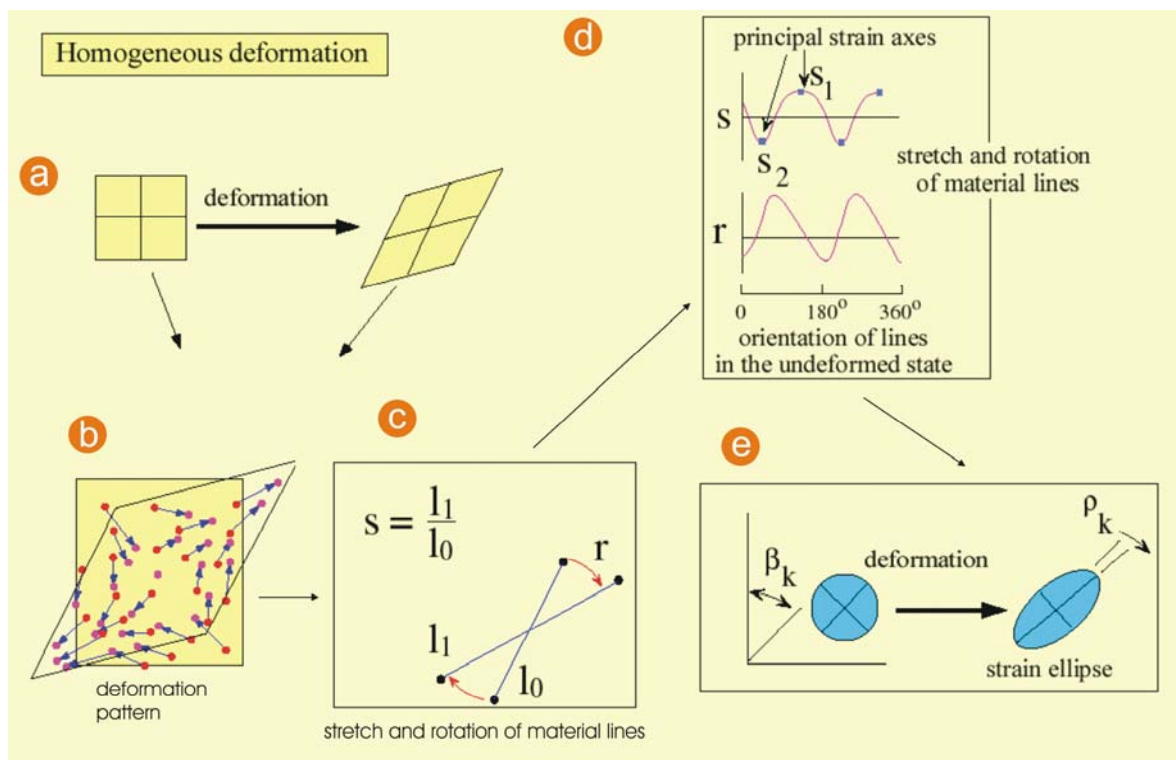
2.3 Παραμόρφωση και Καταπόνηση (Deformation and Strain)

Όπως ακριβώς και με την ομοιογενή -τεκτονική- ροή, η ομοιογενής παραμόρφωση μπορεί να περιγραφεί από την κατανομή των προτύπων της *έκτασης* (stretch) και *περιστροφής* (rotation) ενός συνόλου γραμμών που συνδέουν τα σωματίδια-δείκτες (Εικ. 2.7). Δημιουργούνται έτσι με ανάλογο τρόπο δύο γραφήματα, με τη διαφορά τώρα ότι οι καμπύλες είναι ασύμμετρες. Είναι επίσης αναγκαίο να προσδιορισθεί αν η έκταση και η περιστροφή μιας γραμμής δίνονται για αρχική θέση της γραμμής κατά την έναρξη ή μετά την παραμόρφωση.

Το παράδειγμα της Εικ. 2.7 αναφέρεται στην πρώτη περίπτωση και αντιπροσωπεύει δύο στάδια της εξέλιξης της παραμόρφωσης του πειράματος που αναφέρθηκε στα προηγούμενα. Τα στάδια αυτά απέχουν (χρονικά) αρκετά μεταξύ τους και χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του προτύπου της παραμόρφωσης (Εικ. 2.7b). Σύνολα από σημεία-δείκτες μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με γραμμές ύλης (material lines) και η περιστροφή (rotation "r") και η έκταση (stretch "S") κάθε γραμμής μπορεί να καταγραφεί (Εικ. 2.7c). Μπορούν έτσι να κατασκευασθούν τα διαγράμματα της περιστροφής και της έκτασης σε σχέση με τον αρχικό προσανατολισμό (πριν την παραμόρφωση) των γραμμών ύλης. Η μέγιστα και η ελάχιστη τιμή της έκτασης (Εικ. 2.7d) είναι γνωστές με το όνομα *κύριες εκτάσεις* (principal stretches) ή *κύριες τιμές καταπόνησης* S_1 και S_2 (principal strain values).

Παρατηρούνται κατά μήκος γραμμών που είναι ορθογώνιες πριν και μετά την παραμόρφωση και αντιπροσωπεύουν τους κύριους άξονες καταπόνησης (*principal strain axes*).

Και η ομοιογενής παραμόρφωση μπορεί να περιγραφεί πλήρως με ένα τανυστή (tensor), δηλαδή με τέσσερα συνολικά μεγέθη, που είναι: i) τα S_1 και S_2 που περιγράφουν την καταπόνηση (strain) ή την μεταβολή στο σχήμα, που αντιπροσωπεύει τμήμα της ομοιογενούς παραμόρφωσης, ii) το μέγεθος β_k που περιγράφει τον προσανατολισμό των κύριων αξόνων καταπόνησης σε ένα πλαίσιο (ή άξονες) αναφοράς κατά την έναρξη της παραμόρφωσης, iii) το μέγεθος ρ_k που αντιπροσωπεύει την περιστροφή των κύριων αξόνων καταπόνησης στο πλαίσιο αναφοράς μεταξύ του αρχικού και τελικού σταδίου (Εικ. 2.7e). Επισημαίνεται ότι η παραμόρφωση (*deformation*) προσδιορίζεται από την καταπόνηση (*deformation*, που περιγράφει μόνο τη μεταβολή στο σχήμα) και τη συνιστώσα της περιστροφής ρ_k . Άρα οι δύο αυτοί όροι καλό είναι να μην χρησιμοποιούνται ως συνώνυμα.



Εικ. 2.7. Η αριθμητική περιγραφή και τα ειδικά χαρακτηριστικά της ομοιογενούς παραμόρφωσης.

Στην ομοιογενή παραμόρφωση ένας κύκλος παραμορφώνεται σε έλλειψη (Εικ. 2.4 & 2.7). Το σχήμα αυτής της έλλειψης αποτελεί ένα μέτρο της καταπόνησης και οι κύριοι άξονες του ελλειψοειδούς αντιπροσωπεύουν τους κύριους άξονες καταπόνησης. Αν ο αρχικός κύκλος έχει ακτίνα ίση με τη μονάδα, η έλλειψη αυτή είναι γνωστή ως *έλλειψη καταπόνησης* (*strain ellipse* –στην ελληνική βιβλιογραφία συνήθως αναφέρεται ως *έλλειψη παραμόρφωσης*) και τα μήκη των κύριων αξόνων καταπόνησης είναι τα S_1 και S_2 αντίστοιχα.

Η δυσδιάστατη περιγραφή της -τεκτονικής- ροής και παραμόρφωσης που περιγράφηκε στα προηγούμενα μπορεί εύκολα να επεκταθεί και στις τρεις διαστάσεις. Αν η ροή είναι ομοιογενής μπορεί να αναπαρασταθεί στις τρεις διαστάσεις ως τανυστής με εννέα συνι-

στάσεις. Τρεις από αυτές καθορίζουν τους ρυθμούς έκτασης (stretching rates S) κατά μήκος τριών ορθογωνίων αξόνων στιγμιαίας έκτασης (Instantaneous Stretching Axes – ISA), τρεις καθορίζουν τον προσανατολισμό και το μέγεθος του ανύσματος στροβιλότητας (vorticity vector) και τρεις περιγράφουν τον προσανατολισμό του προτύπου -τεκτονικής- ροής (flow pattern) στο χώρο.

Η ομοιογενής παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις επίσης αναπαρίσταται ως τανυστής με εννέα τιμές. Τρεις τιμές προσδιορίζουν τις κύριες εκτάσεις (principal stretches) ή τιμές της κύριας καταπόνησης (principal strain values) S_1 , S_2 και S_3 , κατά μήκος τριών ορθογώνιων κυρίων αξόνων καταπόνησης (principal strain axes), τρεις περιγράφουν την περιστροφή των γραμμών ύλης, που συμπίπτουν με τους κύριους άξονες καταπόνησης από το στάδιο της μη-παραμόρφωσης στο στάδιο της παραμόρφωσης και τρεις περιγράφουν τον προσανατολισμό των κυρίων αξόνων καταπόνησης στο χώρο. Επισημαίνεται και πάλι ότι η παραμόρφωση, σε αντίθεση με τη ροή, συγκρίνει το στάδιο της μη-παραμόρφωσης με το στάδιο της παραμόρφωσης και ως εκ τούτου μπορεί να περιγραφεί με πολλούς τρόπους, ανάλογα με το πλαίσιο (ή άξονες) αναφοράς.

Η καταπόνηση στις τρεις διαστάσεις αποτελεί μια συνιστώσα της παραμόρφωσης στις τρεις διαστάσεις και μπορεί να περιγραφεί με τρεις τιμές που αντιπροσωπεύουν τις κύριες εκτάσεις (principal stretches) S_1 , S_2 και S_3 . Κατά αναλογία με τις δύο διαστάσεις και την έλλειψη καταπόνησης, στις τρεις διαστάσεις σχηματίζεται έτσι το *ελλειψοειδές καταπόνησης* (strain ellipsoid –στην ελληνική βιβλιογραφία αναφέρεται συνήθως ως *ελλειψοειδές παραμόρφωσης*). Οι κύριοι άξονες της καταπόνησης ταυτίζονται με τους τρεις άξονες συμμετρίας του ελλειψοειδούς αυτού, που συνήθως αναφέρονται ως X , Y και Z άξονες της καταπόνησης (από τον μέγιστο στον ελάχιστο αντίστοιχα).

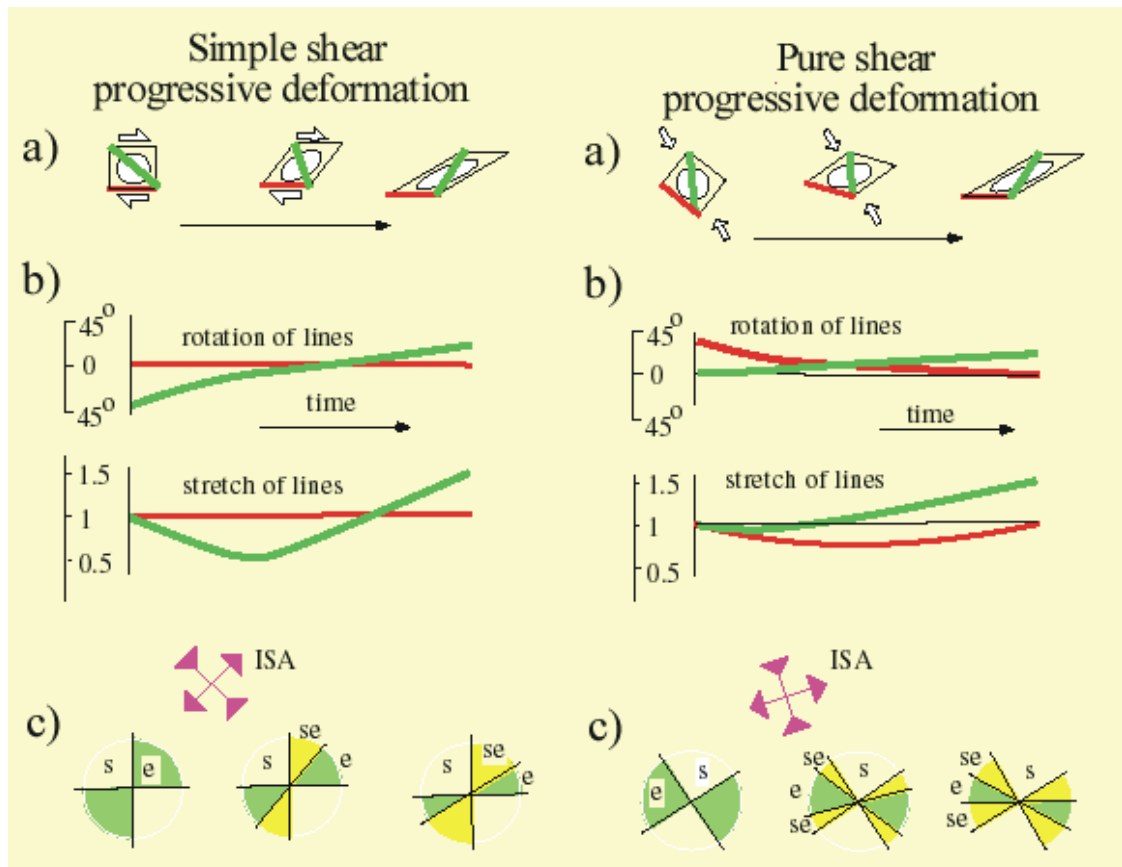
Δεδομένου ότι η παρατήρηση σε τομές στην ύπαιθρο, σε δείγματα, ή σε λεπτές τομές στο μικροσκόπιο γίνεται σε δύο διαστάσεις, πρέπει να εξετάζονται τομές σε πολλές διευθύνσεις ώστε να επιτυγχάνεται η περιγραφή της -τεκτονικής- ροής και παραμόρφωσης στις τρεις διαστάσεις.

2.4 Προοδευτική και Ολική (Πεπερασμένη? –Finite) Παραμόρφωση

Ένα ομοιογενές πρότυπο -τεκτονικής- ροής οδηγεί στη συσσώρευση ομοιογενούς παραμόρφωσης. Στην Εικ. 2.8a παρουσιάζεται το πώς η συνολική έκταση και περιστροφή των γραμμών ύλης (material lines) μεταξύ τους μπορεί να είναι πανομοιότυπες σε καθεστώς παραμόρφωσης που οφείλονται σε απλή και καθαρή διάτμηση. Η ομοιογενής ολική (πεπερασμένη? –finite) παραμόρφωση δεν δίνει πληροφορίες για τη "διαδρομή" που ακολούθησε η παραμόρφωση, δηλαδή για την προοδευτική παραμόρφωση.

Η "ιστορία" και η εξέλιξη της έκτασης και της περιστροφής των γραμμών ύλης δεν εξαρτάται από τον τύπο της ροής, όπως φαίνεται από το σχήμα της Εικ. 2.8b. Αν μελετηθεί η εξέλιξη της έκτασης (stretch) όλων των γραμμών ύλης, η διαφορά στο πρότυπο της ροής είναι ακόμη πιο εμφανής (Εικ. 2.8c). Αν η παραμόρφωση είναι το αποτέλεσμα ροής από καθαρή διάτμηση, η ορθορομβική συμμετρία του προτύπου ροής αντανακλάται στη συμμετρία που παρουσιάζει η κατανομή των γραμμών ύλης με διαφορετική ιστορία παραμόρφωσης (Εικ. 2.8c). Η εξέλιξη της παραμόρφωσης σε καθαρή διάτμηση όπου το $Wk = 0$ (δηλαδή ο αριθμός κινηματικής στροβιλότητας –kinematic vorticity number, που δείχνει

το μέτρο της περιστροφής, είναι μηδέν), είναι γνωστή και ως *ομοαξονική προοδευτική παραμόρφωση* (*coaxial progressive deformation*). Η εξέλιξη της προοδευτικής παραμόρφωσης στο χρόνο, με τύπους ροής όπου $Wk \neq 0$, όπως η απλή διάτμηση, αναφέρεται και ως *μη-ομοαξονική προοδευτική παραμόρφωση* (*non-coaxial progressive deformation*) και η μορφή της προκύπτουσας κατανομής των γραμμών ύλης παρουσιάζει μια μονοκλινική συμμετρία (Εικ. 2.8c). Η διαφορά αυτή στην εξέλιξη της έκτασης (*stretch*) των γραμμών ύλης στα πετρώματα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφορετικών τεκτονικών ιστών.



Εικ. 2.8. Τα αποτελέσματα της εξέλιξης της παραμόρφωσης στο χρόνο (βλ. κείμενο). Στο c) τα διαγράμματα δείχνουν την κατανομή όλων των γραμμών ύλης των τετραγώνων που παραμορφώνονται στα a). Η επεξήγηση στα διαγράμματα αυτά δείχνει που οι γραμμές βραχύνονται (*s*), εκτείνονται (*e*) ή πρώτα βραχύνονται και μετά εκτείνονται (*se*) για κάθε στάδιο της προοδευτικής παραμόρφωσης.

Αν η παραμόρφωση είναι ομοιογενής σε όλες τις κλίμακες παρατήρησης δεν είναι δυνατό να προσδιορισθούν τα επιμέρους αποτελέσματα κατά την πορεία και εξέλιξη της προοδευτικής παραμόρφωσης. Στην περίπτωση όμως που σε ορισμένες κλίμακες η παραμόρφωση χαρακτηρίζεται ως ανομοιογενής, κάτι που είναι σύνηθες στα παραμορφωμένα πετρώματα, η καθαρής διάτμησης και απλής διάτμησης προοδευτική παραμόρφωση μπορεί να δημιουργήσει ευδιάκριτους διαφορετικούς τεκτονικούς ιστούς. Και είναι ακριβώς αυτή η μονοκλινική συμμετρία στον τεκτονικό ιστό που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της φοράς διάτμησης (βλ. κεφάλαιο 5 "Ζώνες Διάτμησης").

Έτσι λοιπόν συνήθως είναι δυνατό να αντλήσουμε κάποια πληροφορία για την πορεία της παραμόρφωσης εξετάζοντας το συνολικό (πεπερασμένο? –finite) τεκτονικό ιστό της παραμόρφωσης, αν και στη φύση είναι αδύνατο να γίνει πλήρης αναπαράσταση και ανακατασκευή της "ιστορίας" της παραμόρφωσης.

Οι παρατηρήσεις για την -τεκτονική- ροή και παραμόρφωση που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα με αφορμή ένα πείραμα στο κιβώτιο διάτμησης, μπορούν να εφαρμοσθούν και σε οποιαδήποτε επιφάνεια μέσα στα παραμορφωμένα πετρώματα, αν και οι ταχύτητες είναι προφανώς πάρα πολύ μικρές. Το πρότυπο της ομοιογενούς ροής μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε τι θα συμβεί αν ένα πέτρωμα υφίσταται προοδευτική παραμόρφωση μέσα από την λειτουργία επιμέρους τύπων ροής, με την προϋπόθεση βέβαια ότι αυτό παραμορφώνεται σαν σύνολο, χωρίς ρήγματα στην κλίμακα παρατήρησης.

Δυστυχώς όμως στα παραμορφωμένα πετρώματα, σε αντίθεση με το πείραμα, πρέπει να ανακατασκευάσουμε την ιστορία της παραμόρφωσης από την ολική–τελική παραμόρφωση και τον ολικό–τελικό τεκτονικό ιστό, που παρατηρούμε σε μια εμφάνιση στην ύπαιθρο ή σε ένα δείγμα. Αν η αρχική μορφή και γεωμετρία του υλικού που παραμορφώνεται είναι γνωστή (π.χ. τα μήκη και οι γωνίες στην περίπτωση που έχουμε απολιθώματα, ορυκτά ή άλλα χαρακτηριστικά σώματα), είναι δυνατόν να προσδιορισθούν το μέγεθος και ο προσανατολισμός της ολικής (πεπερασμένης –finite) καταπόνησης, αλλά χωρίς συμπληρωματικές πληροφορίες, λίγα μόνο μπορεί να πει κανείς για την πορεία και εξέλιξη της παραμόρφωσης από το αρχικό μέχρι το τελικό στάδιο.

2.5 Τάση και Παραμόρφωση

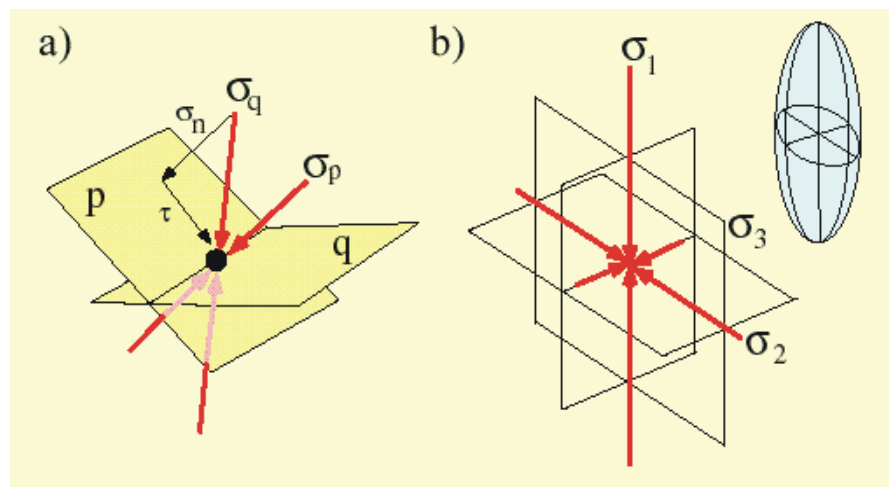
Για να ολοκληρωθεί το κεφάλαιο αυτό δίνονται λίγα μόνο στοιχεία για το θέμα της δυναμικής ανάλυσης, δεδομένου ότι αυτό αποτελεί αντικείμενο κάθε βιβλίου τεκτονικής και δεν έχει διαφορετική σημασία και έννοια στη Μικροτεκτονική. Αν και στην τεκτονική (και μικροτεκτονική) ανάλυση είναι συνήθως δυνατό να γίνει μόνο αναπαράσταση της κινηματικής εξέλιξης, συνήθίζεται να δίνεται και ένα πλαίσιο για το ποιες δυνάμεις οδήγησαν στην ροή και παραμόρφωση. Αυτή ακριβώς η μελέτη της σχέσης ανάμεσα στις δυνάμεις και τη μεταβολή στο σχήμα είναι η *δυναμική ανάλυση*. Συνήθως οι δυνάμεις περιγράφονται μέσα από το μέγεθος των *τάσεων* (*stress*), δηλαδή από τη δύναμη που εξασκείται στη μονάδα επιφάνειας.

Στην Εικ. 2.9 παρουσιάζεται το πλαίσιο των τάσεων και της δυναμικής ανάλυσης. Οι επιφάνειες p και q , που διέρχονται από ένα σημείο σε ένα πέτρωμα που βρίσκεται υπό την επίδραση τάσεων, έχουν κάθε μία από αυτές ένα διαφορετικό άνυσμα τάσης σ_p και σ_q που σχετίζεται με αυτές. Κάθε άνυσμα τάσης μπορεί να αναλυθεί στο επίπεδο σε δύο συνιστώσες, την *κανονική τάση* (σ_n) και την *διατμητική* (τ). Το συνολικό καθεστώς των τάσεων στο συγκεκριμένο σημείο μπορεί να περιγραφεί από ένα τανυστή που αντιπροσωπεύεται από τρία ορθογώνια κύρια ανύσματα τάσεων που επιδρούν σε τρεις ορθογώνιες επιφάνειες. Αυτοί οι *κύριοι άξονες τάσεων* (*principal stress axes*) ταυτίζονται με τους άξονες συμμετρίας του *ελλειψοειδούς των τάσεων* (*stress ellipsoid*, Εικ. 2.9b).

Σε πολλές εφαρμογές οι τάσεις διακρίνονται σε *κύρια τάση* (*main stress*, $\sigma_{\text{mean}} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 / 3$) και σε *διαφορική τάση* (*differential stress*, $\sigma_{\text{diff}} = \sigma_1 - \sigma_3$ ή $\sigma_1 - \sigma_2$ ή $\sigma_2 - \sigma_3$). Υπάρχει και ο όρος *αποκλίνουσα τάση* (*deviatoric stress*) που καθορίζεται ως $\sigma_{\text{dev}} = \sigma_n - \sigma_{\text{mean}}$

που περιγράφει πόσο η κανονική τάση σε κάθε διεύθυνση αποκλίνει από την κύρια τάση. Οι διαφορικές και αποκλίνουσες τάσεις είναι οι πιο σημαντικές για τους γεωλόγους γιατί αντιπροσωπεύουν την αιτία της μόνιμης καταπόνησης στα πετρώματα.

Σημειώνεται επίσης ότι οι διευθύνσεις των κύριων αξόνων των τάσεων και της καταπόνησης σπάνια συμπίπτουν. Οι άξονες των τάσεων μπορεί να είναι παράλληλες στη ροή και στους στιγμιαίους άξονες έκτασης (ISA), αλλά μόνο στην περίπτωση που, από μηχανική άποψη, το πέτρωμα είναι ισότροπο. Στην πράξη βέβαια αυτό δεν είναι ο κανόνας, ιδιαίτερα όταν τα πετρώματα έχουν ήδη μια φύλλωση. Επίσης οι άξονες της ολικής (πεπερασμένης? –finite) καταπόνησης περιστρέφονται και απομακρύνονται από τους ISA με την προοδευτική παραμόρφωση, αν η ροή είναι μη-ομοαξονική.



Εικ. 2.9. Παρουσίαση της ανάλυσης των τάσεων σε ένα γεωλογικό σώμα.

Υπενθυμίζεται ότι η κατακόρυφη κανονική τάση που ασκείται σε μια οριζόντια επιφάνεια στο βάθος και οφείλεται στο βάρος των υπερκειμένων ιζημάτων, καλείται *λιθοστατική πίεση (lithostatic pressure)* με δεδομένο ότι για πρακτικούς λόγους και επειδή οι διαφορικές τάσεις θεωρούνται πολύ μικρές σε μεγάλα βάθη, η τάση αυτή συμπεριφέρεται ισότροπα. Η λιθοστατική πίεση που ασκείται σε ένα σημείο είναι ομοιόμορφη σε όλες τις κατευθύνσεις. Αν, τώρα, μια διαφορική τάση είναι παρούσα ο όρος κύρια τάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για τον όρο λιθοστατική πίεση. Αν οι πόροι του πετρώματος είναι ανοικτοί στην επιφάνεια, μια *πίεση των ρευστών (fluid pressure)* υπάρχει στους πόρους που είναι 2,5-3 φορές μικρότερη από τη λιθοστατική πίεση στο ίδιο βάθος. Αν οι πόροι είναι μερικώς κλειστοί η πίεση των ρευστών των πόρων μπορεί να προσεγγίσει το μέγεθος της λιθοστατικής πίεσης ή της σ_3 . Σε αυτή την περίπτωση τα πετρώματα μπορεί να θραύονται ακόμα και σε μεγάλα βάθη και αυτός είναι ένας λόγος που αναπτύσσονται φλέβες (συμπεριλαμβάνονται και οι ινώδεις φλέβες – fibrous veins) σε πολλά μεταμορφωμένα πετρώματα (βλπ. κεφάλαιο 6).

