



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Τεκτονική Γεωλογία

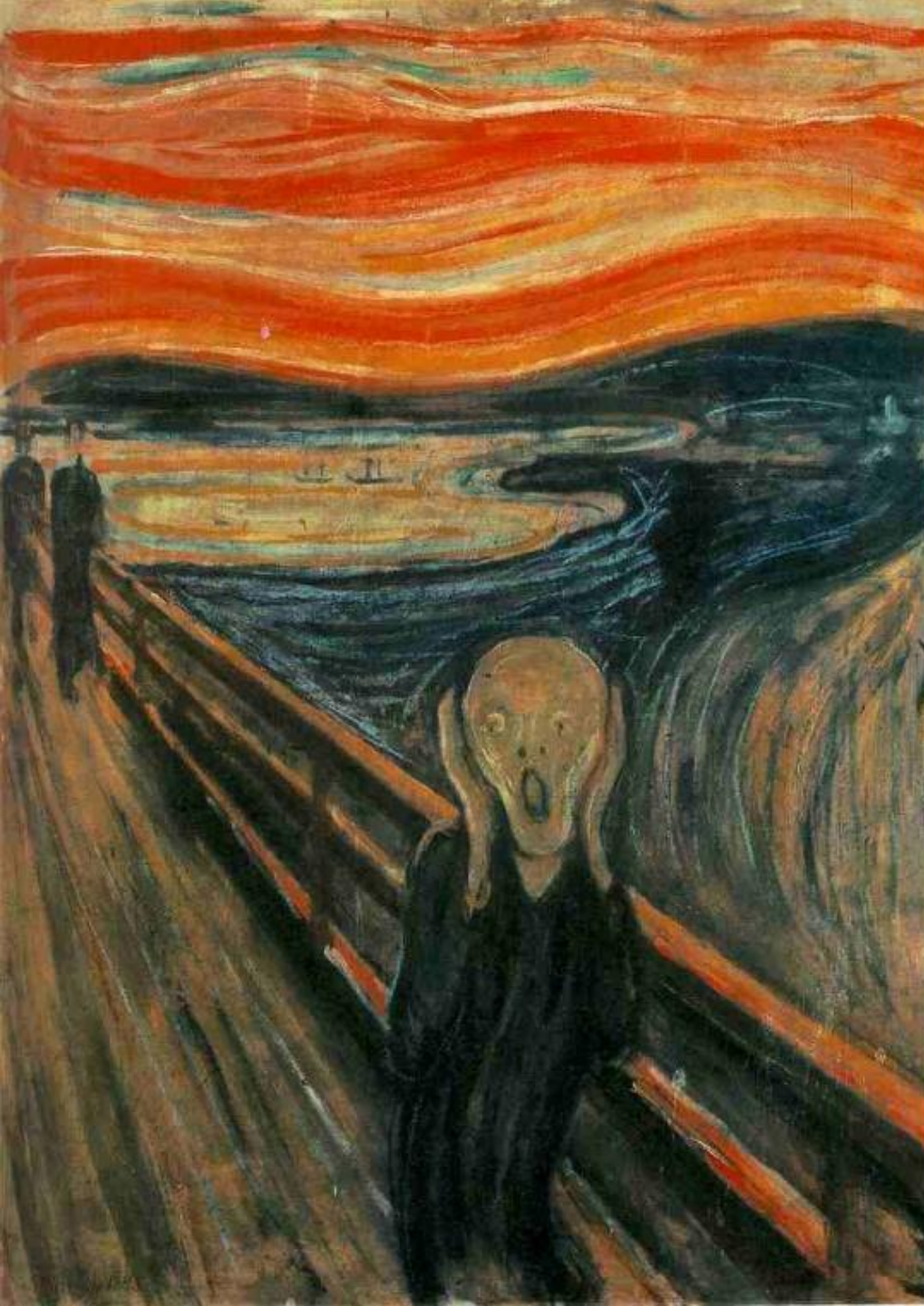
Ενότητα 2: Παραμόρφωση και Τροπή

Στυλιανός Λόζιος

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

## Παραμόρφωση και Τροπή



Η "κραυγή" ("skrik") είναι μία σειρά από εξπρεσιονιστικούς ζωγραφικούς πίνακες του Νορβηγού Edvard Munch, που απεικονίζει μια αγωνιούσα, παραμορφωμένη μορφή, με φόντο ουρανό σε χρώμα κόκκινο του αίματος. Συμβολίζει το ανθρωπινό είδος κάτω από την πίεση (τάση) του υπαρξιακού τρόμου.

Οι **τεκτονικές δομές** που παρατηρούμε στα πετρώματα αντανakλούν μεταβολές που έχουν υποστεί ως προς το **σχήμα** τους, αλλά και πιθανή **μετάθεση** στο χώρο. Σε γενικές γραμμές στις μεταβολές αυτές αναφερόμαστε με τον όρο **παραμόρφωση** και το πρώτο ερώτημα που τίθεται είναι ποιο ήταν το **σχήμα** του γεωλογικού σώματος **πριν την παραμόρφωση**, αλλά και από ποια **πιθανά στάδια** πέρασε μέχρι να πάρει την τελική του μορφή;

Για να κατανοήσουμε τις τεκτονικές δομές πρέπει να κατανοήσουμε τις **βασικές αρχές** της **παραμόρφωσης**, που περιλαμβάνουν **ορισμούς, μαθηματική περιγραφή** και **τεχνικές μέτρησης** της παραμόρφωσης στα πετρώματα.

Το βασικό αίτιο της παραμόρφωσης είναι οι **δυνάμεις** και οι **τάσεις** που ασκούνται στα πετρώματα, οι οποίες δεν είναι άμεσα ορατές, αλλά μπορούν να προκύψουν από τη μελέτη της παραμόρφωσης. Η **σχέση** τους όμως **δεν είναι απλή** και ακόμα και ο πιο ακριβής καθορισμός του εντατικού καθεστώτος δεν μπορεί να προβλέψει την παραμόρφωση (τεκτονική δομή) που θα προκύψει αν δεν ληφθούν υπόψη μια σειρά από άλλα στοιχεία, όπως οι **φυσικές ή μηχανικές ιδιότητες** του πετρώματος, η **πίεση** και η **θερμοκρασία** που επικρατούν κατά την παραμόρφωση, ο **χρόνος** κλπ.

Η σχέση τάσεων και παραμόρφωσης είναι ακόμα πιο πολύπλοκη στα πετρώματα αν ληφθεί υπόψη ότι αρκετές φορές αυτά έχουν υποστεί **πολλαπλές παραμορφωτικές φάσεις**, σε διαφορετικές συνθήκες και κάτω από **διαφορετικά εντατικά πεδία**.

Η γνώση του τοπικά επικρατούντος πεδίου τάσεων έχει αρκετές **πρακτικές εφαρμογές** όπως στην αξιολόγηση των εργασιών **διάνοιξης σηράγγων** και στην **διάνοιξη γεωτρήσεων** για πετρέλαιο ή νερό.



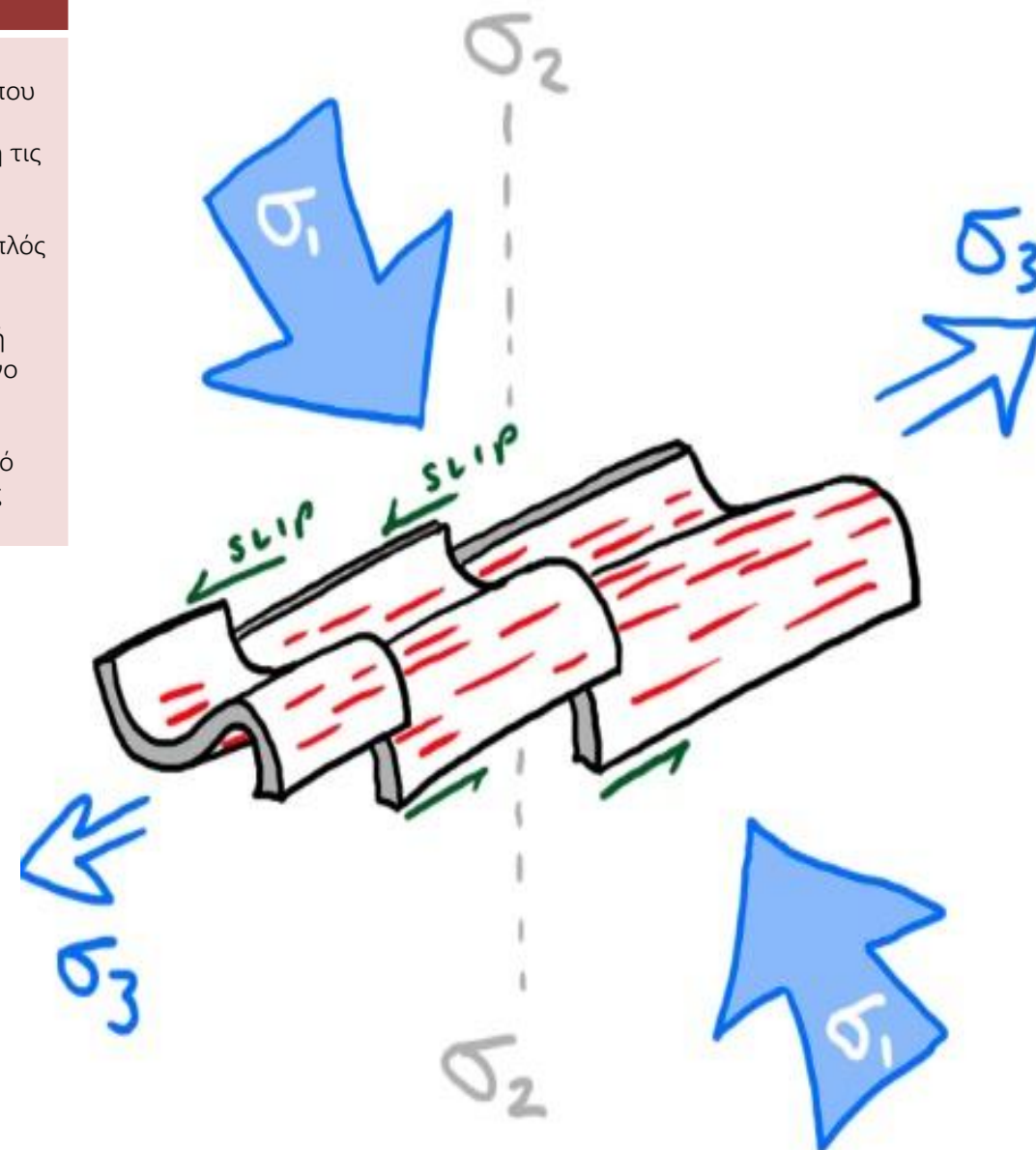
- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

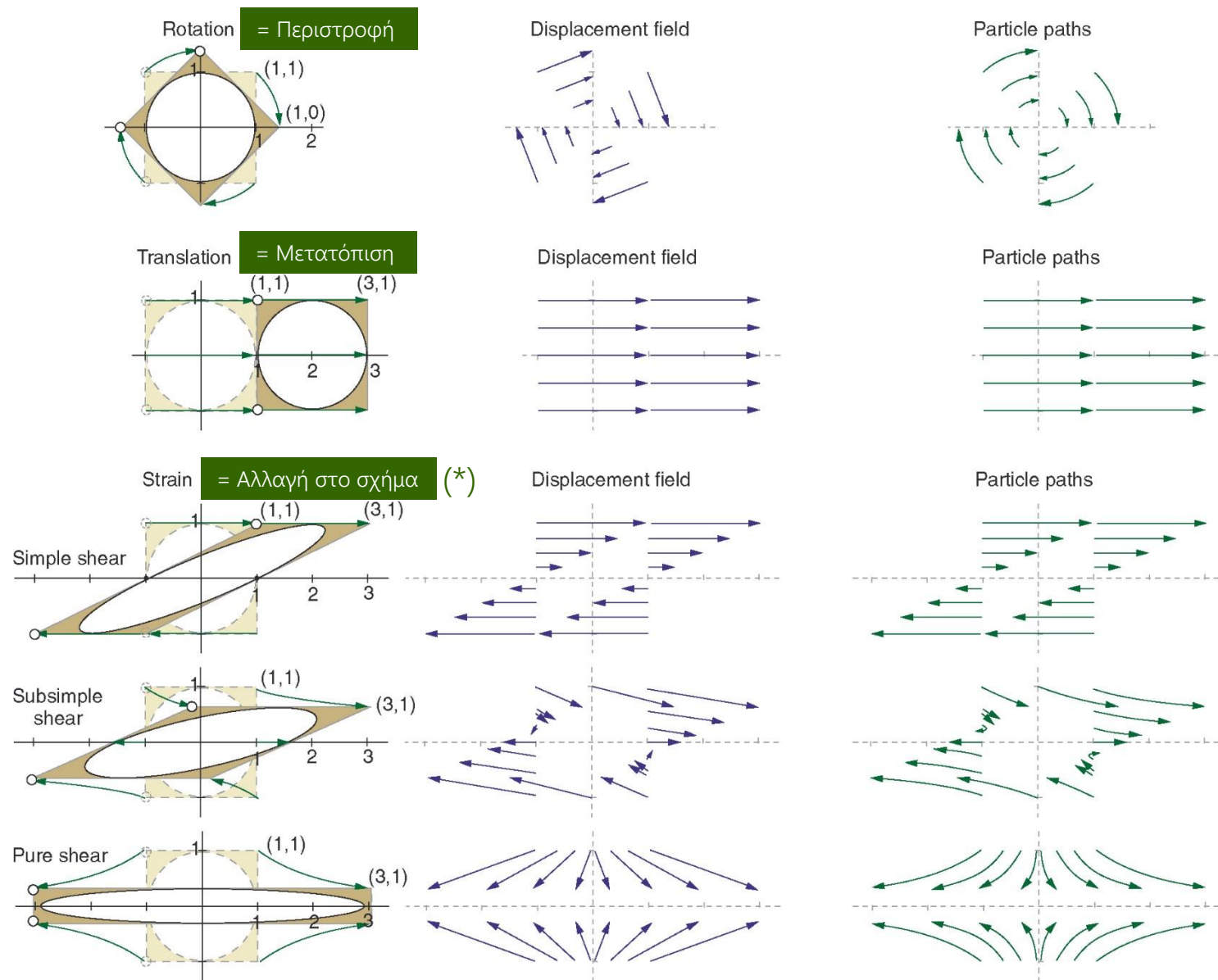
Παραμόρφωση (Deformation)	Τάση (Stress)
<p><b>Παραμόρφωση</b> = Αλλαγή στο <b>σχήμα</b> (στη μορφή) και/ή τη <b>θέση</b> των γεωλογικών σωμάτων (πετρωμάτων, αντικειμένων, δομών...).</p> <p>Τα <b>γεωμετρικά χαρακτηριστικά</b> των τεκτονικών δομών μας δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την παραμόρφωση.</p> <p>Επειδή η <b>παραμόρφωση</b> είναι <b>άμεσα ορατή</b> και μετρήσιμη οι τεκτονικοί <b>γεωλόγοι</b> ασχολούνται πολύ περισσότερο μαζί της σε σχέση με τις τάσεις που την προκαλούν.</p>	<p>Οι <b>τάσεις</b> σχετίζονται με τις <b>δυνάμεις</b> που ασκούνται στο γεωλογικό σώμα και προκαλούν την παραμόρφωση, δηλαδή τις τεκτονικές δομές.</p> <p>Ο <b>συσχετισμός</b> αυτός δεν είναι ούτε απλός ούτε εύκολος και εξαρτάται από πάρα πολλές παραμέτρους. Μόνο σε <b>εργαστηριακές συνθήκες</b> η σχέση αυτή θεμελιώνεται εύκολα όπου συγκεκριμένο εντατικό πεδίο εφαρμόζεται σε δείγμα πετρώματος και η προκύπτουσα παραμόρφωση μετρείται άμεσα. Γι' αυτό και οι <b>μηχανικοί</b> εστιάζουν κυρίως στις <b>τάσεις</b>.</p>



Στον πίνακα του Edvard Munch το ψυχολογικό stress έχει σαν αποτέλεσμα μια κραυγή (skrik) και ένα μακρόστενο πρόσωπο.

Στο διπλανό "animation" παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συμπιεστικού ή εκτατικού εντατικού πεδίου στην παραμόρφωση του προσώπου του πίνακα.



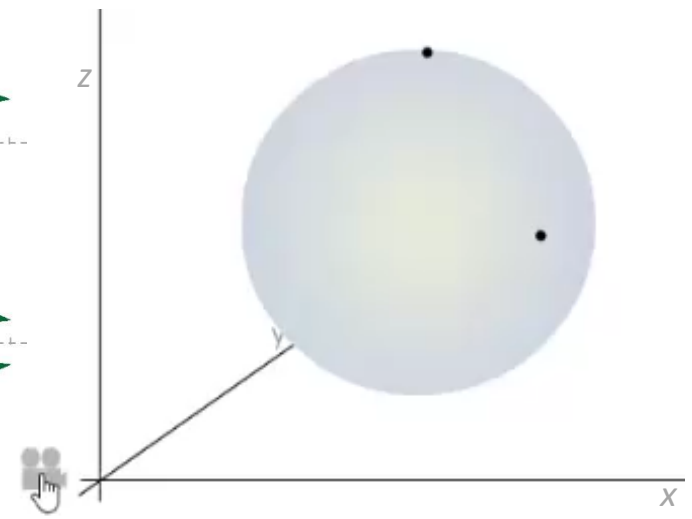


**ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (DEFORMATION):** Με την τυπική έννοια του όρου ορίζεται ως η **μεταβολή** στη **θέση** των **υλικών σημείων (σωματιδίων)** ενός γεωλογικού σώματος, πριν και μετά την παραμόρφωση.

**ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (DEFORMATION):** Είναι στην ουσία ο μετασχηματισμός από μια **αρχική γεωμετρία** ενός γεωλογικού σώματος σε μία **τελική**, με την έννοια της **μετατόπισης (translation)**, **περιστροφής (rotation)** και **αλλαγής στο σχήμα (strain)**, που μπορεί να συνοδεύεται (ή όχι) από **μεταβολή στον όγκο (volume change)**.

**ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (DEFORMATION):** Εναλλακτικά η παραμόρφωση μπορεί να αναφέρεται στην **ιστορία** και **εξέλιξη** της **παραμόρφωσης** ενός γεωλογικού σώματος, από την απαραμόρφωτη κατάσταση στην παραμορφωμένη.

(\* ) Πως αποδίδεται ο όρος strain στα ελληνικά ? (βλπ. στην επόμενη διαφάνεια)





- Η διπλανή φωτογραφία απεικονίζει πτυχωμένα ακάθαρτα μάρμαρα (σιπολινομάρμαρα).
- Αυτό που είναι **άμεσα ορατό** είναι η **αλλαγή στο σχήμα (strain, distortion)**, που μπορούμε να **μετρήσουμε**.
- Αντίθετα η **μετατόπιση (translation)** και η **περιστροφή (rotation)** σίγουρα υπάρχουν αλλά **δεν μπορούν να προσδιορισθούν** εύκολα.
- Για το λόγο αυτό, και στη διεθνή βιβλιογραφία, συχνά ο όρος **deformation** χρησιμοποιείται **στη θέση του strain** (που είναι όμως υποσύνολο του όρου deformation).
- Η ελληνική απόδοση του όρου **DEFORMATION** είναι **ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ**.
- Ως **παραμόρφωση** όμως αποδίδεται και ο όρος **strain**.
- Μια επιτυχής απόδοση του όρου **strain** είναι ο όρος **τροπή** (χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς).
- Ο ομώνυμος όρος **distortion** αποδίδεται, επιτυχώς, ως **διαστροφή**.
- Τελικά μια επιτυχής απόδοση του όρου strain στα ελληνικά θα μπορούσε να είναι ο όρος "**διαστροφική παραμόρφωση**" και έτσι θα αποδίδεται το strain στο βιβλίο αυτό.



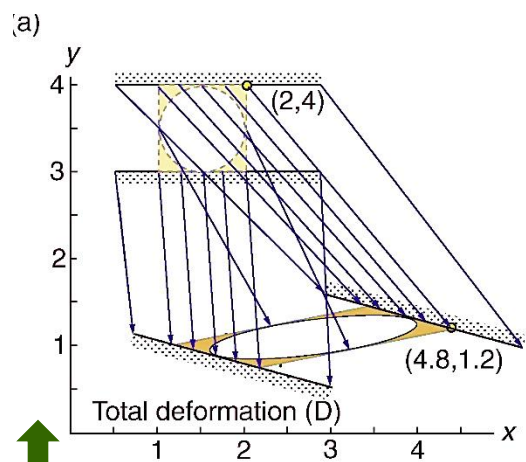
A P A (εξ' ορισμού):

**DEFORMATION = Translation + Rotation + Strain (Distortion)**

με απόδοση των όρων στα Ελληνικά

**ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ = Μετατόπιση + Περιστροφή + Διαστροφική παραμόρφωση**

- ☐ Εισαγωγή
- ☐ Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- ☐ Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- ☐ Μετάθεση (Translation)
- ☐ Περιστροφή (Rotation)
- ☐ Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- ☐ Ιστορία παραμόρφωσης
- ☐ Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- ☐ Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- ☐ Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- ☐ Προοδευτική παραμόρφωση
- ☐ Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση



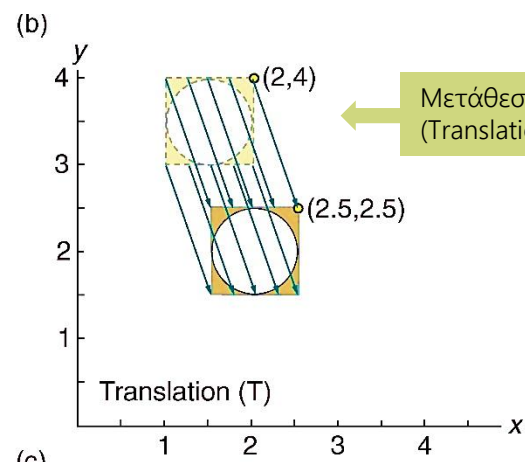
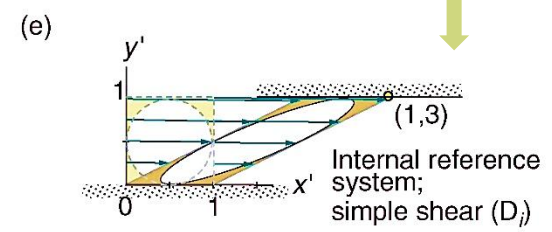
↑ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (TOTAL DEFORMATION -  $D_e$ )

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

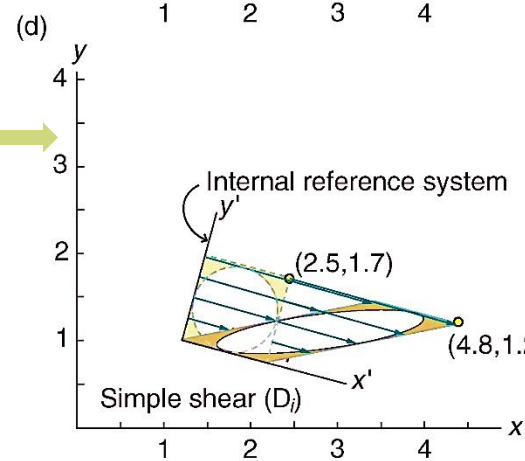
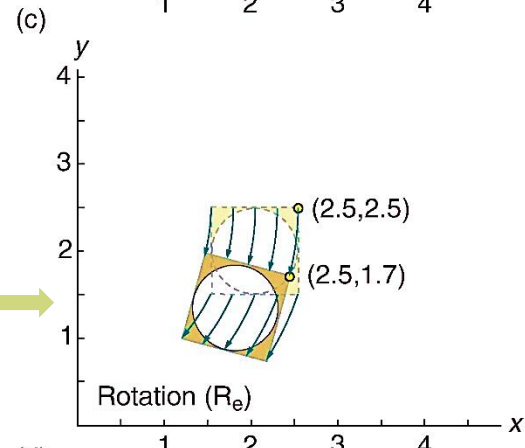
→ Εξωτ. Περιστροφή (Ext. Rotation -  $R_e$ )

→ Εσωτερική παραμόρφωση (Internal deformation -  $D_i$ )

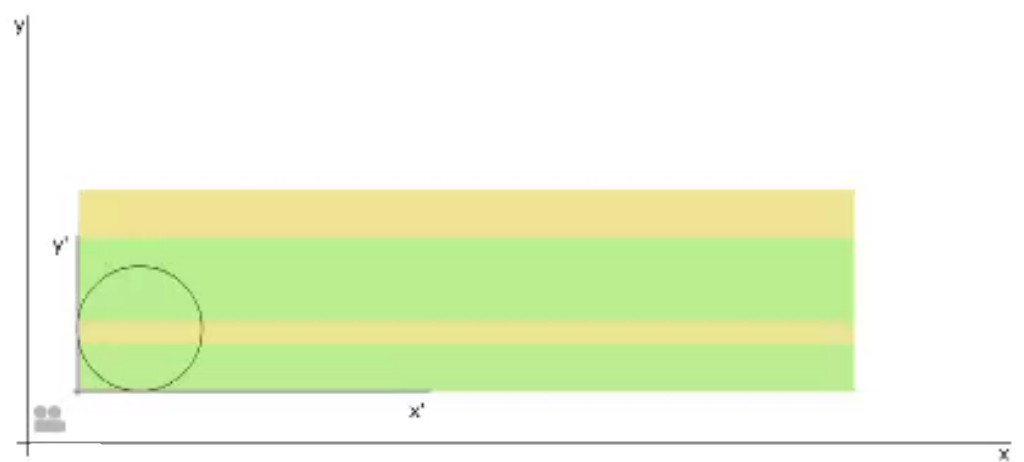
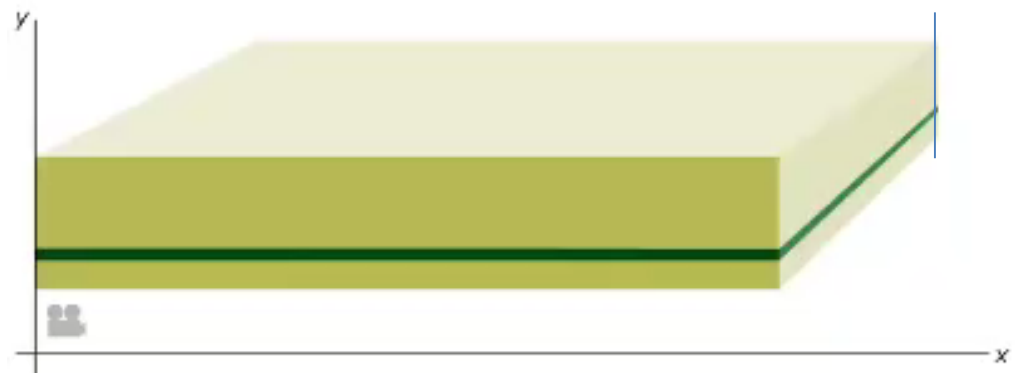
- Εσωτ. περιστροφή (Int. Rotation -  $R_i$ )
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain -  $S$ )



← Μετάθεση (Translation -  $T$ )



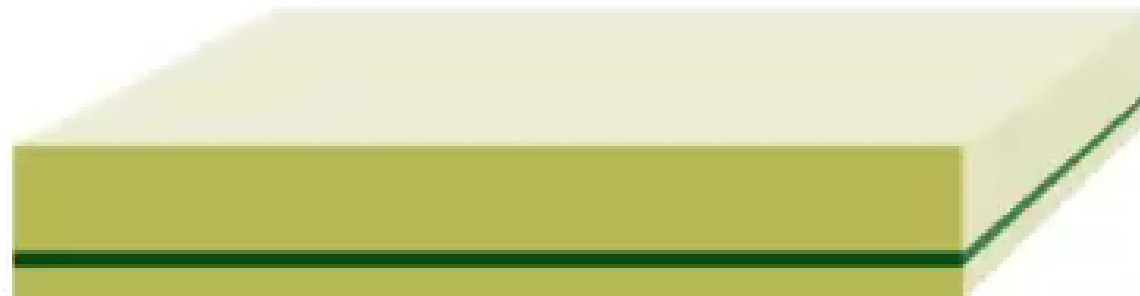
ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (DEFORMATION)	
Μετάθεση (Translation - $T$ )	<b>Άρα:</b> <b>Strain <math>\subset</math> Deformation</b>
Εξωτ. Περιστροφή (Ext. Rotation - $R_e$ )	
Εσωτερική παραμόρφωση (Internal deformation - $D_i$ )	Εσωτ. Περιστροφή (Int. Rotation - $R_i$ )
	Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain - $S$ )





- ☐ Εισαγωγή
- ☐ Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- ☐ Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- ☐ Μετάθεση (Translation)
- ☐ Περιστροφή (Rotation)
- ☐ Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- ☐ Ιστορία παραμόρφωσης
- ☐ Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- ☐ Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- ☐ Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- ☐ Προοδευτική παραμόρφωση
- ☐ Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

- Όλα τα μέρη (ή **υλικά σημεία – σωματίδια**) του γεωλογικού σώματος μετακινούνται κατά την **ίδια απόσταση** και προς την **ίδια διεύθυνση**.
- Υπό ιδανικές συνθήκες στο γεωλογικό σώμα **δεν παρατηρείται εσωτερική παραμόρφωση**.
- Αν αυτή υπάρχει τότε η συνιστώσα της μεταφοράς πρέπει να υπολογισθεί ξεχωριστά.



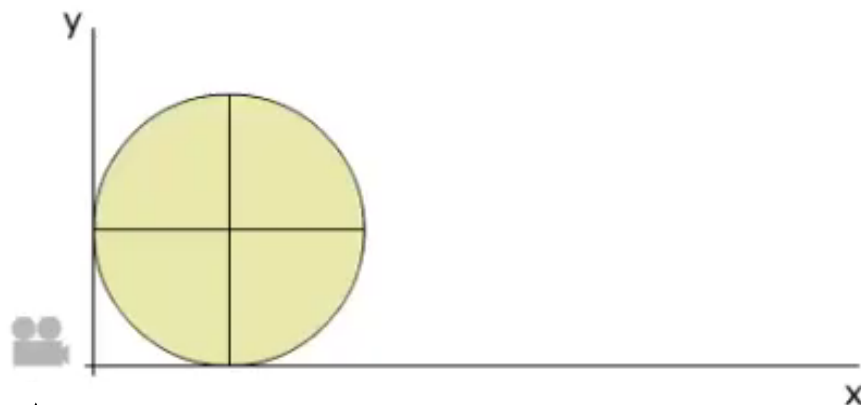
↑ Η μόνη συνιστώσα της παραμόρφωσης είναι η μετατόπιση (translation) των ρηξιτεμαχίων, σε ένα σύστημα τάφρων και κεράτων, ως αποτέλεσμα αξονικού εφελκυσμού, όπου τα αντιθετικά ρήγματα παρουσιάζουν το ίδιο άλμα.

← Το κάλυμμα Jotun των Σκανδιναβικών Καλιδονίδων φαίνεται να έχει μετατεθεί (translation) τουλάχιστον 300 km προς τα SE, σύμφωνα με υπολογισμούς που βασίζονται σε τεχνικές αποκατάστασης και εξισορρόπησης (balancing & restoration) αλλά και στον προσανατολισμό των γραμμώσεων.

Τα ανύσματα της μετατόπισης σημειώνονται, αλλά το ποσοστό της εξωτερικής περιστροφής (ext. rotation) του καλύμματος περι κατακόρυφο άξονα, είναι άγνωστο, αν και οι ενδείξεις είναι ότι αυτό είναι πάρα πολύ μικρό.

Η εσωτερική παραμόρφωση (strain & int. rotation) είναι στην ουσία ανύπαρκτη και συσσωρεύεται μόνο στη βάση του καλύμματος.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση



↑  
*Εσωτερική περιστροφή (internal rotation –  $R_i$ ) των κυρίων αξόνων παραμόρφωσης ( $X$  &  $Y$ ) του ελλειψοειδούς παραμόρφωσης, σε καθεστώς μη-ομοαξονικής παραμόρφωσης (non-coaxial deformation) και συγκεκριμένα απλής διάτμησης (simple shear).*

- Η συνιστώσα της περιστροφής (rotation) αναφέρεται στην **εξωτερική περιστροφή (external rotation)** που το σύνολο του γεωλογικού σώματος κάνει κατά την παραμόρφωση, συνήθως μαζί με την μετατόπιση (translation).
- Διαχωρίζεται σαφώς από την **εσωτερική περιστροφή (internal rotation)**, που χαρακτηρίζει την επόμενη συνιστώσα, δηλ. της εσωτερικής παραμόρφωσης (internal deformation), μαζί με την διαστρωφική παραμόρφωση (strain). Στην ουσία χαρακτηρίζει την **περιστροφή των αξόνων του ελλειψοειδούς παραμόρφωσης**. (βλπ. στα επόμενα)
- Όταν η εσωτερική παραμόρφωση χαρακτηρίζεται από εσωτερική περιστροφή αποκαλείται **μη-ομοαξονική παραμόρφωση (non-coaxial deformation)**. Αντίθετα στην **ομοαξονική παραμόρφωση (coaxial deformation)** δεν υφίσταται εσωτερική περιστροφή ( $R_i=0$ ). (βλπ. στα επόμενα)

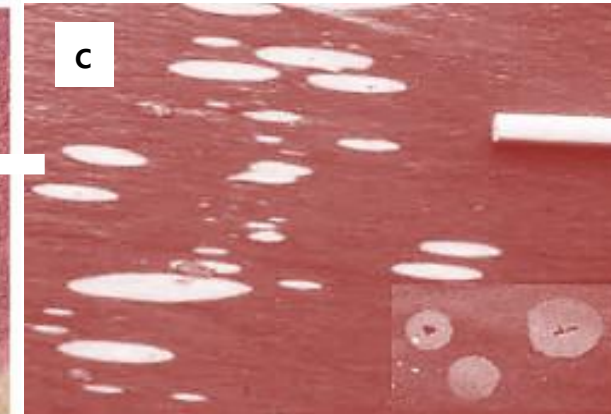
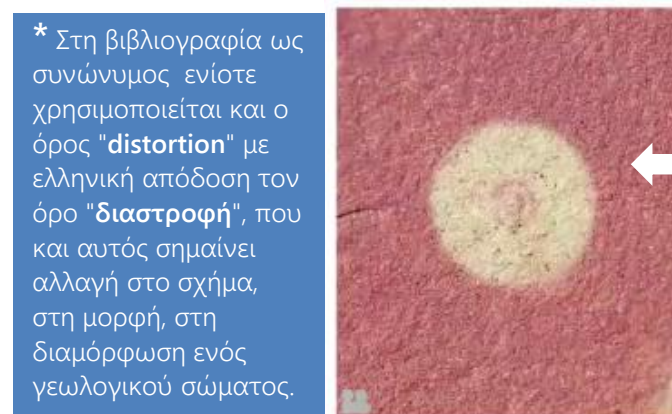
→  
*Η έκταση στον ανώτερο φλοιό συχνά εκτονώνεται με την περιστροφή (rotation –  $R_e$ ) μεγάλης κλίμακας ρηξιτεμαχών (μοντέλο domino).*  
*Η εσωτερική παραμόρφωση (internal deformation) είναι ανύπαρκτη και αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για το μοντέλο αυτό.*



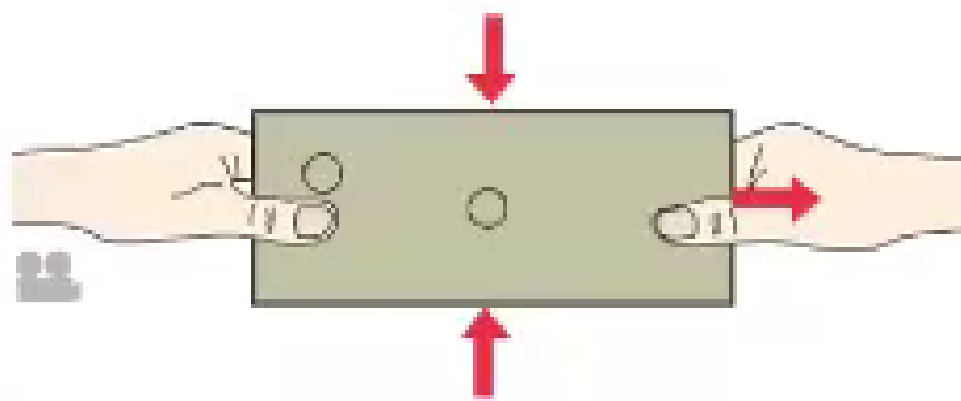


- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστροφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστροφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστροφική παραμόρφωση

- Η **διαστροφική παραμόρφωση** (strain ή distortion) χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε **μεταβολή** στο **σχήμα** ενός γεωλογικού σώματος (με ή χωρίς μεταβολή του όγκου) και προϋποθέτει ότι τα υλικά σημεία (σωματίδια) ενός πετρώματος έχουν αλλάξει θέση το ένα σε σχέση με το άλλο.
- Αποτελεί τη συνιστώσα της παραμόρφωσης (deformation) που μπορεί κανείς να **αναγνωρίσει άμεσα** και να **μετρήσει** πολύ **εύκολα** σε ένα παραμορφωμένο πέτρωμα. Γι' αυτό και συχνά οι όροι strain και deformation χρησιμοποιούνται ως συνώνυμοι.
- Πιο συγκεκριμένα η διαστροφική παραμόρφωση (strain) εκδηλώνεται με τους ακόλουθους τρόπους:
  - **Μεταβολή** του αρχικού **σχήματος**
  - **Μεταβολή** του **όγκου** (αποκαλείται **διαστολή – dilation**, παρότι μπορεί να έχει αρνητικό πρόσημο)
  - **Περιστροφή επιπέδων** και **γραμμών**
  - **Μεταβολή** του αρχικού **μήκους** γραμμών
- Η ποσότητα και ο τύπος της διαστροφικής παραμόρφωσης (strain) μπορούν να προσδιορισθούν αν γνωρίζουμε το **αρχικό σχήμα** (ή **όγκο**), ενός παραμορφωμένου αντικείμενου, όπως π.χ. μπορεί να είναι ένα **απολίθωμα** (a), ένας **ωόλιθος**, οι **κροκάλες** ενός κροκαλοπαγούς (b), σφαιρικά αντικείμενα, π.χ. **reduction spots** (c), κλπ.



\* Στη βιβλιογραφία ως συνώνυμος ενίοτε χρησιμοποιείται και ο όρος "distortion" με ελληνική απόδοση τον όρο "διαστροφή", που και αυτός σημαίνει αλλαγή στο σχήμα, στη μορφή, στη διαμόρφωση ενός γεωλογικού σώματος.

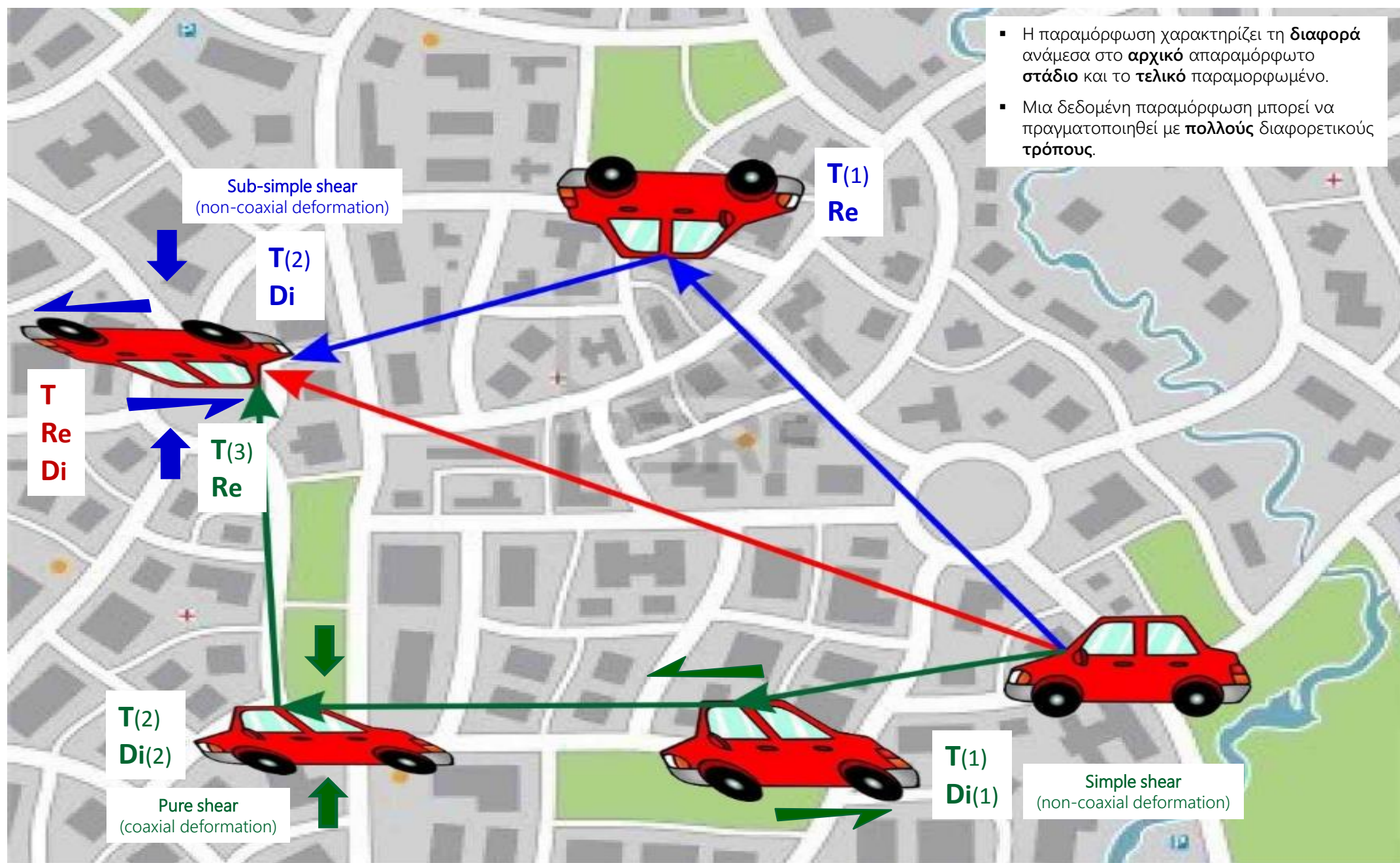


←  
Οι κύκλοι στο υπό παραμόρφωση αντικείμενο χαρακτηρίζουν την διαστροφική παραμόρφωση (strain), δεδομένου ότι μετατρέπονται σε ελλείψεις με προοδευτική αύξηση του λόγου διαστάσεων προς το κέντρο.  
Η έκταση σε μία διεύθυνση συνεπάγεται την βράχυνση στην κάθετη διεύθυνση.



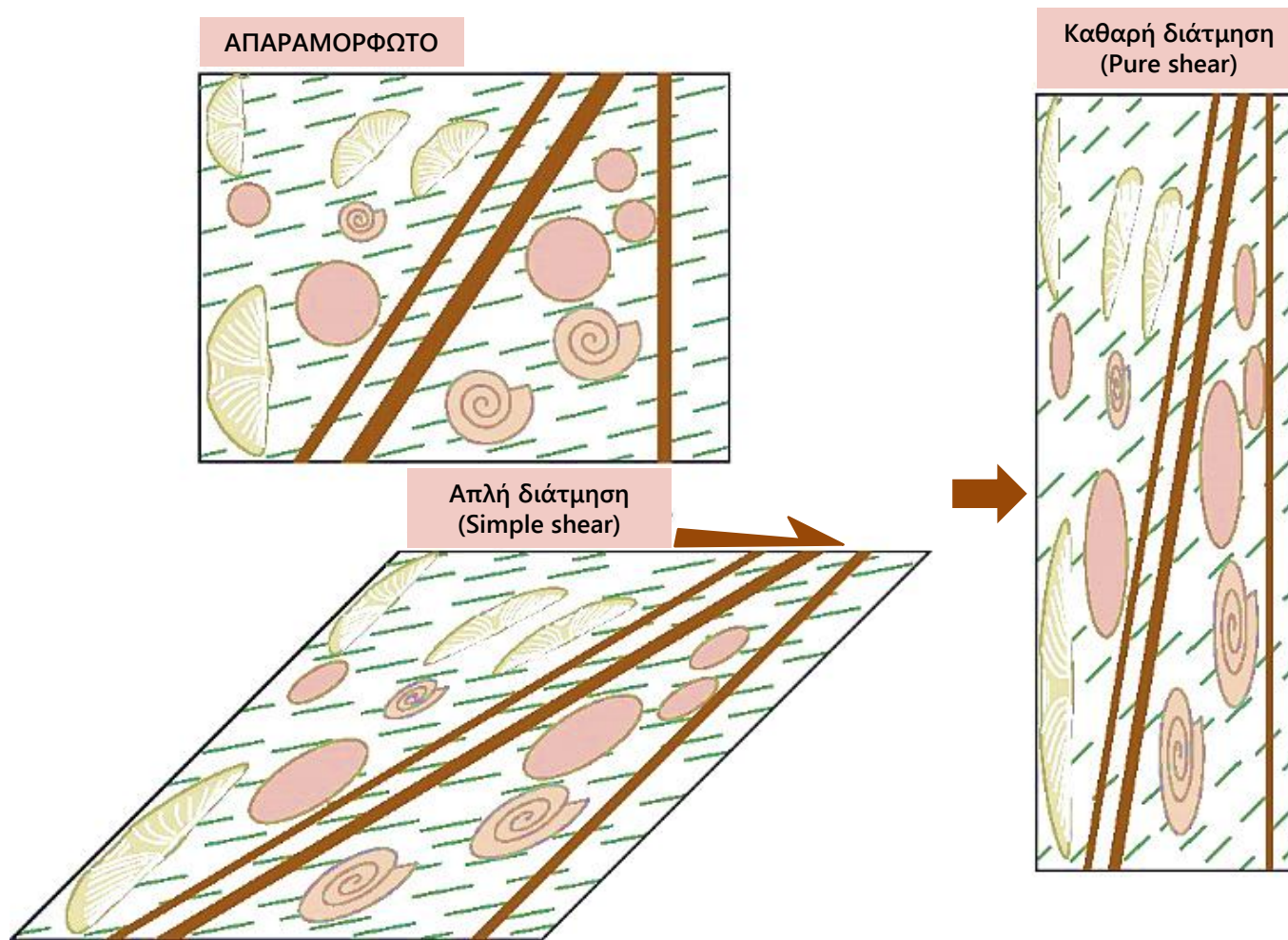
- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

- Η παραμόρφωση χαρακτηρίζει τη **διαφορά** ανάμεσα στο **αρχικό** απαραμορφωτό **στάδιο** και το **τελικό** παραμορφωμένο.
- Μια δεδομένη παραμόρφωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με **πολλούς** διαφορετικούς **τρόπους**.



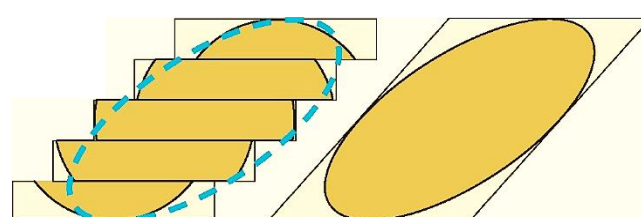


- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση



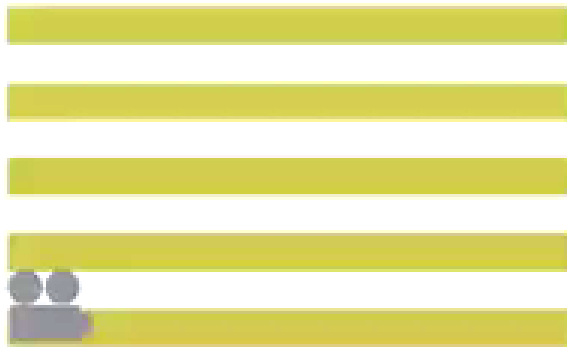
Ομοιογενής παραμόρφωση (είτε pure shear είτε simple shear) σε ένα πέτρωμα που περιέχει βραχιονόποδα, αμμωνίτες, reduction spots και φλέβες. Παρατηρήστε ότι βραχιονόποδα με διαφορετικό προσανατολισμό πριν την παραμόρφωση αποκτούν διαφορετικό σχήμα μετά.

Η παραμόρφωση μπορεί να είναι ομοιογενής σε μία κλίμακα και ανομοιογενής (ετερογενής) σε μία άλλη.



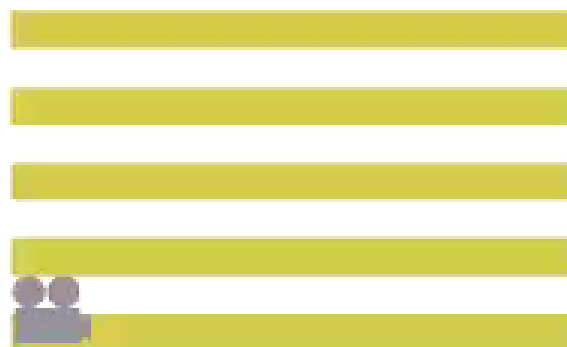
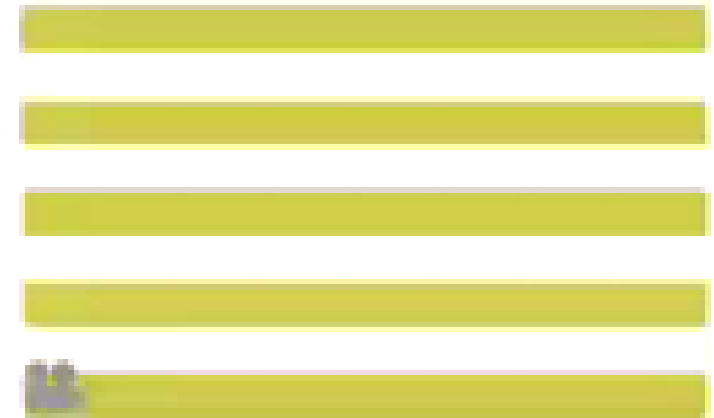
ΟΜΟΙΟΓΕΝΗΣ VS ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΟΥΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	Ομοιογενής Παραμόρφωση	Ανομοιογενής (Ετερογενής) Παραμόρφωση
Η παραμόρφωση που ασκείται είναι πανομοιότυπη σε όλη τη μάζα του πετρώματος.	✓	✗
Ευθείες γραμμές παραμένουν ευθείες και παράλληλες γραμμές παραμένουν παράλληλες, πριν και μετά την παραμόρφωση.	✓	✗
Αντικείμενα με πανομοιότυπο σχήμα και προσανατολισμό παραμένουν έτσι και μετά την παραμόρφωση.	✓	✗
Η μεταβολή της "παραμόρφωσης" (strain) και του όγκου παραμένει σταθερή σε όλη τη μάζα του πετρώματος.	✓	✗
Ευθείες γραμμές γίνονται καμπύλες και παράλληλες γραμμές τέμνονται.	✗	✓
Συνιστώσα T	<b>Εξ' ορισμού αυτές οι δύο συνιστώσες είναι ομοιογενείς</b>	
Συνιστώσα Re		
Συνιστώσα Di (S & Ri)	<b>Άρα είναι η μόνη συνιστώσα που μπορεί να είναι ανομοιογενής</b>	
<b>Οι όροι homogeneous deformation και homogeneous strain αποτελούν ισοδύναμες εκφράσεις</b>		

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

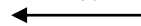


*Στη διπλανή ζώνη διάτμησης (shear zone) η διαστρωφική παραμόρφωση (strain) χαρακτηρίζεται ως ομοιογενής απλή διάτμηση (homogeneous simple shear).*

*Δηλαδή, αυτή κατανέμεται ομοιογενώς σε όλη τη ζώνη που παραμορφώνεται, με μια απλή γραμμική μετάθεση, με αποτέλεσμα ευθείες και παράλληλες γραμμές να παραμένουν έτσι και μετά την παραμόρφωση.*



*Στην πραγματικότητα όμως οι ζώνες διάτμησης στα πετρώματα παρουσιάζουν ένα βαθμό ετερογένειας, που συνήθως εκφράζεται με την αύξηση της διαστρωφικής παραμόρφωσης (strain) από τα πλευρικά τοιχώματα προς το κέντρο της ζώνης.*



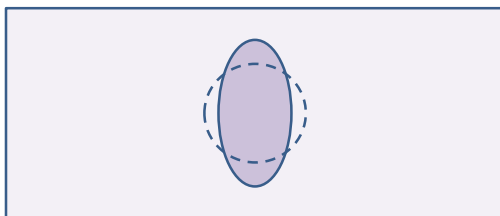
*Το να ποσοτικοποιήσει κανείς την ετερογενή διαστρωφική παραμόρφωση (strain) είναι ένα ζήτημα. Μπορεί, όμως, να διαχωρίσει ζώνες με ομοιογενή διαστρωφική παραμόρφωση (strain) και να διαχειρισθεί κάθε ζώνη χωριστά.*



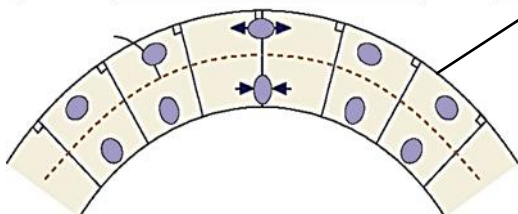


- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστροφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστροφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστροφική παραμόρφωση

Στο διπλανό παράδειγμα εφαρμόζουμε το ίδιο ποσοστό οριζόντιας βράχυνσης, αλλά παίρνουμε διαφορετικά αποτελέσματα. Όταν η διαστροφική παραμόρφωση (strain) είναι ομοιογενής δεν προκύπτει κάποια δομή που μπορεί να αναγνωρισθεί. Ένας αρχικός κύκλος-δείκτης θα έχει μετατραπεί στην ίδια έλλειψη και με τον ίδιο προσανατολισμό σε κάθε περιοχή του πετρώματος.



Στη δεύτερη περίπτωση, που η διαστροφική παραμόρφωση είναι ανομοιογενής, δημιουργούνται πτυχές αλλά οι ελλείψεις είναι τελείως διαφορετικές (σε μέγεθος και προσανατολισμό) μέσα στο πέτρωμα, π.χ. ανάλογα με τον αν βρισκόμαστε στην εξωτερική ή εσωτερική πλευρά του κορυφαίου.



Στην τρίτη περίπτωση η παραμόρφωση είναι πάλι ανομοιογενής, αλλά διαφέρει η προκύπτουσα δομή. Η δομή που θα προκύψει εξαρτάται από τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος, από την ύπαρξη ασυνεχειών ή ασθενών ζωνών και από τον τρόπο που η παραμόρφωση κατανέμεται μέσα στο πέτρωμα.

Η **διαστροφική παραμόρφωση (strain)** δεν αποτελεί τίποτε περισσότερο από μια μέτρηση των μεταβολών στο μήκος και το σχήμα και σε καμία περίπτωση **δεν ορίζει ή συνεπάγεται** κάποια **ιδιαίτερη τεκτονική δομή**, ή ομάδα δομών.

Το να "παραμορφώσουμε" ένα πέτρωμα δεν σημαίνει απαραίτητα ότι το αποτέλεσμα θα είναι να παραχθεί κάποια τεκτονική δομή. Αυτό εξαρτάται από τον **τρόπο** που θα **αντιδράσει** το **πέτρωμα** και από τον τρόπο που θα **εφαρμοσθεί** σε αυτό η **παραμόρφωση**.

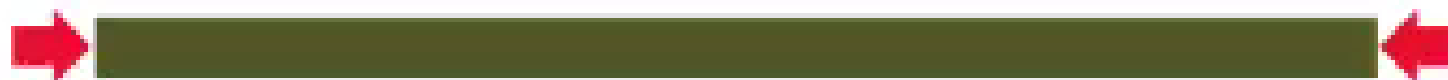
Ο γενικός κανόνας είναι ότι **δομές** σχηματίζονται όταν η **παραμόρφωση** είναι **ανομοιογενής (ετερογενής)**.



Ομοιογενής διαστροφική παραμόρφωση (strain): Δεν δημιουργούνται τεκτονικές δομές.



Ανομοιογενής (ετερογενής) διαστροφική παραμόρφωση (strain): Καμπτικές πτυχές.



Ανομοιογενής (ετερογενής) διαστροφική παραμόρφωση (strain): Ζώνη διάτμησης ή ρήγμα.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

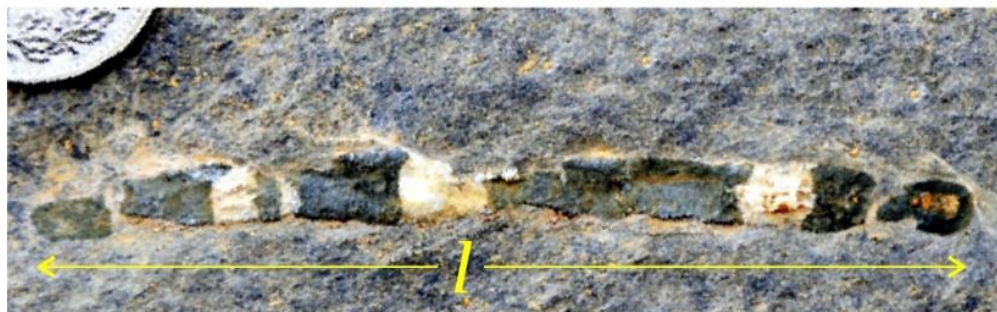
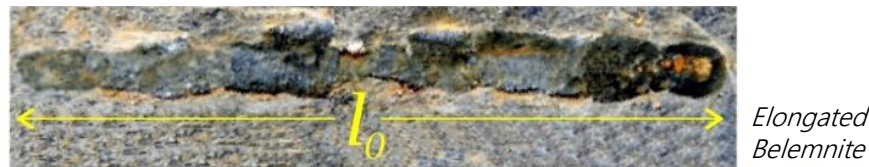
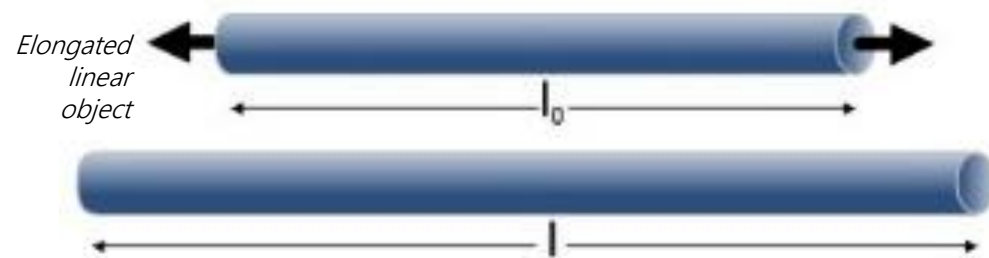
**Η διαστρωφική παραμόρφωση στη μία διάσταση**

Αναφέρεται στη **διάταση** (τέντωμα – **stretching**) ή **βράχυνση** (**shortening**) **γραμμών** ή σχετικά **γραμμικών αντικειμένων**.

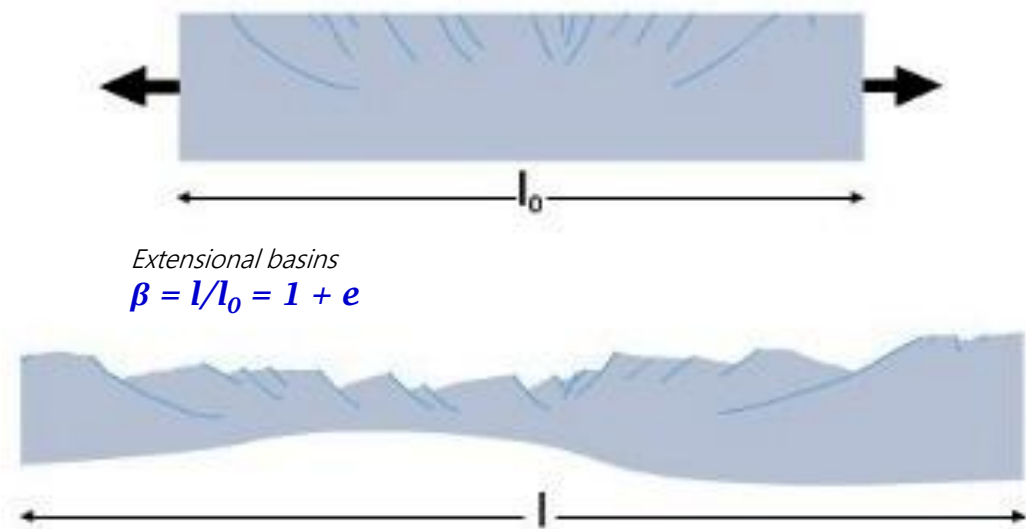
Δεν χαρακτηρίζει αλλαγή στο σχήμα, αλλά μόνο στο μήκος. Από την άλλη μια αλλαγή στο σχήμα, όπως π.χ. η μεταβολή ενός κύκλου σε έλλειψη, μπορεί να περιγραφεί με την αλλαγή στο μήκος γραμμών με διαφορετικό προσανατολισμό.

Τέτοιες γραμμές π.χ. μπορεί να είναι:

- οι **άξονες** του **ελλειψοειδούς παραμόρφωσης**,
- η **γραμμή διατομής** της στρώσης με το επίπεδο μιας τομής,
- ο **μεγάλος άξονας** ενός **βελεμνίτη** ή άλλου απολιθώματος,
- η **κατακόρυφη διάσταση** σε ένα πειραματικό μοντέλο παραμόρφωσης κλπ.



Μεγέθη (μονοδιάστατης) διαστρωφικής παραμόρφωσης		
<b>Elongation (μήκυνση) <math>e</math> ή <math>\epsilon</math></b> <b>Natural elongation</b> (φυσική μήκυνση) $\bar{e}$ ή $\bar{\epsilon}$	$e = (l - l_0)/l_0$ * $\bar{e} = \ln(e)$	* $l_0$ & $l$ τα μήκη της γραμμής πριν και μετά την παραμόρφωση.
<b>Stretch (διάταση) <math>s</math></b>	$s = l/l_0 = 1 + e$	
<b>Quadratic elongation</b> (τετραγωνική μήκυνση) $\lambda$	$\lambda = s^2$ $= (l/l_0)^2 = (1 + e)^2$	
Στην τεκτονική ανάλυση των <b>ηπειρωτικών τάφρων (rifting)</b> και των <b>εκτατικών λεκανών (extensional basins)</b> , χρησιμοποιούνται και οι όροι:		** Οι σχετιζόμενοι όροι: <b>tension</b> (εφελκυσμός) & <b>compression</b> (συμπίεση) χρησιμοποιούνται για το <b>πεδίο τάσεων</b> .
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Extension</b> (έκταση ή και <b>επέκταση</b>) που είναι ισοδύναμος με τον όρο <b>elongation (μήκυνση)</b> και</li> <li>▪ <b>Contraction</b> (βράχυνση ή και <b>σύμπτυξη, συστολή</b>) που είναι η <b>αρνητική έκταση (extension)</b>. **</li> <li>▪ <b>Stretching factor</b> ή <b><math>\beta</math>-factor</b> που ισοδυναμεί με το <b>stretch (διάταση)</b>.</li> </ul>		



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

Η διαστρωφική παραμόρφωση στη μία διάσταση

### Elongation (or longitudinal strain)

#### Μήκυνση (ή διαμήκης διαστρωφική παραμόρφωση)

$$e = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Αν  $l > l_0$ , τότε το  $e$  θετικό

Αν  $l < l_0$ , τότε το  $e$  αρνητικό

Για διπλασιασμό της γραμμής το  $e = 1.0$  (μεγέθυνση 100%)

Για υποδιπλασιασμό της γραμμής το  $e = -0.5$  (σμίκρυνση 50%)

Το  $e$  παίρνει τιμές:  $-1 < e < +\infty$

#### Stretch (διάταση)

$$s = \frac{l}{l_0} = 1 + e$$

Πάντα θετικό και παίρνει τιμές:  
 $0 < \lambda < +\infty$

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} \Rightarrow e = \frac{l}{l_0} - \frac{l_0}{l_0} \Rightarrow e = \frac{l}{l_0} - 1 \Rightarrow 1 + e = \frac{l}{l_0} \Rightarrow 1 + e = s$$

Θεωρώντας ότι το  $l_0$  είναι το μοναδιαίο μήκος, ( $l_0 = 1$ ) τότε:  $s = l = 1 + e$

και άρα τα  $s$  &  $1+e$  ισοδυναμούν και αυτά με το μήκος μετά την παραμόρφωση.

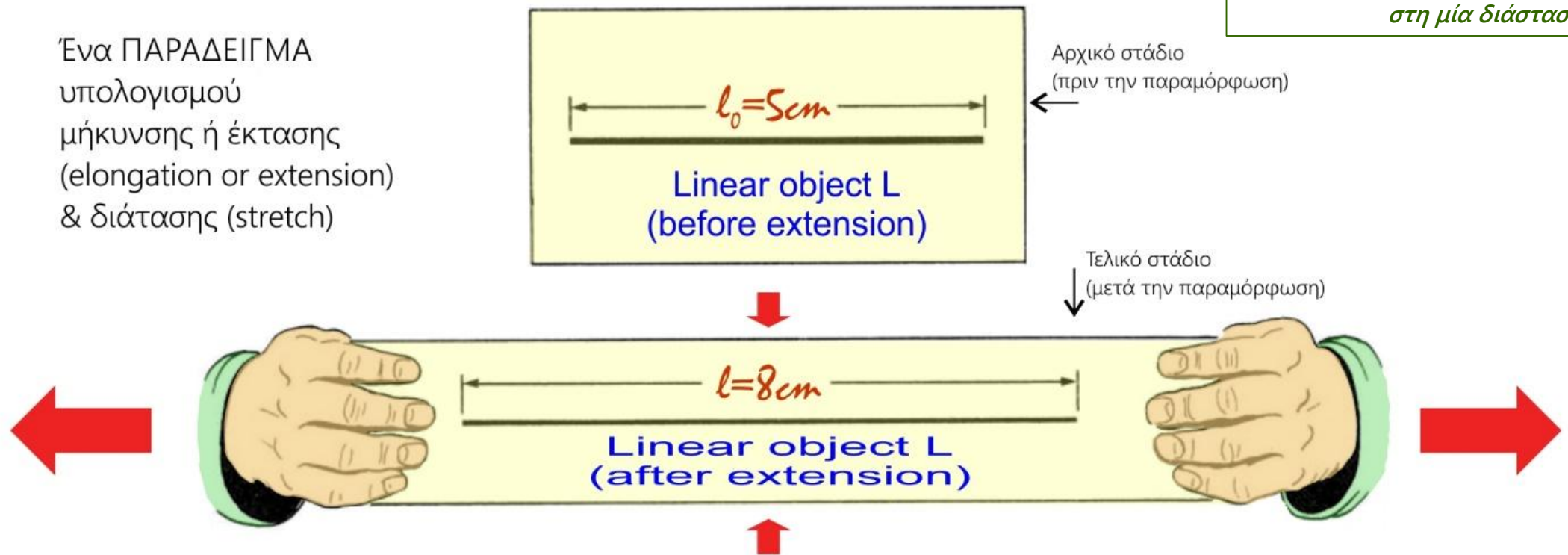
#### Quadratic elongation (τετραγωνική μήκυνση) $\lambda = (s)^2$

Πάντα θετικό και παίρνει τιμές:  
 $0 < \lambda < +\infty$



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

Ένα ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ  
υπολογισμού  
μήκυνσης ή έκτασης  
(elongation or extension)  
& διάτασης (stretch)

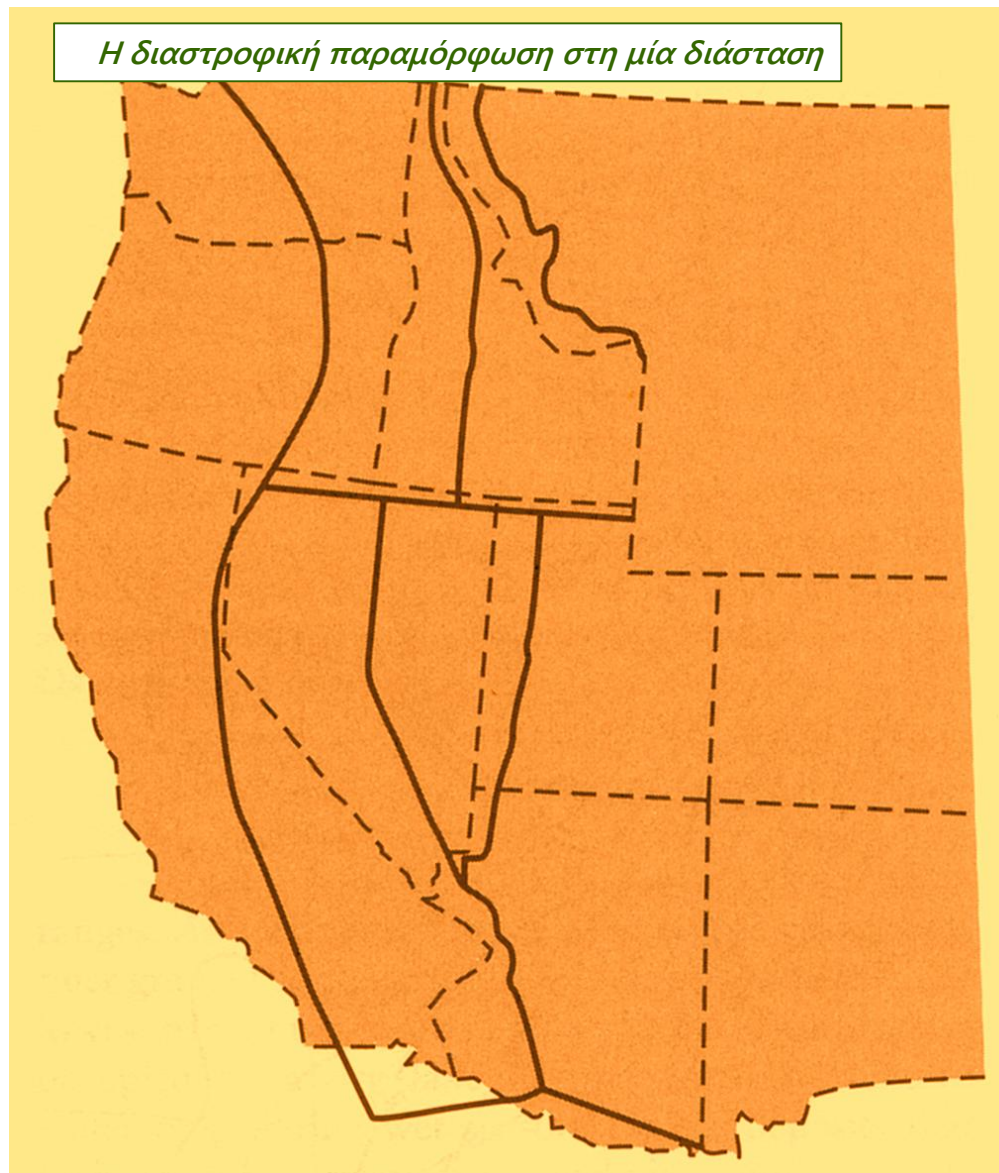


$$e = (l - l_0) / l_0 = (8 - 5) / 5 = 3 / 5 = 0,6 = 60\%$$

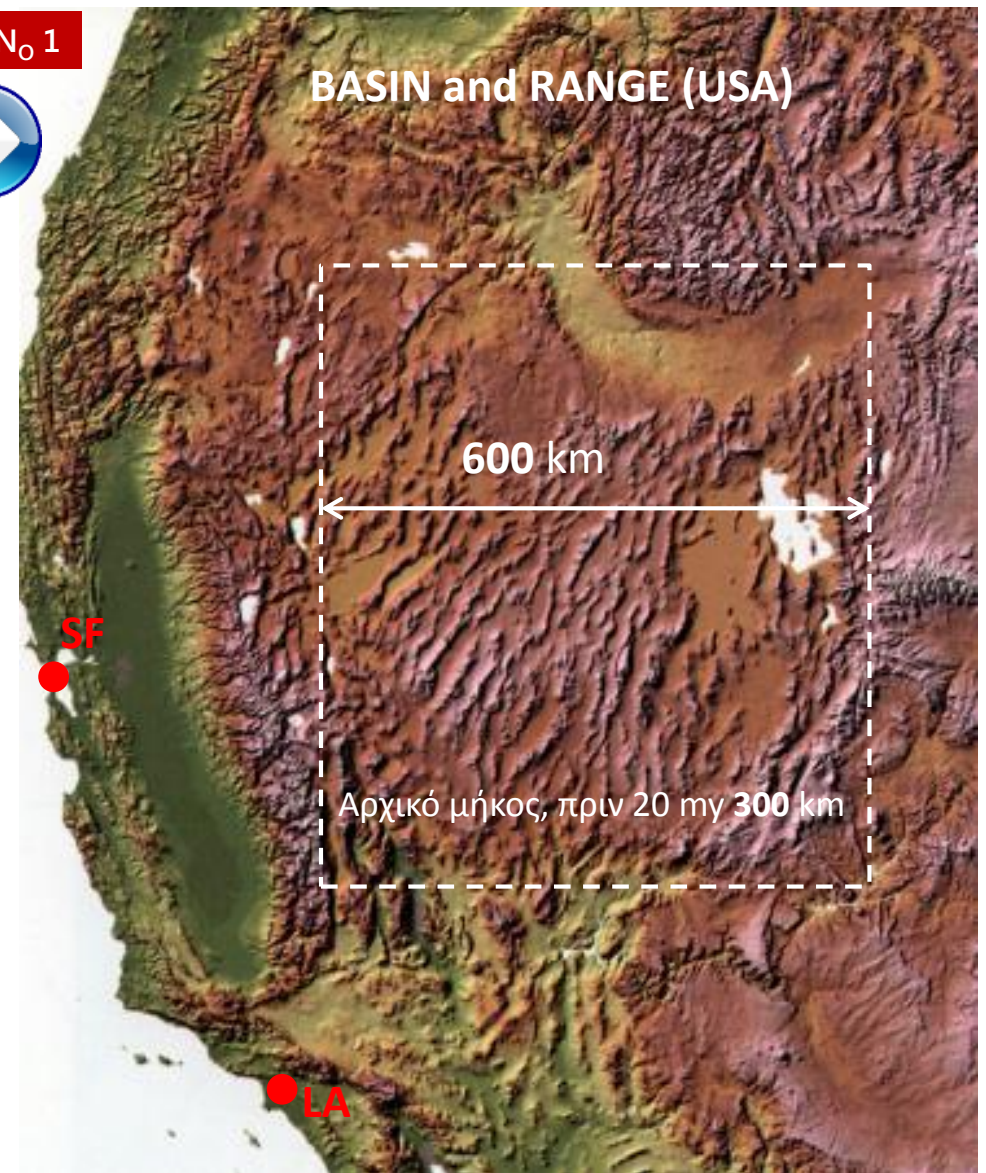
$$s = l / l_0 = 8 / 5 = 1,6 \quad \text{ή} \quad s = e + 1 = 0,6 + 1 = 1,6$$



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση



Test N<sub>o</sub> 1



*strain rate (ρυθμός διαστρωφικής παραμόρφωσης): Το ποσοστό της παραμόρφωσης που συσσωρεύεται σε συγκεκριμένο χρόνο:  $\dot{\epsilon} = e/t = 1/20 \text{ my} = 5 \times 10^{-8} \text{ y}^{-1}$*

$$e = (l - l_0) / l_0 = (600 - 300) / 300 = 1 \text{ (100\% έκταση)}$$

$$\beta = s = l / l_0 = 1 + e = 1 + 1 = 2 \text{ (διπλασιασμός)}$$



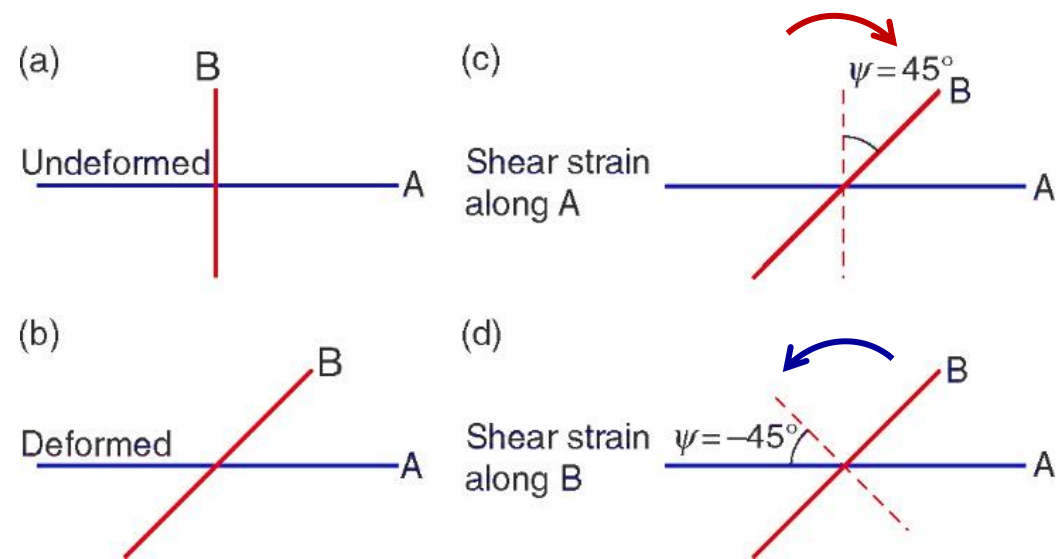
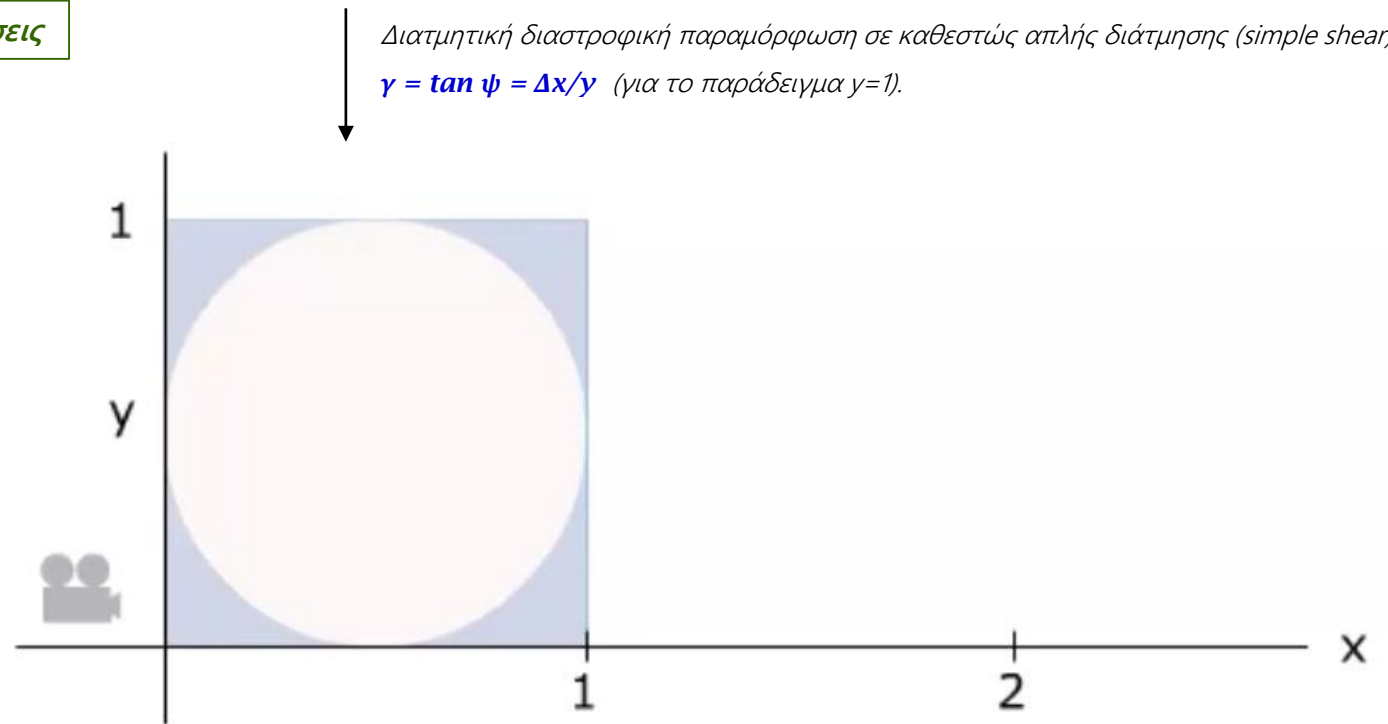
- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

**Η διαστρωτική παραμόρφωση στις δύο διαστάσεις**

- Η μελέτη της διαστρωτικής παραμόρφωσης σε συγκεκριμένα επίπεδα ή τομές, χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην ανάλυση της παραμόρφωσης.
- Από τη σύνθεση των παρατηρήσεων σε τομές με διαφορετικό προσανατολισμό μπορούμε να περιγράψουμε την παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις.

**Μεγέθη (δισδιάστατης) διαστρωτικής παραμόρφωσης**

<b>Angular strain</b> (γωνιακή διαστρωτική παραμόρφωση) $\psi$	Περιγράφει τη <b>μεταβολή της γωνίας (σε <math>^{\circ}</math>) ανάμεσα σε δύο πρωτογενώς κάθετες γραμμές</b> σε ένα παραμορφωμένο σώμα.
<b>Shear strain</b> (διατμητική διαστρωτική παραμόρφωση) $\gamma$	$\gamma = \tan \psi$



Η γωνιακή διαστρωτική παραμόρφωση (αποκαλείται και γωνία διάτμησης)  $\psi$ , λαμβάνει θετικές τιμές για δεξιόστροφες περιστροφές και αρνητικές για αριστερόστροφες. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η γωνία  $\psi = 45^{\circ}$  κατά μήκος της γραμμής A και  $-45^{\circ}$  κατά μήκος της γραμμής B.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

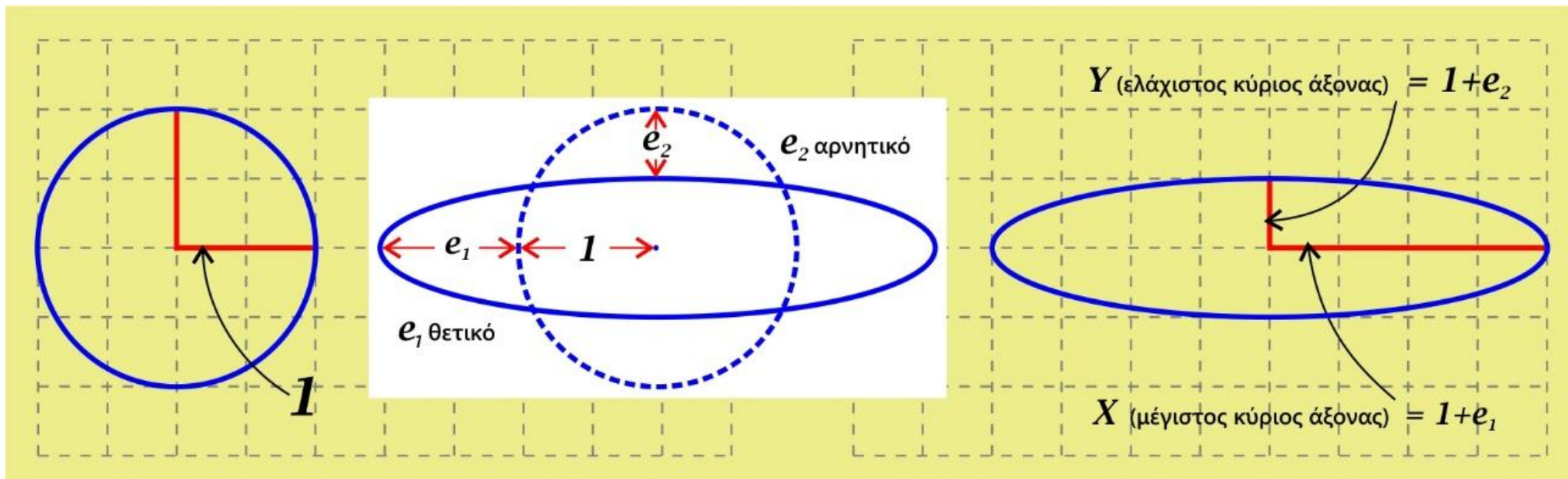
**Έλλειψη διαστρωφικής παραμόρφωσης (strain ellipse)**

- Η έλλειψη που περιγράφει το ποσό της **μήκυνσης** (elongation) σε κάθε διεύθυνση ενός επιπέδου με ομοιογενή παραμόρφωση.
- Αντιστοιχεί στο παραμορφωμένο σήμερα σχήμα ενός **ιδεατού κύκλου** πάνω στο αρχικά απαραμόρφωτο επίπεδο.
- Περιγράφεται από **δύο άξονες κάθετους** μεταξύ τους, έναν **μεγάλο** τον  $X$  και έναν **μικρό** τον  $Y$ . Τα μήκη των δύο αυτών αξόνων τα συμβολίζουμε με τα ίδια σύμβολα ( $X$  &  $Y$ ).
- Αναφέρονται ως **μέγιστος κύριος άξονας διαστρωφικής παραμόρφωσης** και **ελάχιστος κύριος άξονας διαστρωφικής παραμόρφωσης**.
- Η **ελλειπτικότητα** της έλλειψης (δηλαδή ο λόγος του μεγάλου προς τον μικρό άξονα) αντιπροσωπεύει στην ουσία την **διαστρωφική παραμόρφωση** (δείχνει πόσο μεγάλη ή μικρή είναι αυτή).
- Για τους υπολογισμούς μας θεωρούμε πάντα ότι η **ακτίνα** του **αρχικού κύκλου** αντιπροσωπεύει τη **μονάδα**.

Μεγέθη έλλειψης διαστρωφικής παραμόρφωσης	
Μεγάλος άξονας έλλειψης $X$	$X = 1 + e_1$
Μικρός άξονας έλλειψης $Y$	$Y = 1 + e_2$
Ελλειπτικότητα $R$	$R = X/Y = (1 + e_1)/(1 + e_2)$

**Θυμάμαι:**  
 $s = l = 1 + e$

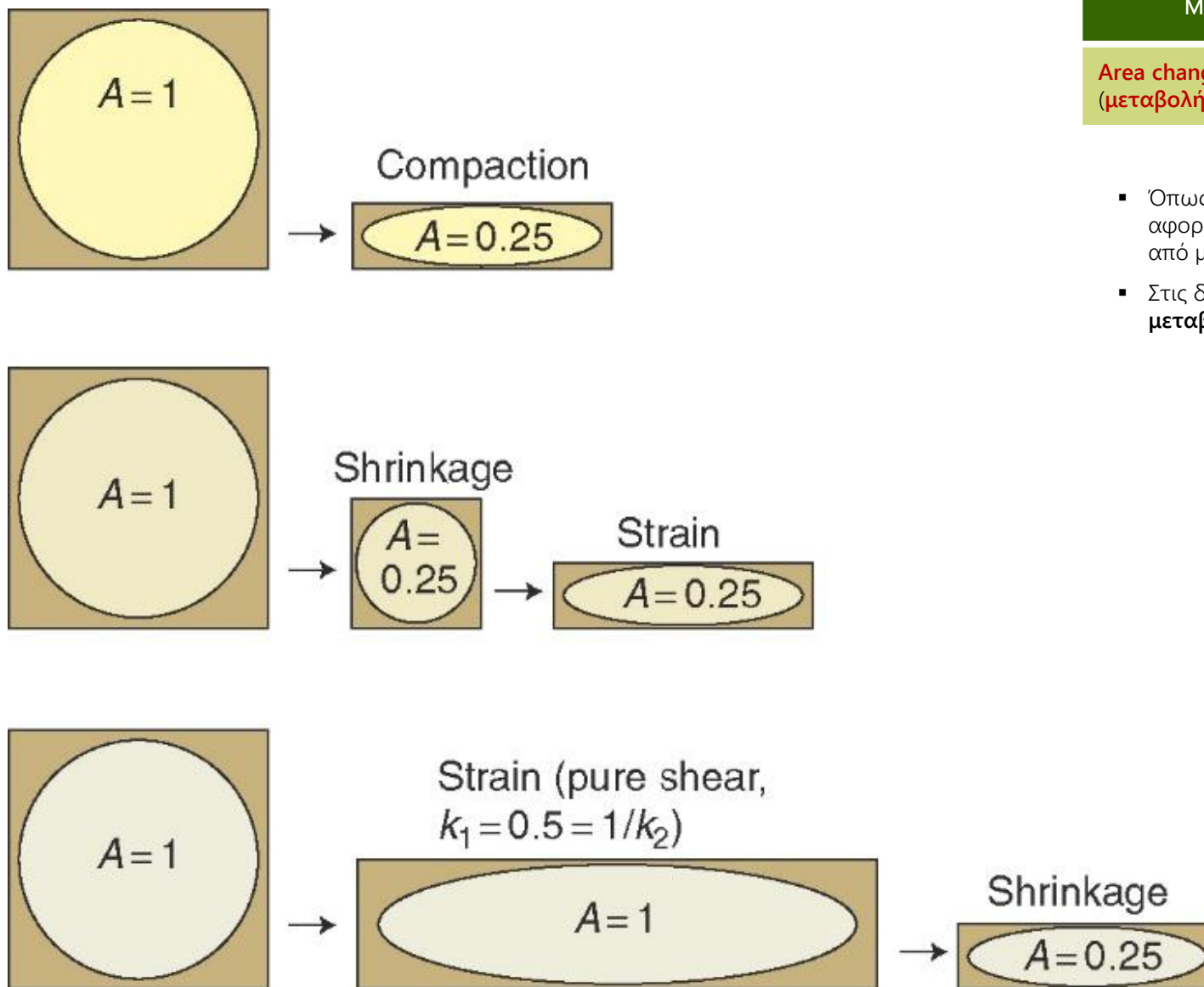
↓ Για το παράδειγμα της εικόνας η ελλειπτικότητα (που αντιστοιχεί στην διαστρωφική παραμόρφωση)  
 $R = (1 + e_1)/(1 + e_2) = 2/0,5 = 4/1 \rightarrow 4:1 \rightarrow 4$





- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

**Έλλειψη διαστρωφικής παραμόρφωσης (strain ellipse)**



Μεγέθη έλλειψης διαστρωφικής παραμόρφωσης	
Area change (μεταβολή εμβαδού)	$(A - A_0)/A_0$

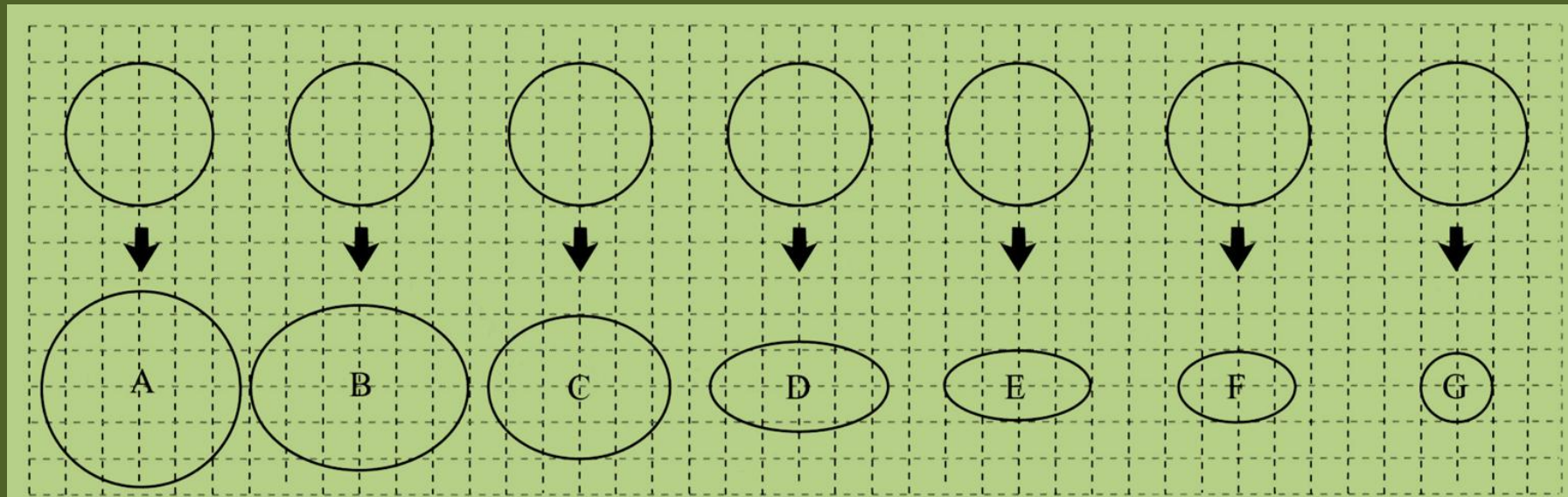
- Όπως έχει αναφερθεί η διαστρωφική παραμόρφωση αφορά αλλαγή στο σχήμα που μπορεί να συνοδεύεται και από μεταβολή στον όγκο.
- Στις δύο διαστάσεις η μεταβολή αυτή εκφράζεται με την μεταβολή στο εμβαδό, δηλ. στην έκταση (area change).

← Η διαστρωφική παραμόρφωση που συνεπάγεται η διαδικασία της συμπίκνωσης και διαγένεσης των ιζημάτων στη φάση της απόθεσης, στις δύο διαστάσεις μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, της μεταβολής στο εμβαδό και της μεταβολής στην διαστρωφική παραμόρφωση.

**Έλλειψη διαστρωφικής παραμόρφωσης (strain ellipse)**

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

Για τον απαραμόρφωτο κύκλο  $e_1 = 0$  &  $e_2 = 0$  άρα  $1 + e_1 = 1.0$  &  $1 + e_2 = 1.0$



Seven circles and their corresponding strain ellipses.

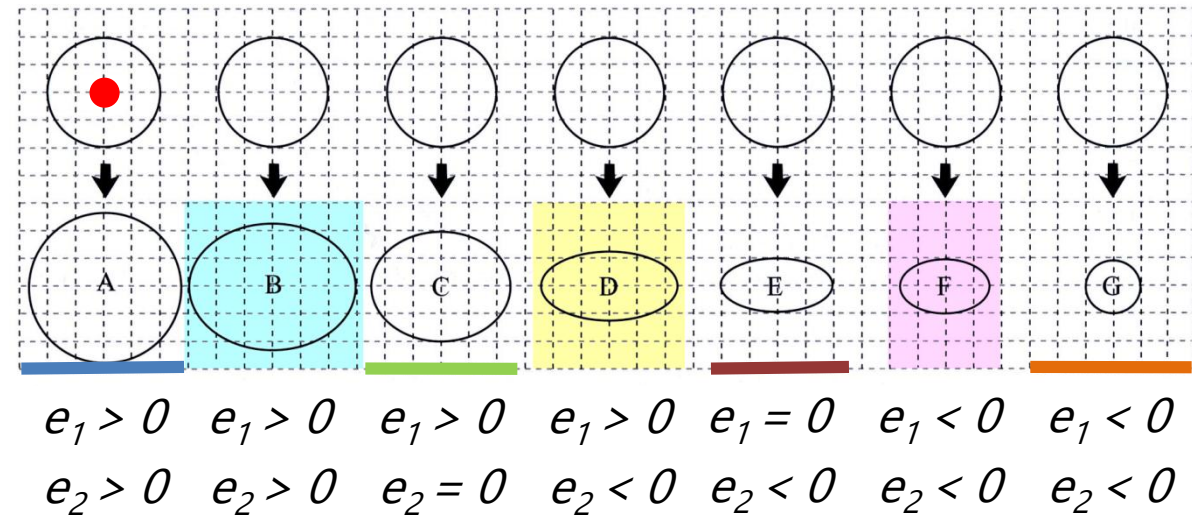
$e_1 > 0$	$e_1 > 0$	$e_1 > 0$	$e_1 > 0$	$e_1 = 0$	$e_1 < 0$	$e_1 < 0$
$e_2 > 0$	$e_2 > 0$	$e_2 = 0$	$e_2 < 0$	$e_2 < 0$	$e_2 < 0$	$e_2 < 0$
$e_1 = e_2$	$e_1 > e_2$				$e_1 = e_2$	



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

**Έλλειψη διαστρωφικής παραμόρφωσης (strain ellipse)**

ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

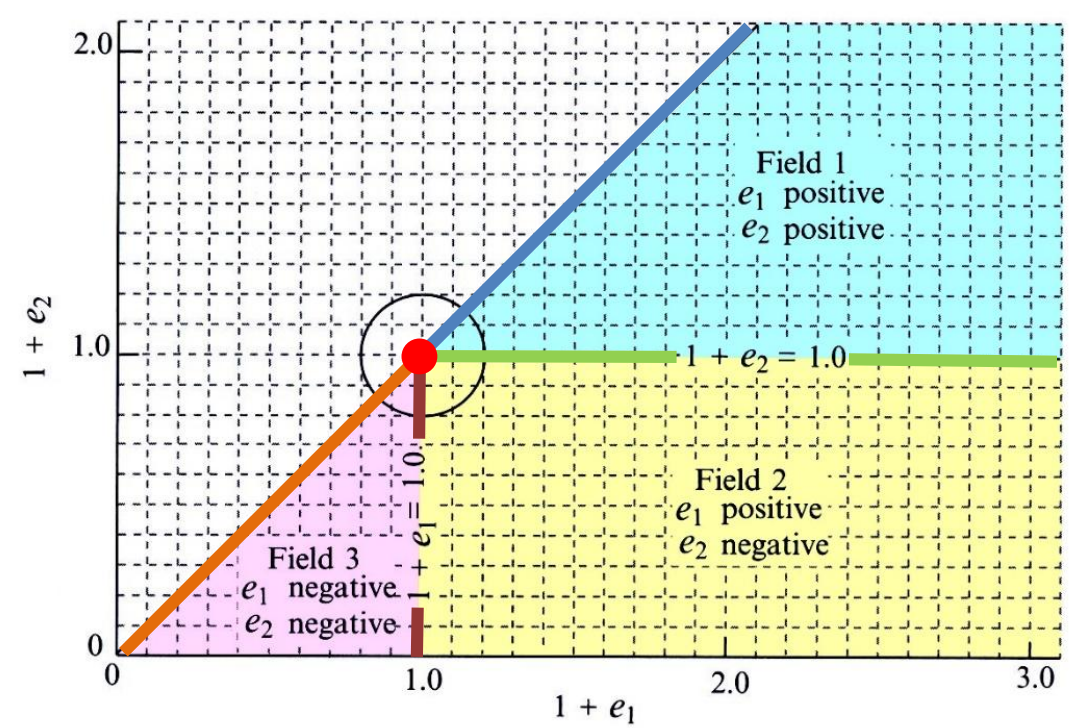
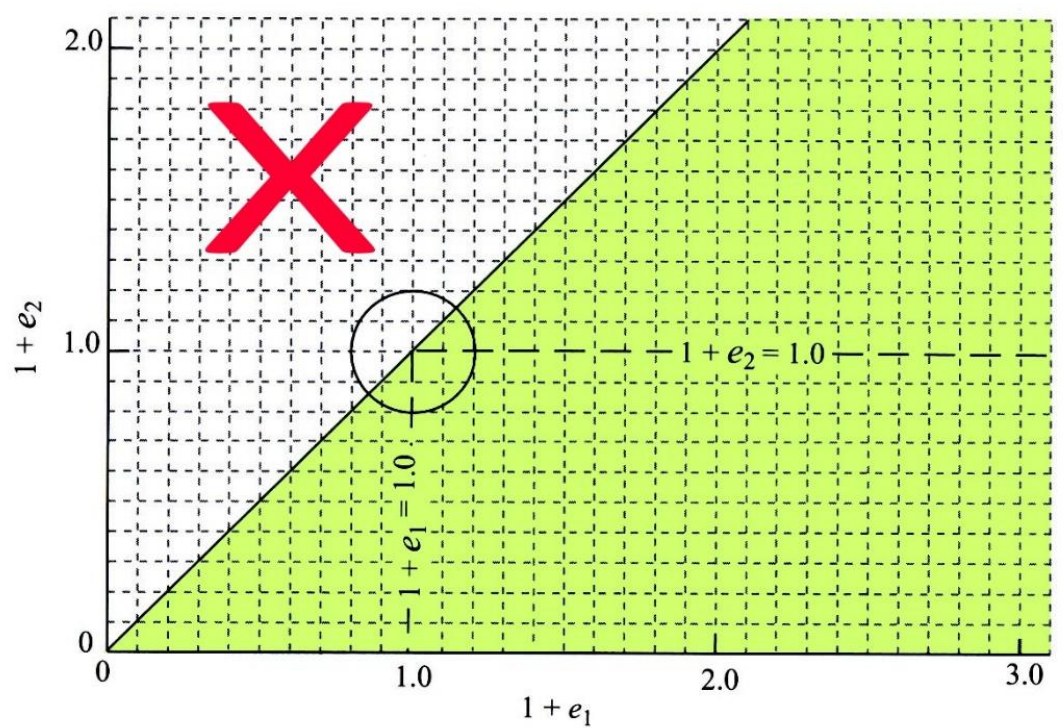


ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Ταξινόμηση των ελλείψεων διαστρωφικής παραμόρφωσης (Ramsay & Huber 1983).

**Μεταβολή εμβαδού (Area change)**

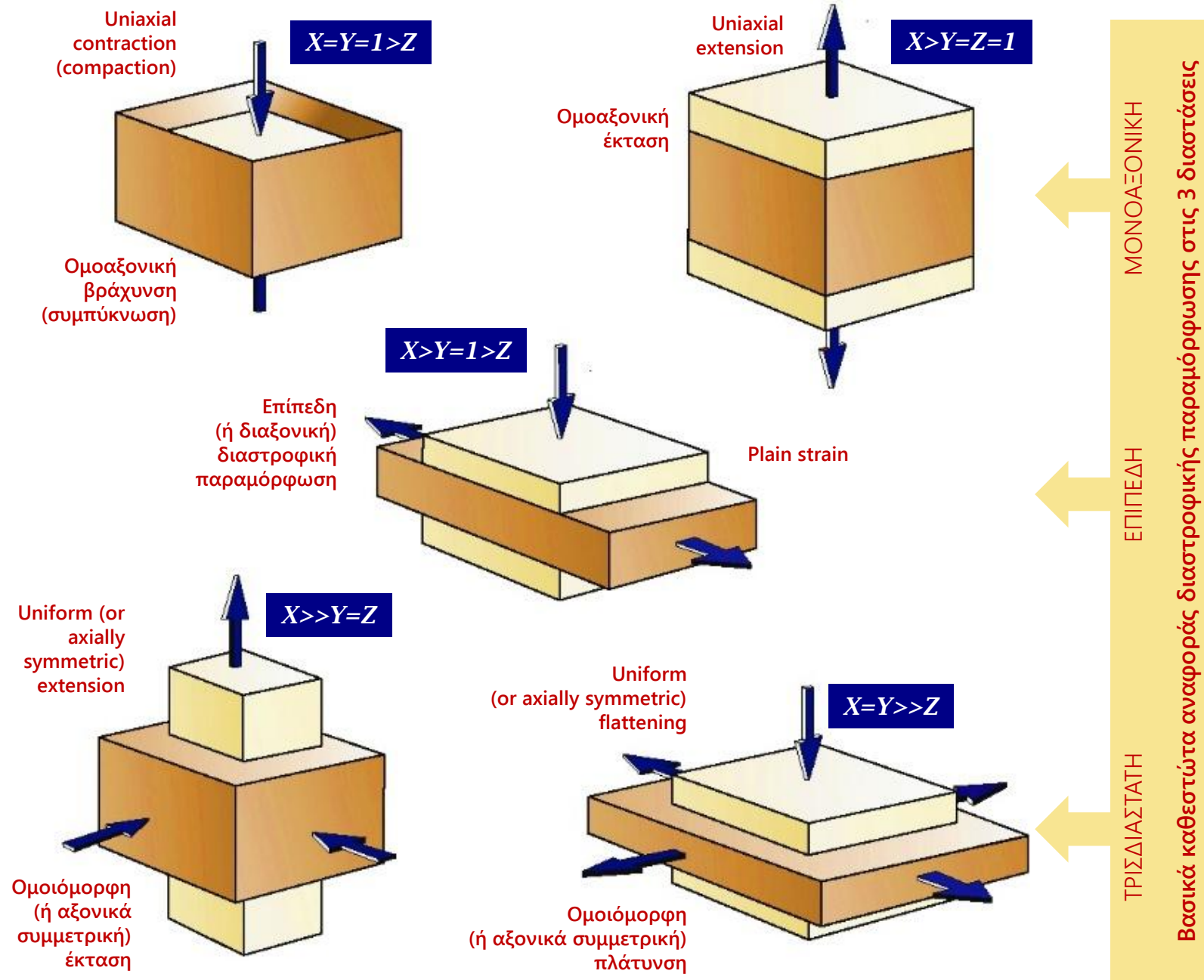
$R = XY = 1$







- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση



**Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις**

- Το φάσμα των καθεστώτων διαστρωτικής παραμόρφωσης διευρύνεται αν το γεωλογικό σώμα **μεταβάλλεται και στις τρεις διαστάσεις**.
- Τα **δύο ακραία μέλη** αυτής της περίπτωσης αντιστοιχούν στην **ομοιόμορφη έκταση** και **ομοιόμορφη πλάτυνση** και ανάμεσά τους αναπτύσσονται όλοι οι ενδιάμεσοι τύποι διαστρωτικής παραμόρφωσης.
- Κατά την ομοιόμορφη έκταση η διάταση (τέντωμα) κατά τον άξονα  $X$  αντισταθμίζεται από ομοιόμορφη βράχυνση (κόντεμα) στο κάθετο επίπεδο  $YZ$ .
- Κατά την ομοιόμορφη πλάτυνση η βράχυνση κατά τον άξονα  $Z$  αντισταθμίζεται από ομοιόμορφη διάταση στο κάθετο επίπεδο  $XY$ .
- Άσχετα με το αν το γεωλογικό σώμα παραμορφώνεται μόνο ως προς την μία, τις δύο ή και τις τρεις διαστάσεις, είναι απαραίτητο η **περιγραφή** της **διαστρωτικής παραμόρφωσης** να γίνεται **3D**.
- Η περιγραφή αυτή γίνεται με το **ελλειψοειδές παραμόρφωσης**, (strain ellipsoid) που αντιπροσωπεύει την παραμόρφωση μιας αρχικής σφαίρας, που η ακτίνα της αντιστοιχεί στην μονάδα.



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

ΕΙΣΩΣΗ ΕΛΛΙΠΣΟΕΙΔΟΥΣ

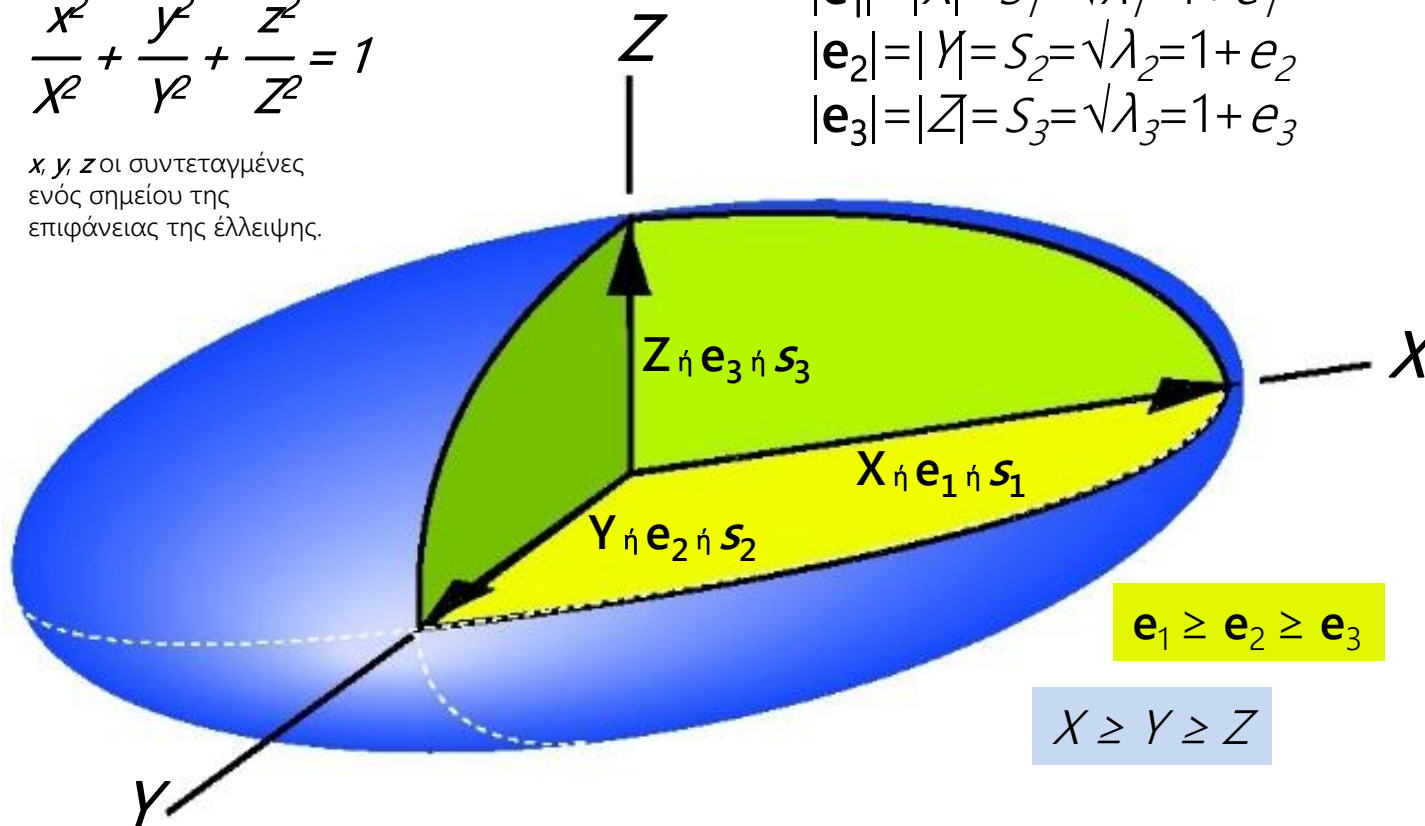
$$\frac{x^2}{X^2} + \frac{y^2}{Y^2} + \frac{z^2}{Z^2} = 1$$

$x, y, z$  οι συντεταγμένες ενός σημείου της επιφάνειας της έλλειψης.

$$|e_1| = |X| = S_1 = \sqrt{\lambda_1} = 1 + e_1$$

$$|e_2| = |Y| = S_2 = \sqrt{\lambda_2} = 1 + e_2$$

$$|e_3| = |Z| = S_3 = \sqrt{\lambda_3} = 1 + e_3$$



$$e_1 \geq e_2 \geq e_3$$

$$X \geq Y \geq Z$$

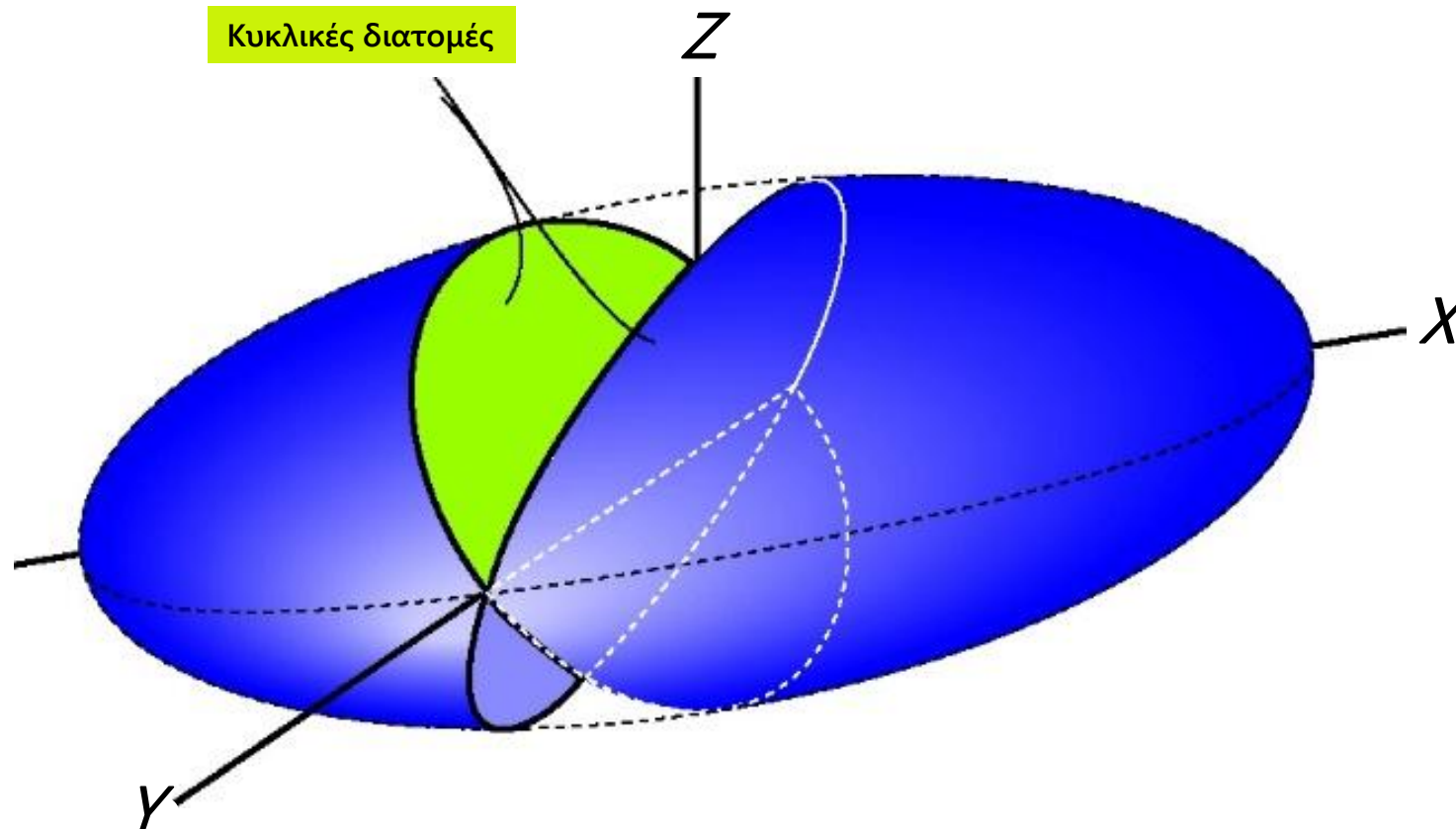
Το ελλειψοειδές διαστρωφικής παραμόρφωσης

- Το ελλειψοειδές διαστρωφικής παραμόρφωσης (strain ellipsoid) αντιστοιχεί στην αλλαγή στο σχήμα (ή και τον όγκο) μιας φανταστικής σφαίρας (με ακτίνα ίση με τη μονάδα) κατά την ομοιόμορφη διαστρωφική παραμόρφωση.
- Χαρακτηρίζεται από **τρία, κάθετα** μεταξύ τους, **επίπεδα συμμετρίας**, που αποκαλούνται **κύρια επίπεδα διαστρωφικής παραμόρφωσης**, τα οποία διατέμνονται κατά μήκος **τριών, κάθετων** μεταξύ τους **αξόνων**, που αποκαλούνται **κύριοι άξονες διαστρωφικής παραμόρφωσης**. Τα μήκη των αξόνων αυτών αποκαλούνται **κύριες διατάσεις (principal stretches)**.
- Ο μεγαλύτερος άξονας συμβολίζεται ως  $X$ , ο μεσαίος ως  $Y$  και ο μικρότερος ως  $Z$  ( $X > Y > Z$ ). Συχνά ονομάζονται και ως  $S_1, S_2, S_3, \sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \sqrt{\lambda_3}, 1+e_1, 1+e_2, 1+e_3$  που αντιπροσωπεύουν ισοδύναμα μεγέθη.
- Όταν το ελλειψοειδές οριστεί στο χώρο, θεωρούμε τους άξονες ως **ανύσματα** με δεδομένο **μήκος** και **προσανατολισμό**. Άρα προσδιορισμός αυτών των ανυσμάτων συνεπάγεται το προσδιορισμό του σχήματος και του προσανατολισμού του ελλειψοειδούς. Τα ανύσματα αυτά ονομάζονται  $e_1, e_2$  &  $e_3$  (προσοχή να μη συγχέονται με την μήκυνση που συμβολίζεται ως  $e$  ή  $\epsilon$ ) και  $e_1 > e_2 > e_3$ .
- Σε ένα παραμορφωμένο σώμα **γραμμές ύλης (material lines)** που είναι παράλληλες με τους τρεις κύριους άξονες, είναι μεταξύ τους **κάθετες**. Οι γραμμές αυτές ήταν επίσης μεταξύ τους κάθετες στο απαμορφωτο σώμα. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουν υποστεί διατμητική διαστρωφική παραμόρφωση. Κανένα άλλο σετ γραμμών δεν έχει αυτή την ιδιότητα.

Μεγέθη έλλειψοειδούς διαστρωφικής παραμόρφωσης	
$e_1, e_2, e_3$	Ανύσματα αξόνων έλλειψοειδούς διαστρωφικής παραμόρφωσης (μήκος & φορά)
$X, Y, Z$	Κύριοι άξονες διαστρωφικής παραμόρφωσης (μήκος)
$S_1, S_2, S_3$	Διάταση (που για αρχικό μήκος ίσο με τη μονάδα ταυτίζεται με το μήκος μετά την παραμόρφωση)
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	Τετραγωνική μήκυνση ( $a = S^2 \Rightarrow \sqrt{\lambda} = S$ )
$e_1, e_2, e_3$	Μήκυνση ( $1+e = S$ )

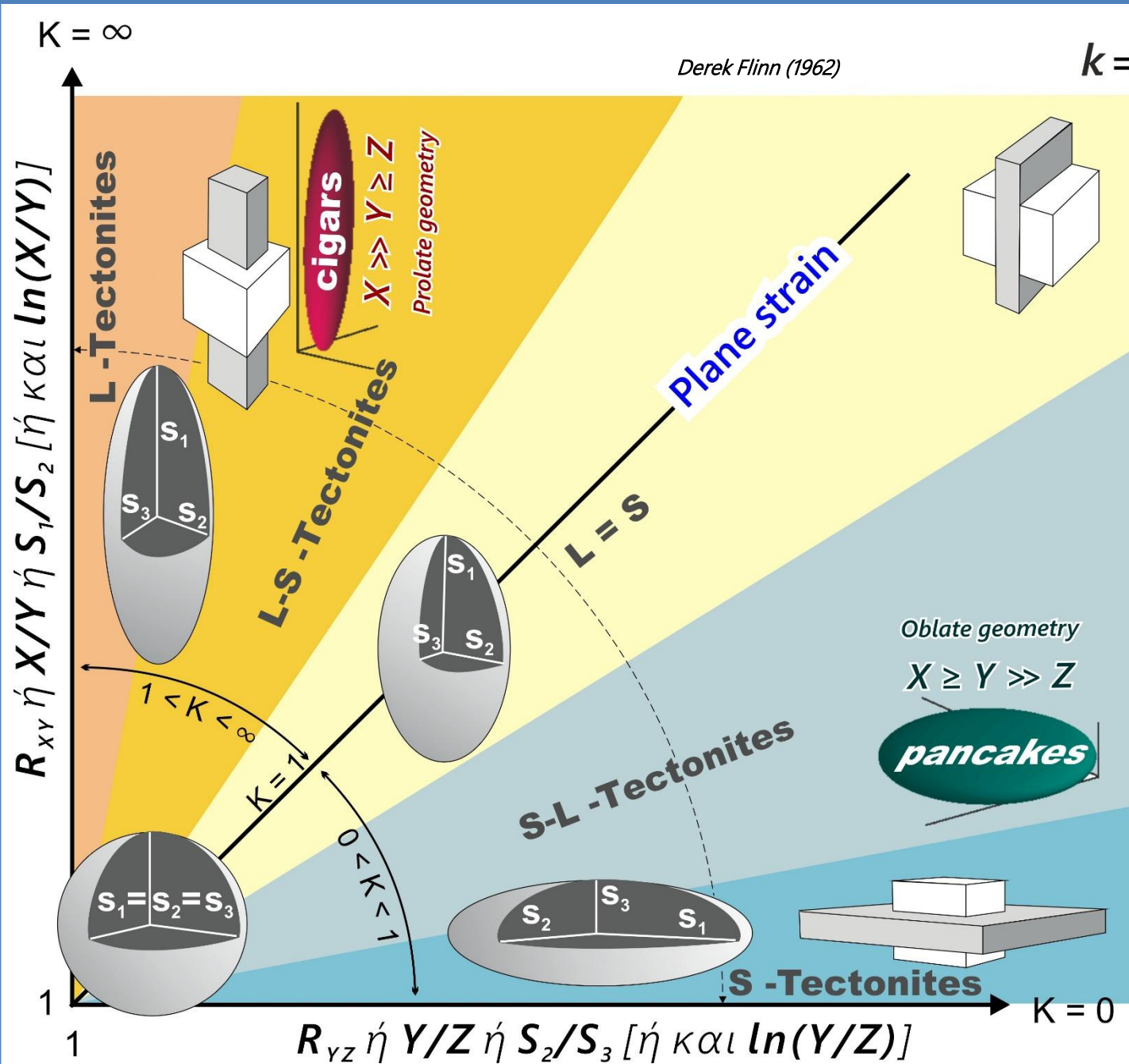
- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

### Το ελλειψοειδές διαστρωφικής παραμόρφωσης



- Στα ελλειψοειδή με τρεις άνισους άξονες υπάρχουν **δύο** κεντρικά **επίπεδα** που η διατομή τους με την επιφάνεια του ελλειψοειδούς είναι **κύκλοι** (αποκαλούνται και κυκλικές διατομές).
- Η **διατομή** των δύο αυτών επιπέδων ταυτίζεται με τον ενδιάμεσο **άξονα Y**, ενώ οι X και Z διχοτομούν τις γωνίες των δύο αυτών επιπέδων.
- Στην περίπτωση της **επίπεδης διαστρωφικής παραμόρφωσης** οι κυκλικές αυτές διατομές ταυτίζονται (σαν μέγεθος) με μια διατομή της αρχικής απαραμόρφωτης σφαίρας. Δηλαδή χαρακτηρίζονται από **μηδενική διαστρωφική παραμόρφωση** και όλες οι γραμμές ύλης (material lines) πάνω σε αυτές διατηρούν το αρχικό τους μήκος.
- Στην περίπτωση της **τριδιάστατης διαστρωφικής παραμόρφωσης** όλες οι γραμμές πάνω στις κυκλικές αυτές διατομές έχουν υποστεί **ίδια διαστρωφική παραμόρφωση**, δηλαδή έχουν βραχυνθεί ή εκταθεί κατά το ίδιο ποσοστό.
- Για παράδειγμα ένα κέλυφος απολιθώματος σε μια τέτοια διατομή θα φαίνεται απαραμόρφωτο (χωρίς διαστρωφική παραμόρφωση). Αν μάλιστα η διαστρωφική παραμόρφωση είναι επίπεδη θα έχει το ίδιο μέγεθος, ενώ αν είναι τρισδιάστατη θα έχει σμικρυνθεί ή μεγεθυνθεί.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση



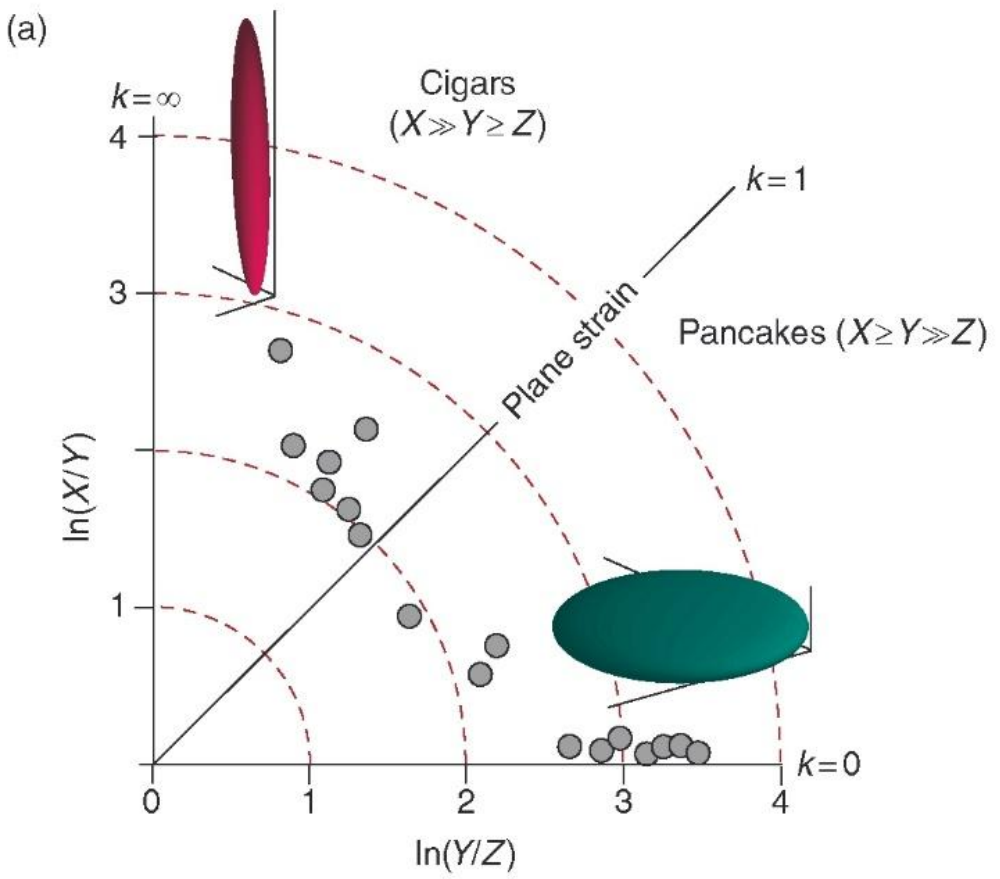
- Το πραγματικό σχήμα του ελλειψοειδούς καθορίζεται από την παράμετρο  $-k$ , όπου  $k = (R_{XY} - 1) / (R_{YZ} - 1)$ .
- Διαχωρίζει περιοχές όπου τα ελλειψοειδή έχουν πεπλατυσμένη γεωμετρία (oblate, flatten ή pancakes - τηγανίτες) από περιοχές που έχουν ωοειδή γεωμετρία (prolate, constrictional ή cigars - πούρα).
- Κατά μήκος της διαγωνίου προβάλλονται παραμορφώσεις όπου  $X/Y = Y/Z$ , όπως π.χ. στην επίπεδη διαστρωτική παραμόρφωση.
- Ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύουν ομοιόμορφη (ή αξονικά συμμετρική) πλάτυνση και έκταση αντίστοιχα.
- Κάθε σημείο στο διάγραμμα αντιπροσωπεύει ένα μοναδικό συνδυασμό μεγέθους διαστρωτικής παραμόρφωσης και της 3-D γεωμετρίας που την χαρακτηρίζει, δηλαδή ένα ελλειψοειδές με μοναδική παράμετρο  $k$ .
- Ίδια ελλειψοειδή με διαφορετικό προσανατολισμό προβάλλονται στο ίδιο σημείο. Π.χ. για τα ελλειψοειδή τόσο της απλής διάτμησης (simple shear) όσο και της καθαρής (pure shear) ισχύει ότι  $k=1$ , άρα προβάλλονται στη διαγώνιο.
- Αν και σε γενικές γραμμές το μέγεθος της παραμόρφωσης αυξάνει από το κέντρο προς την περιφέρεια (γι' αυτό και χρησιμοποιούνται οι ομόκεντροι κύκλοι), δεν μπορεί να υπάρξει απευθείας σύγκριση ανάμεσα στις περιοχές του διαγράμματος, αλλά ούτε και υπάρχει σαφής μαθηματική ή φυσική ερμηνεία.



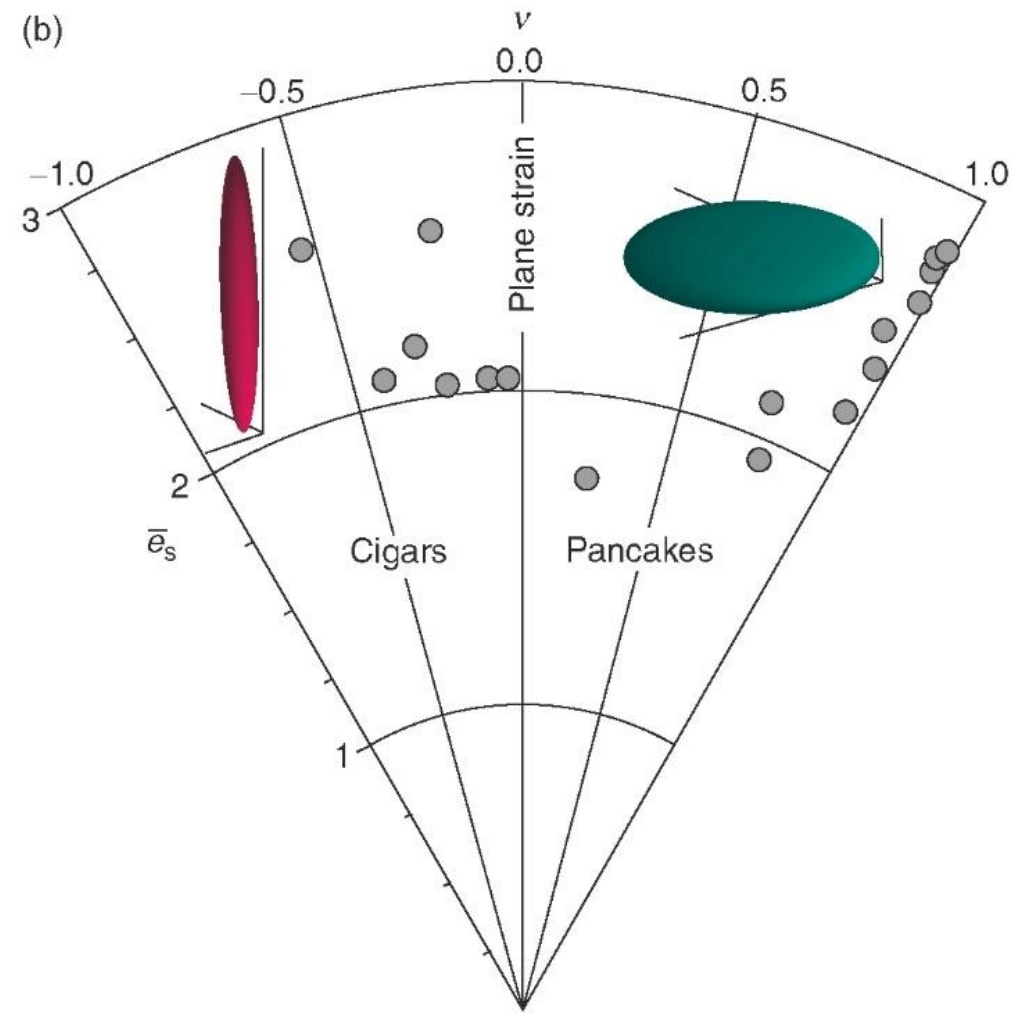
Διάγραμμα Hsü

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

Flinn



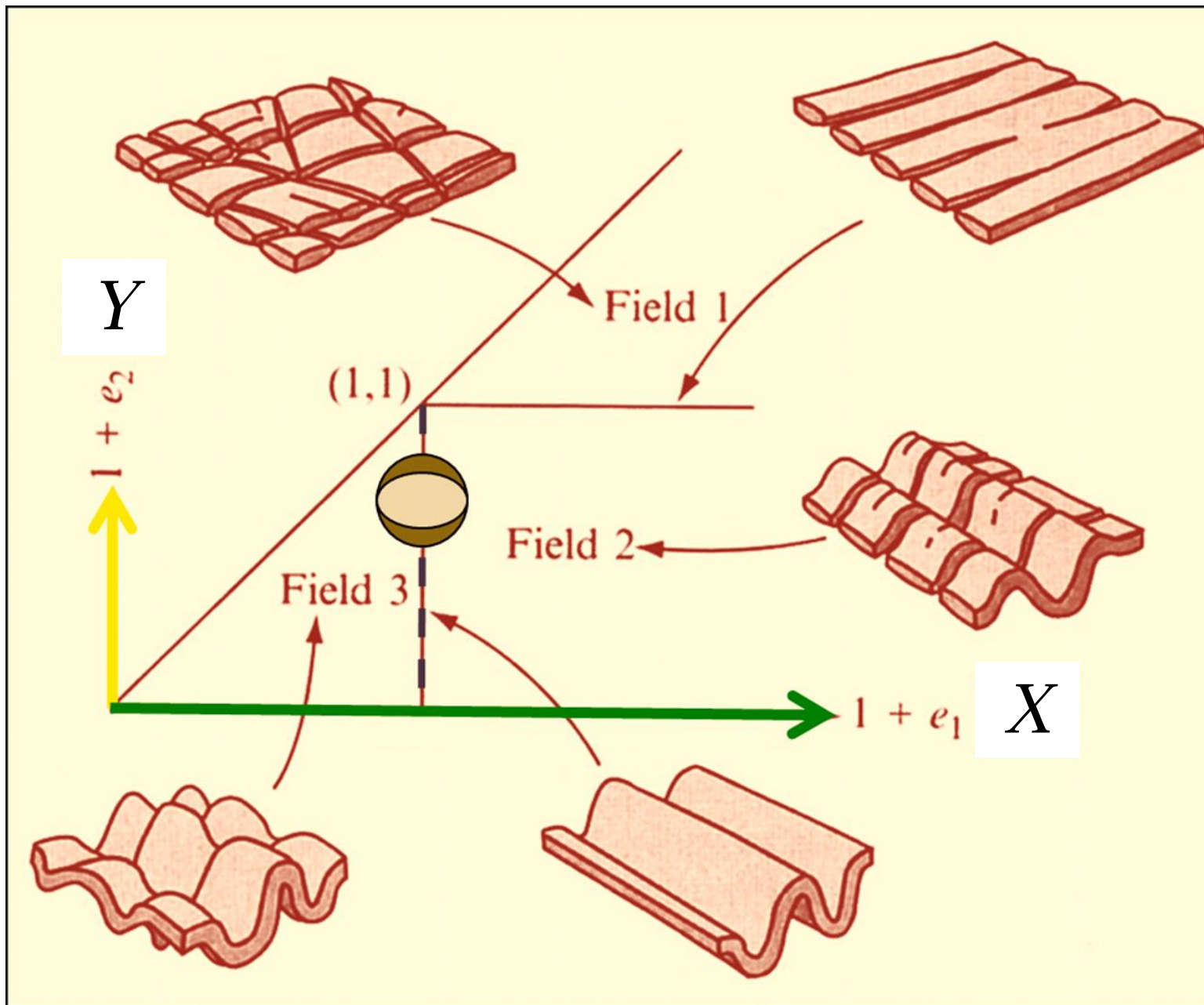
Hsü



Test N<sub>o</sub> 3



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση



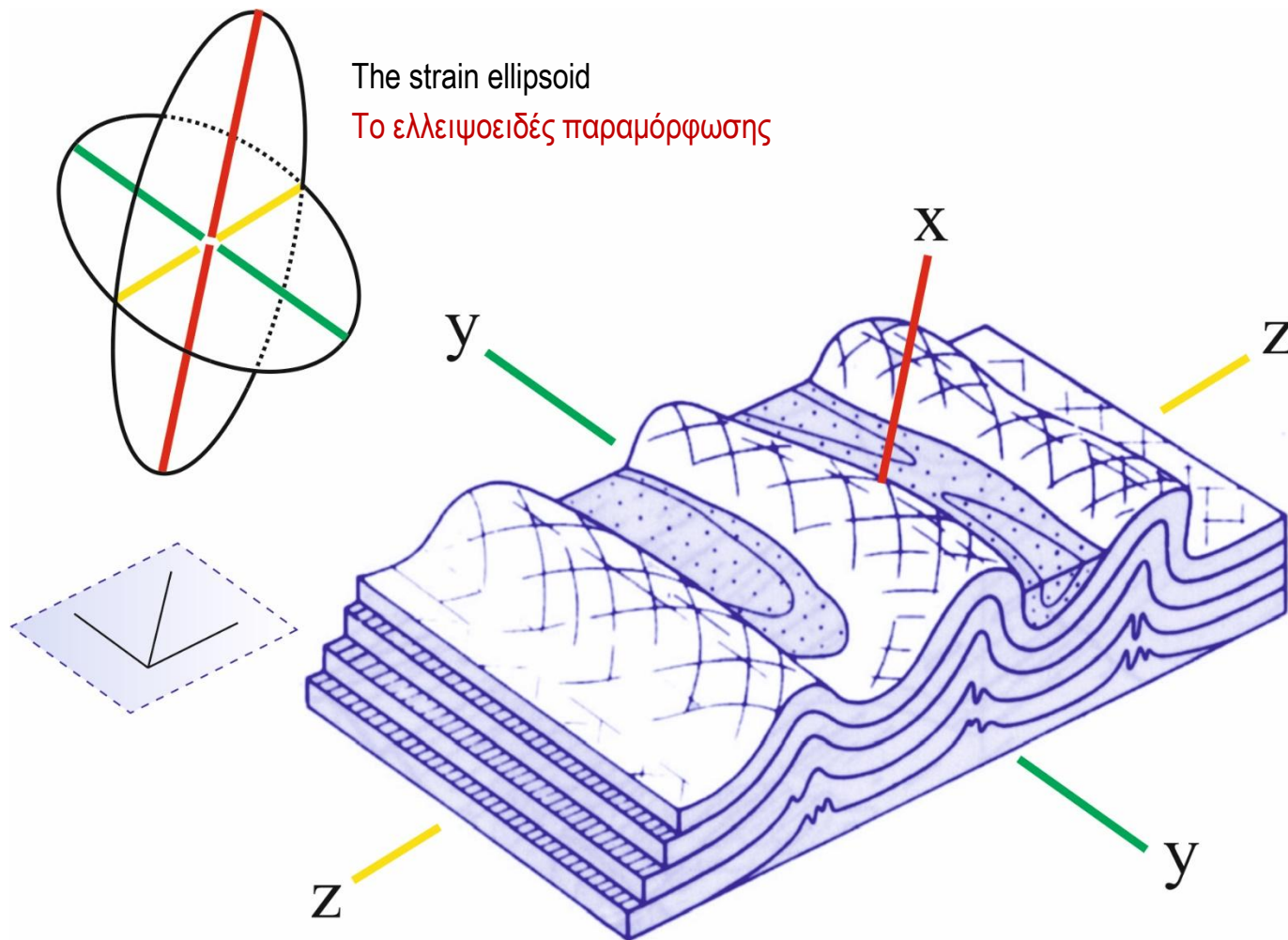
*Έλλειψη, ελλειψοειδές και άξονες X, Y, Z*

Το πρόβλημα με τους τρεις κύριους άξονες X, Y, Z του ελλειψοειδούς διαστρωτικής παραμόρφωσης, όταν μελετάμε την "παραμόρφωση" στις δύο διαστάσεις, όπου χρησιμοποιούμε δύο άξονες, τους X & Y.

← Προβολή χαρακτηριστικών τεκτονικών δομών στο διάγραμμα ταξινόμησης των ελλείψεων διαστρωτικής παραμόρφωσης στις δύο διαστάσεις.

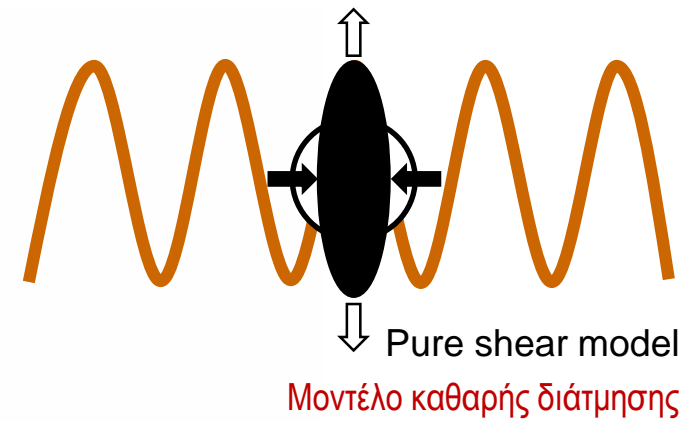


- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

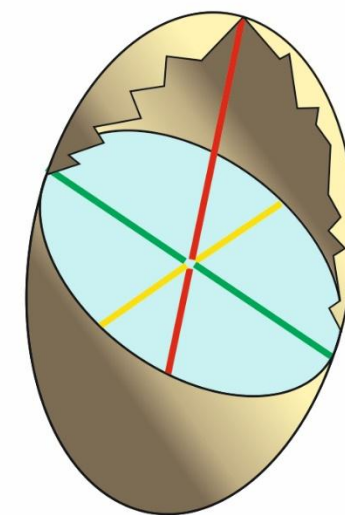


The three principal axes of strain  
 Οι τρεις κύριοι άξονες παραμόρφωσης  $x > y(=1) > z$

Έλλειψη, ελλειψοειδές και άξονες X, Y, Z



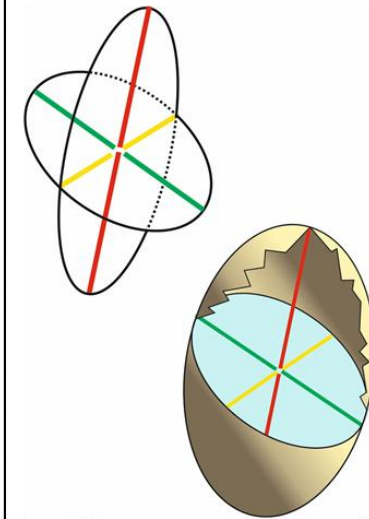
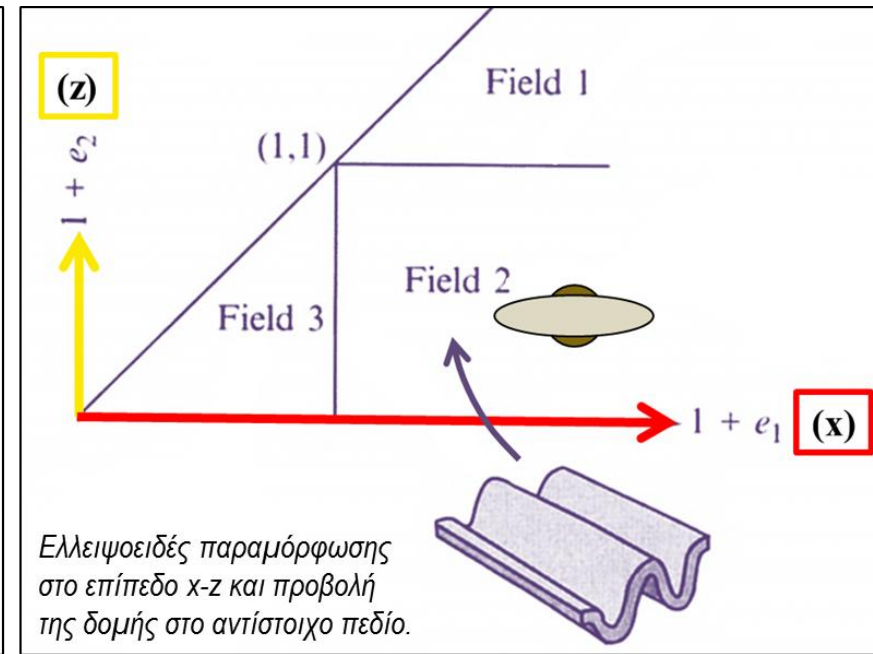
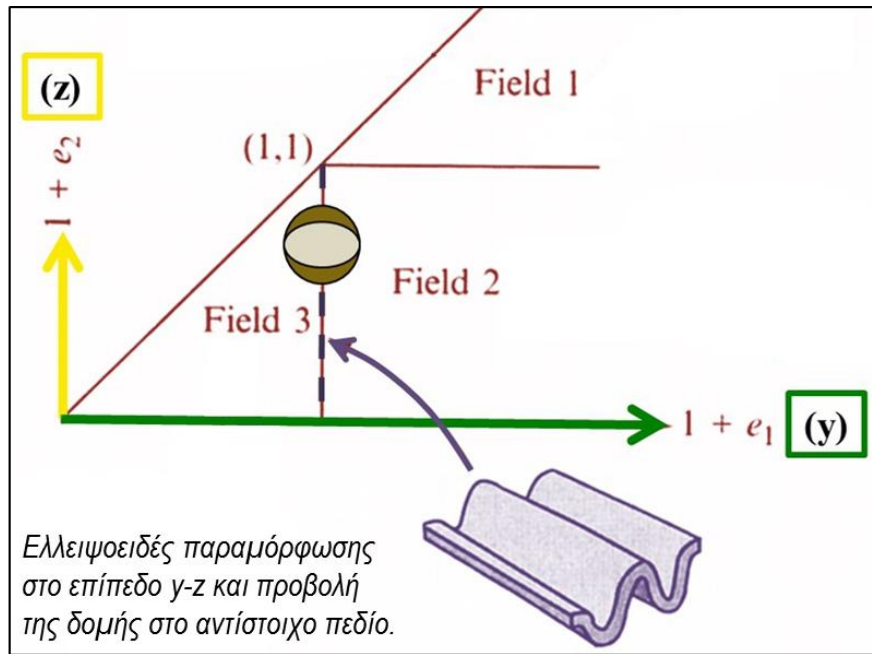
The strain ellipsoid  
 Το ελλειψοειδές παραμόρφωσης



Το πρόβλημα με τους τρεις κύριους άξονες X, Y, Z του ελλειψοειδούς διαστρωτικής παραμόρφωσης, όταν μελετάμε την "παραμόρφωση" στις δύο διαστάσεις, όπου χρησιμοποιούμε δύο άξονες, τους X & Y.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

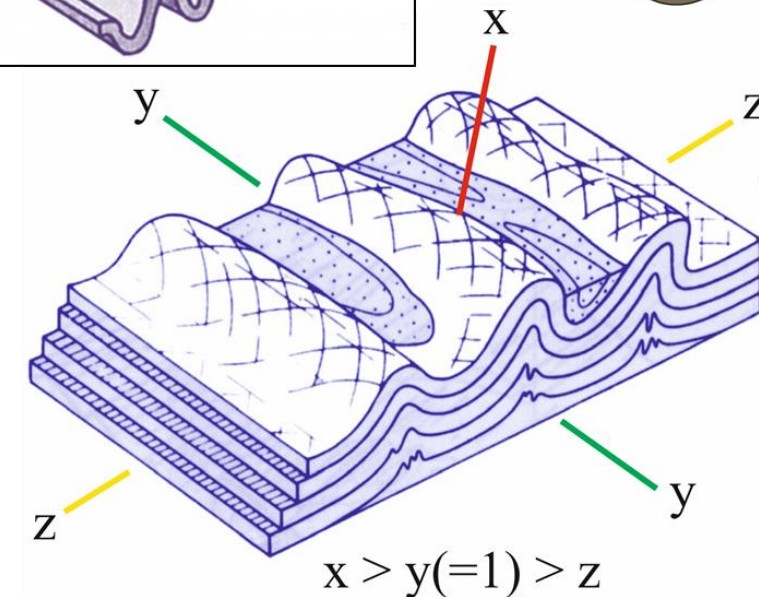
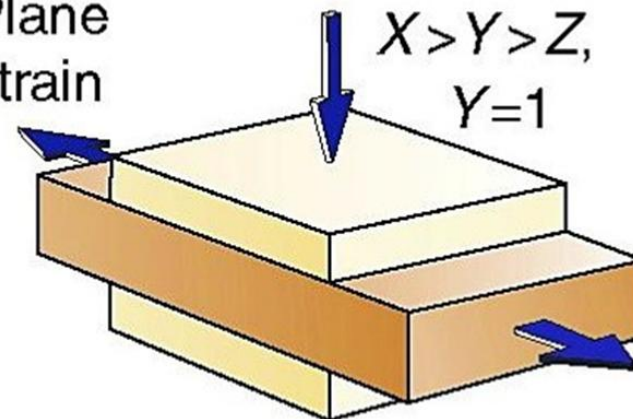
Έλλειψη, ελλειψοειδές και άξονες X, Y, Z



Το πρόβλημα με τους τρεις κύριους άξονες X, Y, Z του ελλειψοειδούς διαστρωτικής παραμόρφωσης, όταν μελετάμε την "παραμόρφωση" στις δύο διαστάσεις, όπου χρησιμοποιούμε δύο άξονες, τους X & Y.

Επίπεδη (ή διαζωνική) παραμόρφωση

Plane strain





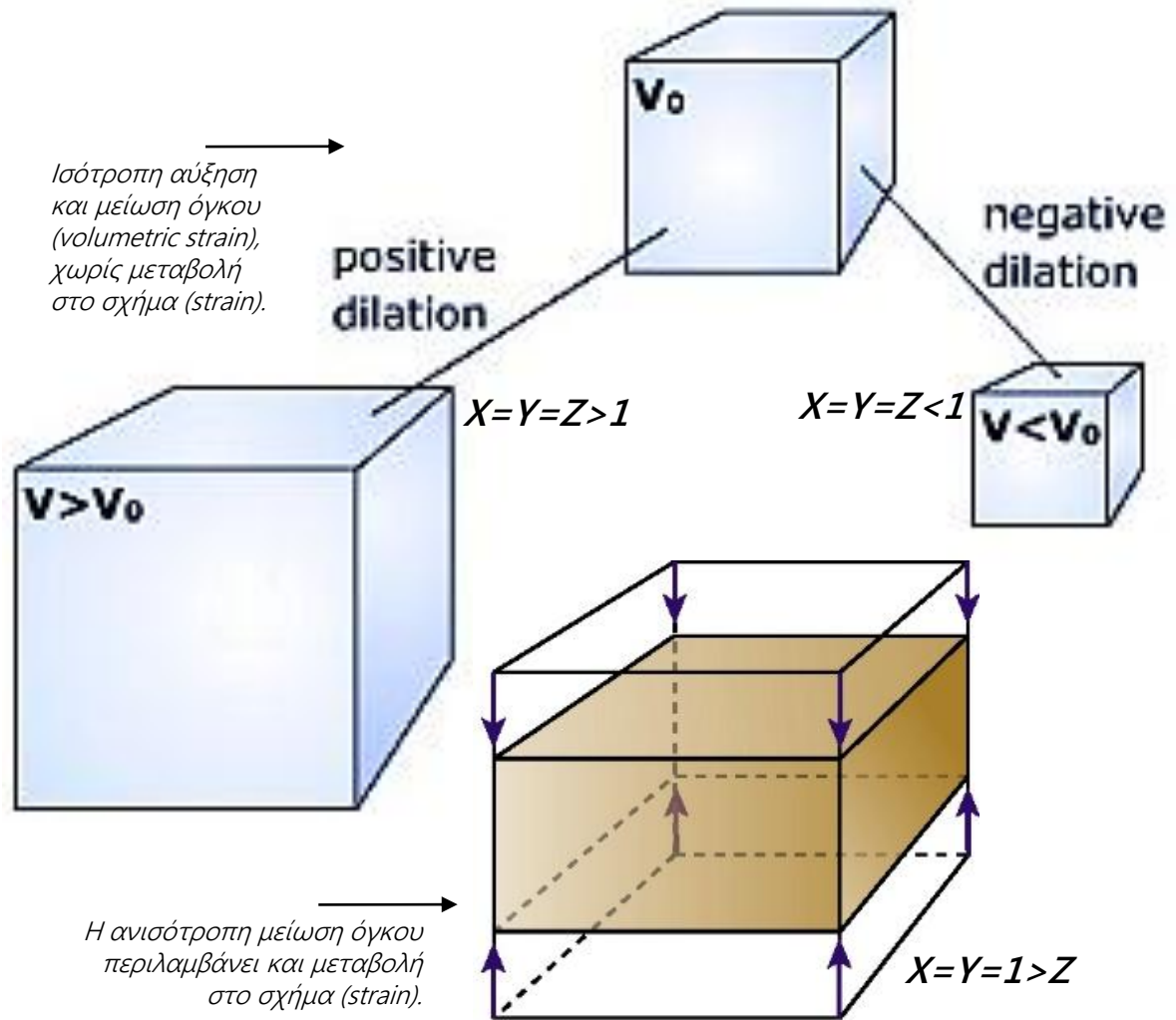
**Μεταβολή όγκου**

Μεγέθη μεταβολής όγκου

**Dilation (Διεύρυνση \*)** ή **Pure volume change (καθαρή μεταβολή όγκου)** ή **Volumetric strain (ογκομετρική "παραμόρφωση") Δ**

$$\Delta = (V - V_0)/V_0$$

\* Ο όρος dilation (διεύρυνση) χρησιμοποιείται χωρίς τη συμβατική έννοια, δεδομένου ότι μπορεί να αναφέρεται και σε συρρίκνωση.



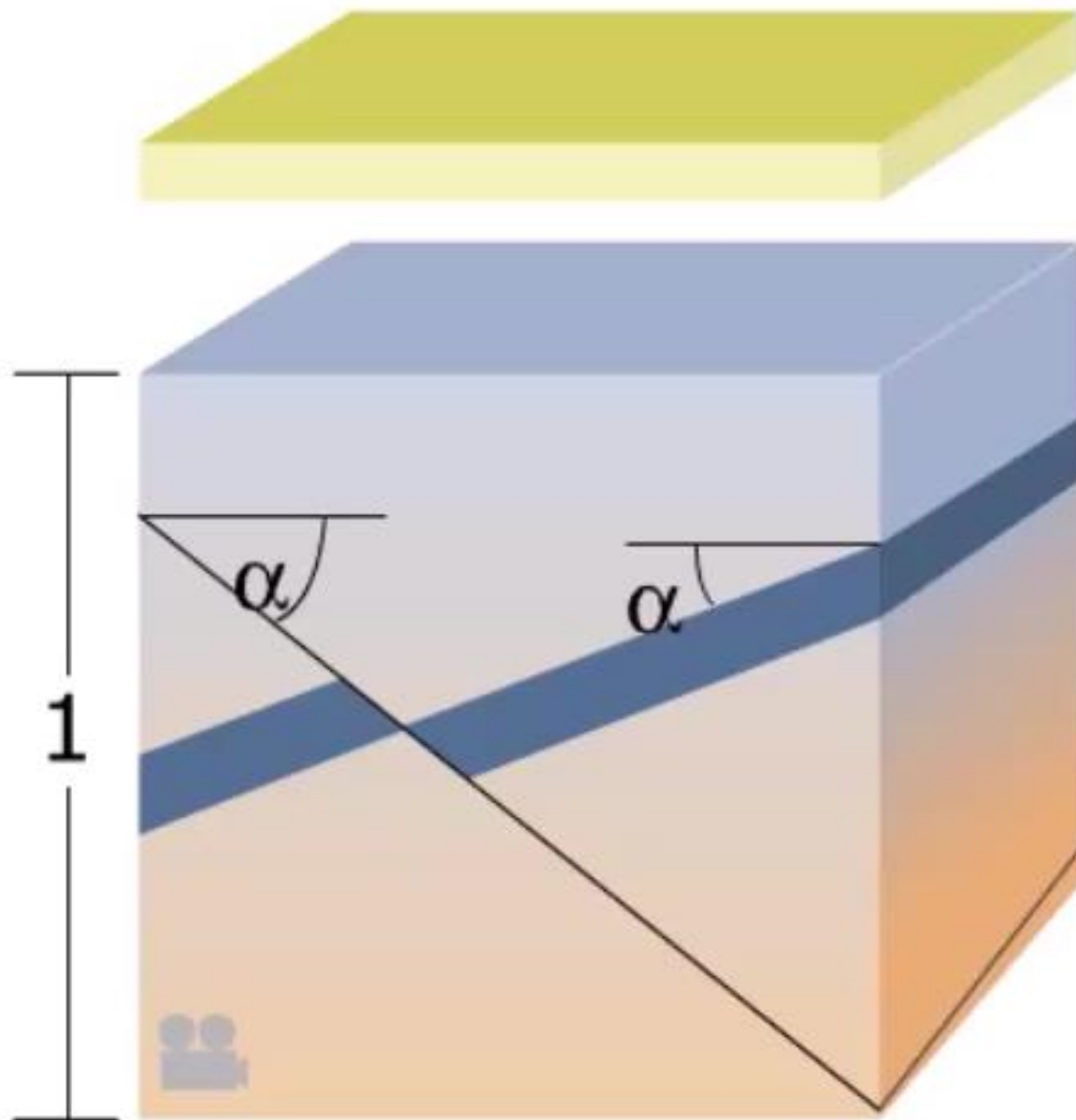
- Ο παράγοντας  $\Delta$  της μεταβολής όγκου λαμβάνει **θετικές** ή **αρνητικές** τιμές, ανάλογα με το αν έχουμε αύξηση ή μείωση του όγκου μετά την παραμόρφωση (όπως ακριβώς και η μήκυνση ή η μεταβολή εμβαδού).
- Οι καθαρές μεταβολές όγκου και εμβαδού (αυτές που δεν συνοδεύονται και από μεταβολή στο σχήμα) **δεν συνεπάγονται εσωτερική περιστροφή**, με την έννοια ότι γραμμές παράλληλες με τους κύριους άξονες διαστρωφικής παραμόρφωσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό που είχαν πριν την παραμόρφωση.
- Η παραμόρφωση αυτού του τύπου καλείται και **volumetric strain**. Το αποδίδουμε ως **ογκομετρική "παραμόρφωση"** δεδομένου ότι δεν έχω διαστρωφή, δηλαδή αλλαγή στο σχήμα, αλλά ούτε και παραμόρφωση με την έννοια να συμπεριλαμβάνει μετατόπιση και εξωτερική περιστροφή. Αποτελεί ένα τύπο **ομοαξονικής διαστρωφικής παραμόρφωσης (coaxial strain)**, χωρίς μεταβολή στο σχήμα (strain).
- Αντιστοιχεί σε αυτό που ονομάζουμε **ισότροπη μεταβολή όγκου (isotropic volume change)**, που σημαίνει ισόποση αύξηση ή μείωση προς όλες τις κατευθύνσεις. Άρα τα αντικείμενα-δείκτες (π.χ. απολιθώματα) κρατάνε το σχήμα τους και αλλάζουν μόνο το μέγεθός τους. Στην **ισότροπη αύξηση** όγκου  $X=Y=Z > 1$  και στην **ισότροπη μείωση**  $X=Y=Z < 1$ .
- Υπάρχει και η **ανισότροπη μεταβολή όγκου (anisotropic volume change)**, όπου εκτός από την "**καθαρή**" μεταβολή όγκου (ογκομετρική "**παραμόρφωση**" – **volumetric strain**) παρατηρείται και **μεταβολή στο σχήμα**, διότι ο όγκος μεταβάλλεται διαφορετικά στις διάφορες κατευθύνσεις.
- Μπορεί και εδώ να παρατηρείται αύξηση ή μείωση του όγκου αλλά το γενικό χαρακτηριστικό είναι ότι από τους άξονες  $X, Y \& Z$ , **τουλάχιστον ένας**, ή και οι δύο ή και οι τρεις) έχουν **διαφορετικό μήκος**.
  - Στην περίπτωση αυτή αναλύουμε την διαστρωφική παραμόρφωση σε **δύο συνιστώσες**, μία που έχει να κάνει με την καθαρή μεταβολή όγκου (**volumetric strain**) και μία που αφορά τη μεταβολή στο σχήμα (**τυπικό strain**). Εννοείται ότι η ανάλυση αυτή **δεν έχει να κάνει με την ιστορία της παραμόρφωσης (deformation history)**.



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

### - Coaxial, uniaxial contraction - Anisotropic volume (area) change

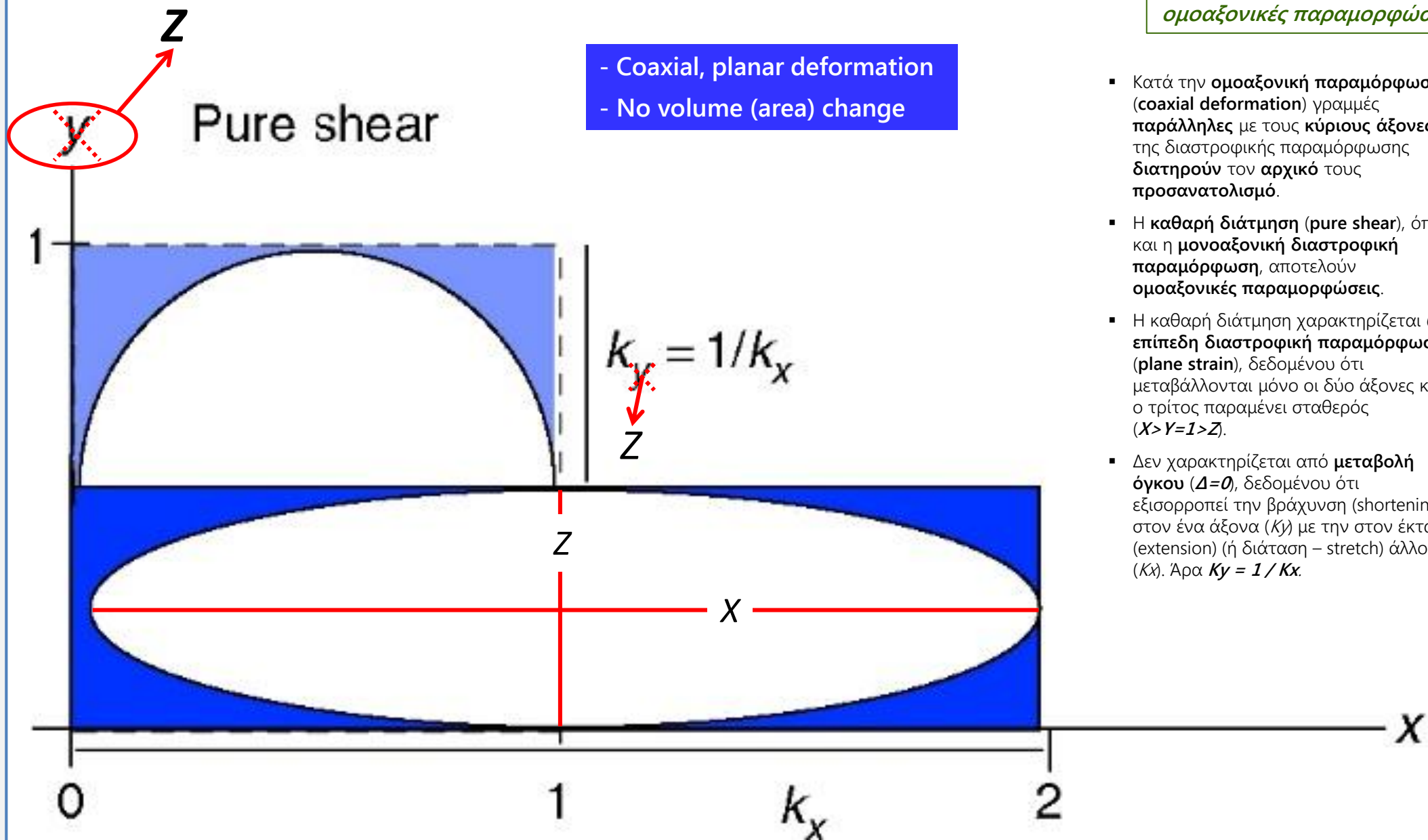


### Μονοαξονική διαστρωφική παραμόρφωση (συμπύκνωση)

- Έκταση ή βράχυνση κατά μήκος ενός εκ των τριών κύριων αξόνων ενώ οι άλλοι δύο παραμένουν σταθεροί.
- Στην **μονοαξονική βράχυνση** (μείωση όγκου) έχουμε **αναδιοργάνωση** του πετρώματος, π.χ i) στο ανώτερο τμήμα του φλοιού **μείωση των κενών των πόρων** στα πορώδη πετρώματα, λόγω αποβολής νερού, πετρελαίου ή αερίων (συμπύκνωση – compaction), ii) βαθύτερα στο φλοιό φαινόμενα **διάλυσης υπό πίεση** (π.χ. στυλόλιθοι στα ανθρακικά) με απομάκρυνση των εν διαλύσει ορυκτών και iii) σε συνθήκες μεταμόρφωσης στον κατώτερο – μέσω φλοιό απομάκρυνση ορυκτών με **διάχυση (diffusion)** και δημιουργία σχισμού (cleavage) ή μείωση του πάχους των ζωνών διάτμησης (shear zones).
- Στην **μονοαξονική έκταση** (αύξηση όγκου) έχουμε δημιουργία **εκτατικών (ανοικτών) διαρρήξεων (open fractures)**, ή **φλεβών (veins)** στο ανώτερο τμήμα του φλοιού, ή αύξηση όγκου λόγω χημικών αντιδράσεων κατά τη **μεταμόρφωση** σε βαθύτερα τμήματα.
- Πιο χαρακτηριστική περίπτωση η **συμπύκνωση και διαγένεση** των ιζημάτων, όπου μελετώντας τις μεταβολές που προκαλεί στην **κλίση** των ιζημάτων και των συνιζηματογενών ρηγμάτων, σε συνδυασμό με τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (πορώδες κλπ.) μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό της βράχυνσης.
- Μαζί με την απλή διάτμηση (simple shear) αποτελούν τις δύο **συνιστώσες** που αναλύουμε την sub-simple shear.

← Κατά τη συμπύκνωση και διαγένεση η κατακόρυφη βράχυνση των ιζημάτων (ανισότροπη αρνητική διεύρυνση) συνεπάγεται μείωση της κλίσης ιζημάτων και ρηγμάτων. Μόνο αν οι δομές ήταν παράλληλες στον άξονα της βράχυνσης θα κρατούσαν τον αρχικό τους προσανατολισμό κατά την παραμόρφωση.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση



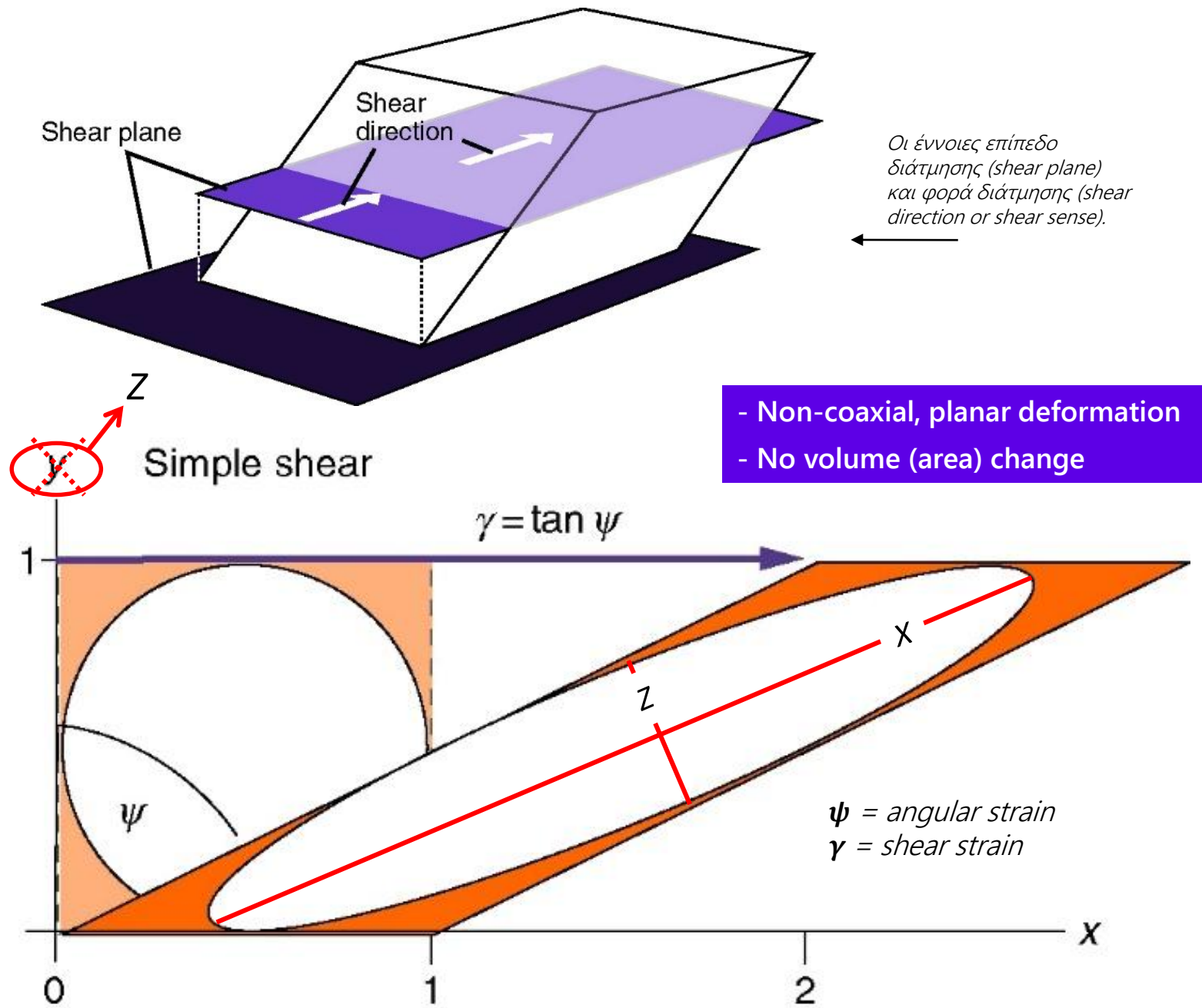
*Καθαρή διάτμηση και ομοαξονικές παραμορφώσεις*

- Κατά την ομοαξονική παραμόρφωση (coaxial deformation) γραμμές παράλληλες με τους κύριους άξονες της διαστρωφικής παραμόρφωσης διατηρούν τον αρχικό τους προσανατολισμό.
- Η καθαρή διάτμηση (pure shear), όπως και η μονοαξονική διαστρωφική παραμόρφωση, αποτελούν ομοαξονικές παραμορφώσεις.
- Η καθαρή διάτμηση χαρακτηρίζεται ως επίπεδη διαστρωφική παραμόρφωση (plane strain), δεδομένου ότι μεταβάλλονται μόνο οι δύο άξονες και ο τρίτος παραμένει σταθερός ( $X > Y = 1 > Z$ ).
- Δεν χαρακτηρίζεται από μεταβολή όγκου ( $\Delta = 0$ ), δεδομένου ότι εξισορροπεί την βράχυνση (shortening) στον ένα άξονα ( $K_y$ ) με την στον έκταση (extension) (ή διάταση – stretch) άλλο ( $K_x$ ). Άρα  $K_y = 1 / K_x$ .



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

**Απλή διάτμηση και μη-ομοαξονική παραμόρφωση**



- Non-coaxial, planar deformation  
- No volume (area) change

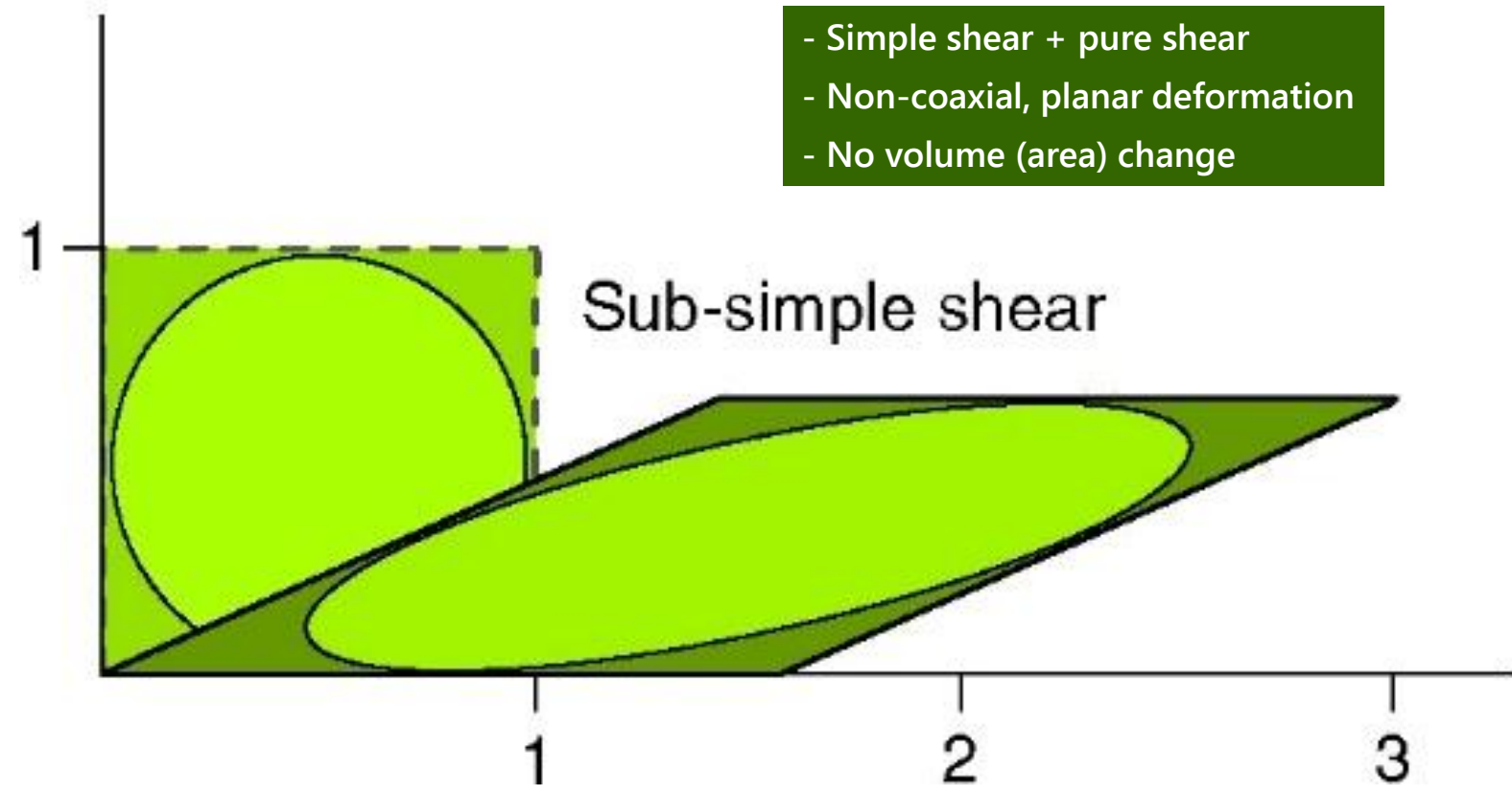
Οι έννοιες επίπεδο διάτμησης (shear plane) και φορά διάτμησης (shear direction or shear sense).

- Όπως και η καθαρή διάτμηση χαρακτηρίζει και αυτή μία **επίπεδη παραμόρφωση** με μεταβολή μόνο των δύο κύριων αξόνων ( $X > Y = 1 > Z$ ), χωρίς μεταβολή όγκου ( $\Delta = 0$ ).
- Η διαφορά εντοπίζεται στο ότι στην απλή διάτμηση (simple shear) οι δύο κύριοι άξονες δεν μεταβάλλουν μόνο το μήκος τους (όπως στην καθαρή διάτμηση), αλλά και τον **προσανατολισμό** τους.
- Υπεισέρχεται δηλαδή μια συνιστώσα **εσωτερικής περιστροφής** η οποία είναι σε άμεση συνάρτηση με το **ποσό** της **διαστρωφικής** παραμόρφωσης που ασκείται στο πέτρωμα. **Δηλαδή ο προσανατολισμός του ελλειψοειδούς αλλάζει για διαφορετικά ποσά παραμόρφωσης.**
- Αυτού του είδους η παραμόρφωση ανήκει στην κατηγορία των **μη-ομοαξονικών παραμορφώσεων (non-coaxial deformations)**.
- Από τα δύο επίπεδα που δημιουργούν **κυκλικές διατομές** με το ελλειψοειδές παραμόρφωσης, το **ένα** είναι **παράλληλο** με το **επίπεδο** της **διάτμησης**.
- **Γραμμές** και **επίπεδα παράλληλα** με το επίπεδο **διάτμησης** διατηρούν το **μέγεθος** και τον **προσανατολισμό** τους. Για όλα τα υπόλοιπα μεταβάλλονται και τα δύο.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

Υπο-απλή διάτμηση ?  
(sub-simple shear)

- Simple shear + pure shear
- Non-coaxial, planar deformation
- No volume (area) change



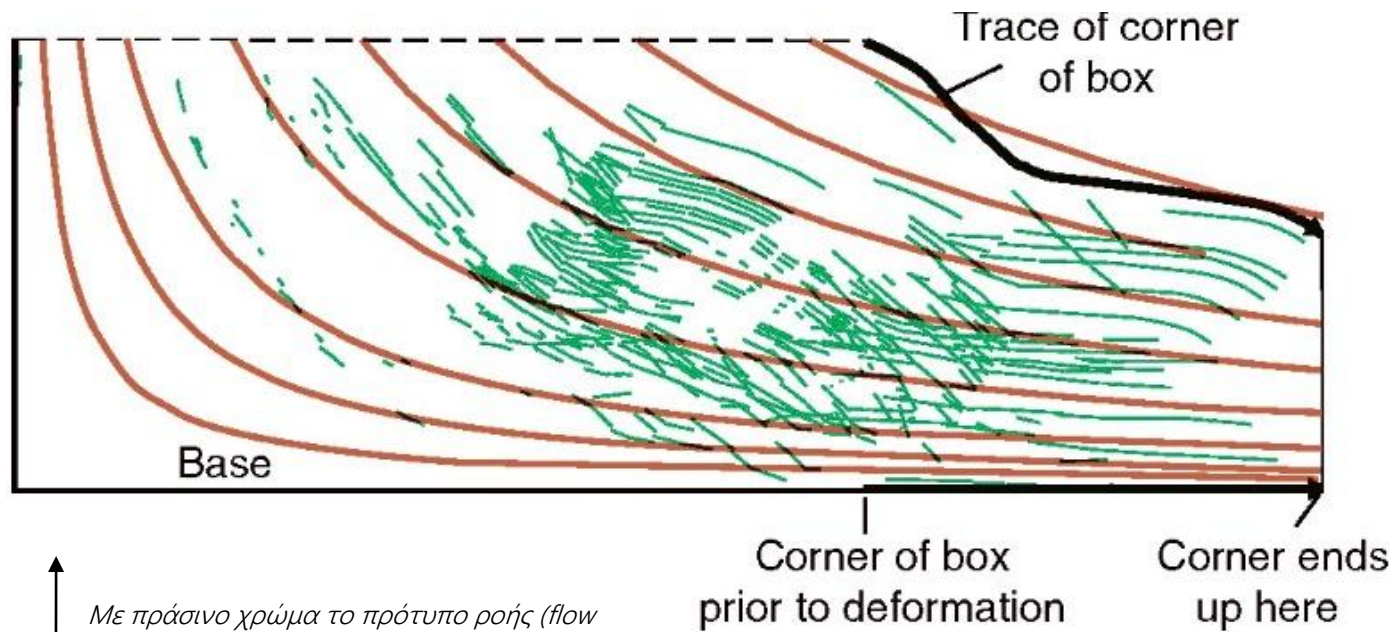
- Ανήκει και αυτή στις επίπεδες διαστρωφικές παραμορφώσεις (**plane strain** –  $X>Y=1>Z$ ), χωρίς μεταβολή όγκου ( $\Delta=0$ ).
- Χαρακτηρίζει τις παραμορφώσεις **ανάμεσα** στην **καθαρή** και **απλή διάτμηση**.
- Οι παραμορφώσεις αυτές μπορούν να αναλυθούν σε δύο συνιστώσες, μία απλής διάτμησης και μία καθαρής. Άρα αντιπροσωπεύει **μη-ομοαξονική παραμόρφωση**.
- Η **εσωτερική περιστροφή** που συνεπάγεται είναι **μικρότερη** απ' ό,τι στην απλής διάτμησης.
- Στη βιβλιογραφία συναντάται και με τον όρο **general shear** (**γενική διάτμηση**), αν και επειδή αποτελεί απλά μια κατηγορία των επίπεδων παραμορφώσεων, δεν είναι τόσο "γενική".

ΔΙΑΣΤΡΩΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ και:

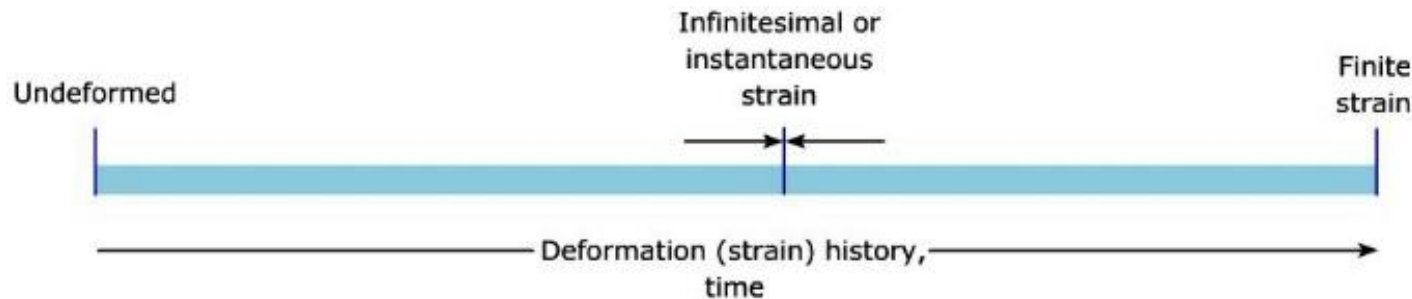
- Ανύσματα μετατόπισης
- Τροχιές υλικών σωματιδίων

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

**Ιστορία της παραμόρφωσης & προοδευτική παραμόρφωση**



↑ Με πράσινο χρώμα το πρότυπο ροής (flow pattern) όπως καθορίζεται από τις τροχιές των υλικών σωματιδίων (particle paths), σε ένα πείραμα με πλαστελίνη σε συνθήκες καθαρής διάτμησης (pure shear). Με καφέ χρώμα το θεωρητικά αναμενόμενο πρότυπο.



- Οι τεκτονικές δομές που βλέπουμε στην ύπαιθρο αντιπροσωπεύουν το **τελικό στάδιο** της **παραμόρφωσης (finite strain or deformation – πεπερασμένη ή συνολική παραμόρφωση)** και από αυτή τη σκοπιά αναλύσαμε μέχρι τώρα την παραμόρφωση.
- Σημαντική όμως είναι και η **ιστορία** της **παραμόρφωσης** ενός γεωλογικού σώματος και το πώς αυτή εξελίχθηκε στο χρόνο, από το απαράμορφωτο στο παραμορφωμένο στάδιο.
- Πρέπει λοιπόν να εστιάσουμε την προσοχή μας στην μελέτη της **προοδευτικής παραμόρφωσης (progressive deformation)** και του **προτύπου ροής (flow pattern)** που τη χαρακτηρίζει, δηλαδή την εικόνα που δίνουν οι τροχιές των υλικών σωματιδίων κατά την ιστορία της παραμόρφωσης.
- Για την μελέτη της προοδευτικής παραμόρφωσης υπεισέρχεται ο όρος της **απειροστικής ή στιγμιαίας παραμόρφωσης (incremental or instantaneous strain or deformation)** και των παραμέτρων που τη διέπουν.
- Μελετώντας δύο κοντινά στιγμιότυπα της παραμόρφωσης μπορούμε να προσδιορίσουμε το μέγεθος και τον προσανατολισμό του ελλειψοειδούς που αντιστοιχεί σε αυτό το διάστημα (**incremental strain ellipsoid – επαυξητικό ελλειψοειδές διαστρωτικής παραμόρφωσης**). Όταν το διάστημα αυτό γίνει πολύ μικρό τότε μιλάμε για **απειροστική ή στιγμιαία παραμόρφωση (incremental or instantaneous strain or deformation)**, που δρα στιγμιαία κατά την εξέλιξη της παραμόρφωσης στο χρόνο.



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστροφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστροφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστροφική παραμόρφωση

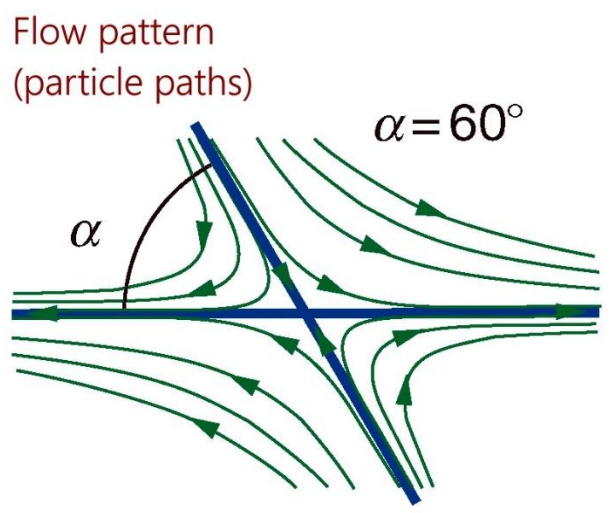
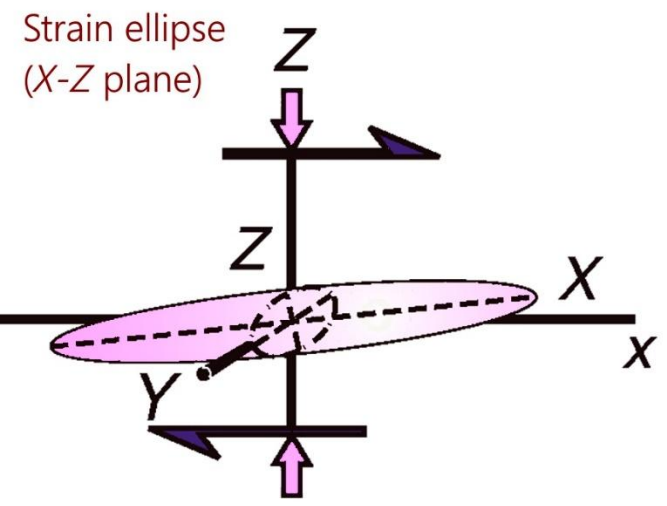
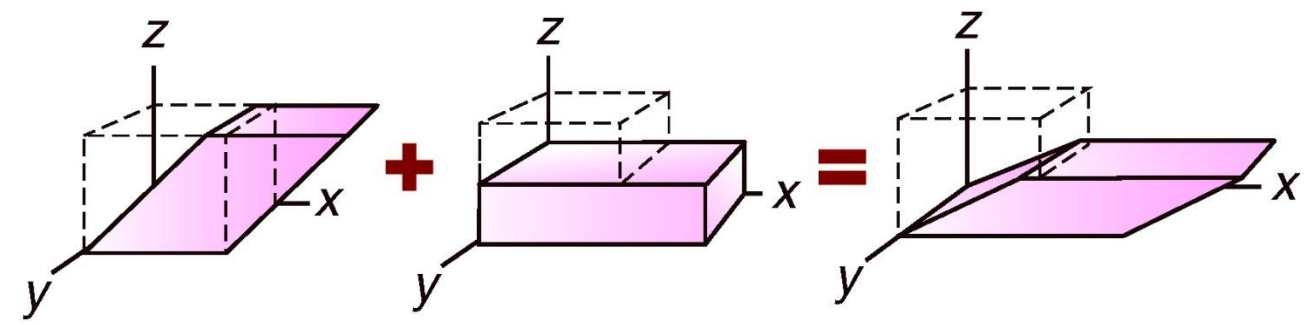
**Στιγμαία παραμόρφωση & παράμετροι ροής**

- Η προοδευτική διαστροφική παραμόρφωση (progressive strain) περιγράφεται με τις **παραμέτρους** της **απειροστικής ή στιγμιαίας διαστροφικής παραμόρφωσης (incremental or instantaneous strain parameters)**, που χαρακτηρίζουν μια στιγμή της διαστροφικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της παραμόρφωσης.
- Οι παράμετροι αυτές καλούνται και **παράμετροι (τεκτονικής) ροής (flow parameters)**.
- Θα αναφερθούν συνοπτικά στα επόμενα με παράδειγμα την υπο-απλή διάτμηση (sub-simple shear).

Instantaneous deformation parameters (flow parameters) Παράμετροι στιγμιαίας παραμόρφωσης (παράμετροι ροής)
Instantaneous stretching axes (ISA) Άξονες στιγμιαίας διάτασης (έκτασης)
Velocity field Πεδίο ταχυτήτων
Flow apophyses Αποφύσεις ροής
Vorticity & Kinematic vorticity number $W_k$ Στροβιλότητα & Αριθμός κινηματικής στροβιλότητας $W_k$
Steady-state/non-steady-state deformation Παραμόρφωση σταθερής/μη-σταθερής κατάστασης

*Sub-simple shear. Συνδυασμός simple και pure shear. Ελλειψοειδές παραμόρφωσης και πρότυπο ροής για δεξιόστροφη διάτμηση και δεδομένο ποσό διαστροφικής παραμόρφωσης.*

Simple shear + Pure shear = Sub-simple shear

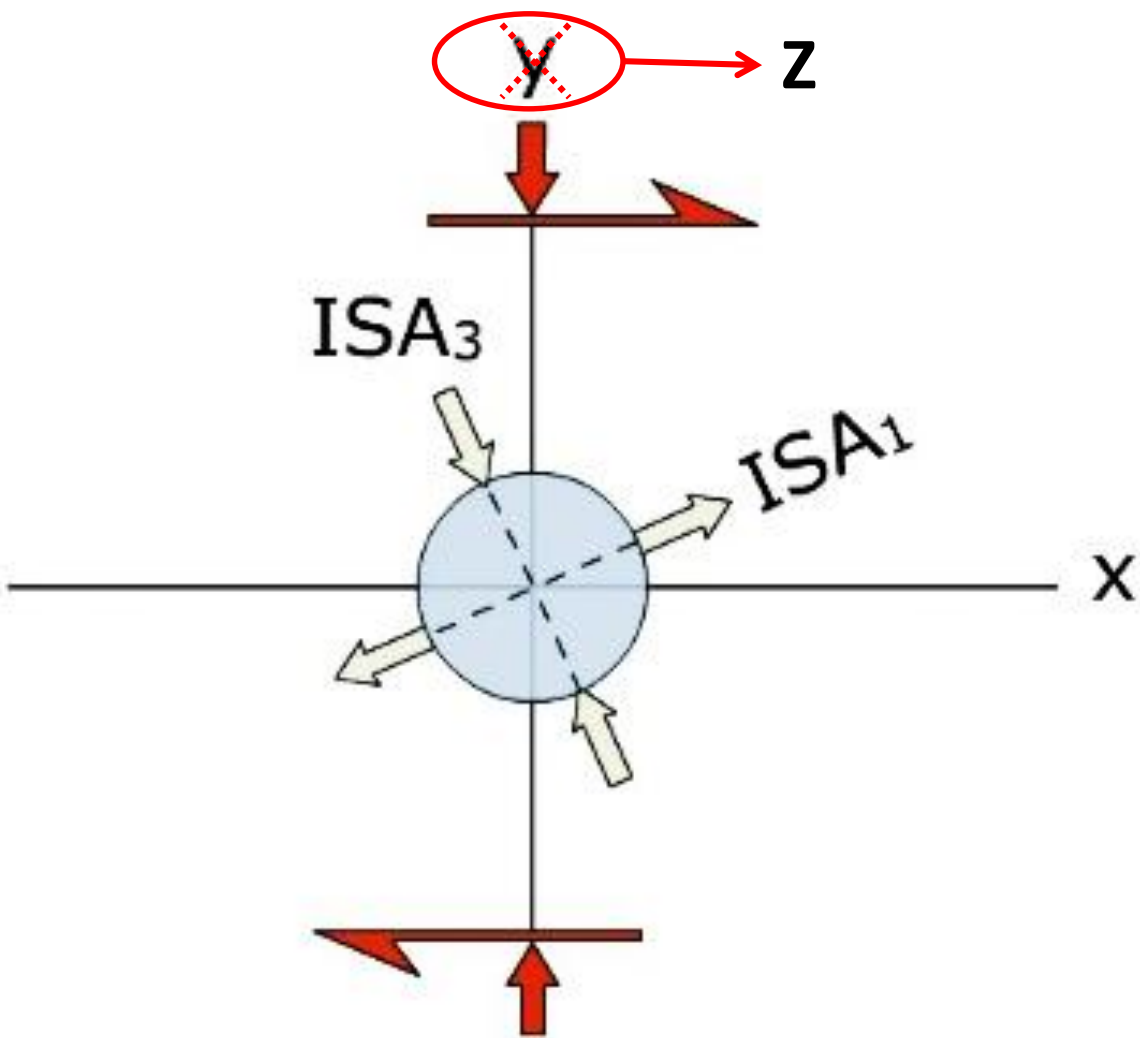
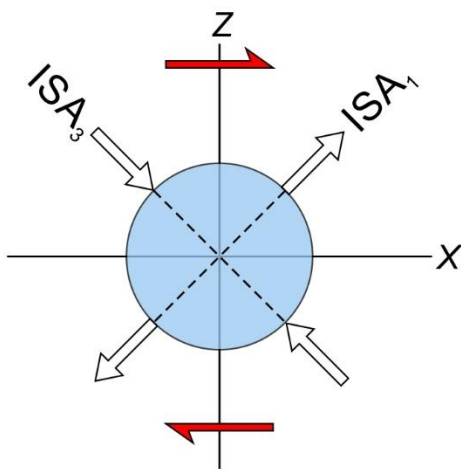
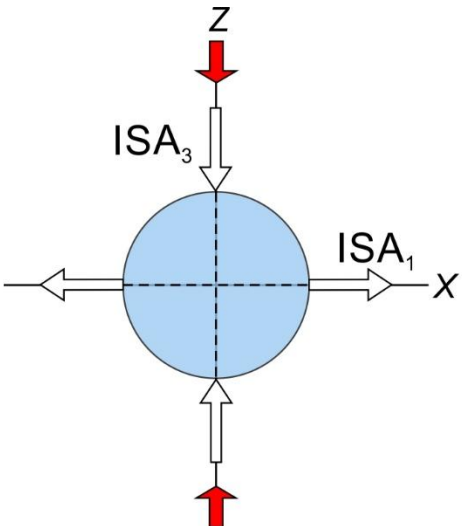


- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

**Άξονες στιγμιαίας διάτασης (έκτασης)**

- Οι **άξονες στιγμιαίας (ή απειροστικής) διάτασης** ή έκτασης, (**ISA – instantaneous or infinitesimal stretching axes**) είναι τρεις άξονες κάθετοι μεταξύ τους (**ISA<sub>1</sub>, ISA<sub>2</sub> & ISA<sub>3</sub>**). Για την επίπεδη ή διαξονική διαστρωφική παραμόρφωση οι άξονες αυτοί είναι δύο.
- Αντιστοιχούν στις διευθύνσεις της **μέγιστης, ελάχιστης και ενδιάμεσης διάτασης** (ή έκτασης) σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της ιστορίας της παραμόρφωσης.
- Αποκαλούνται έτσι αν και ο ελάχιστος άξονας διάτασης (ISA<sub>3</sub>) αντιστοιχεί στη διεύθυνση της μέγιστης βράχυνσης (ή **αρνητικής διάτασης**).
- Γραμμές **παράλληλες** στον μέγιστο άξονα (ISA<sub>1</sub>) **εκτείνονται ταχύτερα** απ' ό,τι οποιαδήποτε άλλη γραμμή άλλης διεύθυνσης. Αντίθετα γραμμές **παράλληλες** στον ελάχιστο άξονα (ISA<sub>3</sub>) **εκτείνονται βραδύτερα** (ή **βραχύνονται ταχύτερα**) απ' ό,τι οι άλλες γραμμές.

***Σημείωση:** Λέγοντας "εκτείνονται ταχύτερα ή βραδύτερα" αναφερόμαστε στον ρυθμό διαστρωφικής παραμόρφωσης (strain rate), δηλαδή στο ποσοστό της διαστρωφικής παραμόρφωσης (έκτασης ή βράχυνσης στην περίπτωση μας) που συσσωρεύεται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.*



Οι άξονες στιγμιαίας διάτασης (ISA) για την υπο-απλή διάτμηση (επάνω) σχηματίζουν γωνία με τους άξονες X & Z. Για την απλή διάτμηση (δίπλα) σχηματίζουν γωνίες 45°, ενώ στην καθαρή ταυτίζονται μαζί τους.

**ΚΟΥΪΖ (1):**  
Στο σχήμα υπάρχει ένα "λαθάκι". Κάντε "κλίκ" με το ποντίκι πάνω σε αυτό για να δείτε τη σωστή εκδοχή.



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

### Πεδίο ταχυτήτων

- Το **πεδίο ταχυτήτων (velocity field  $\mathbf{v}$ )** περιγράφει την **ταχύτητα** και την **φορά** της **κίνησης** των υλικών σωματιδίων σε μια δεδομένη χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της ιστορίας της παραμόρφωσης.

- Δίνεται από τον τύπο:

$$\mathbf{v} = \mathbf{L}\mathbf{x} + \mathbf{t}, \text{ όπου:}$$

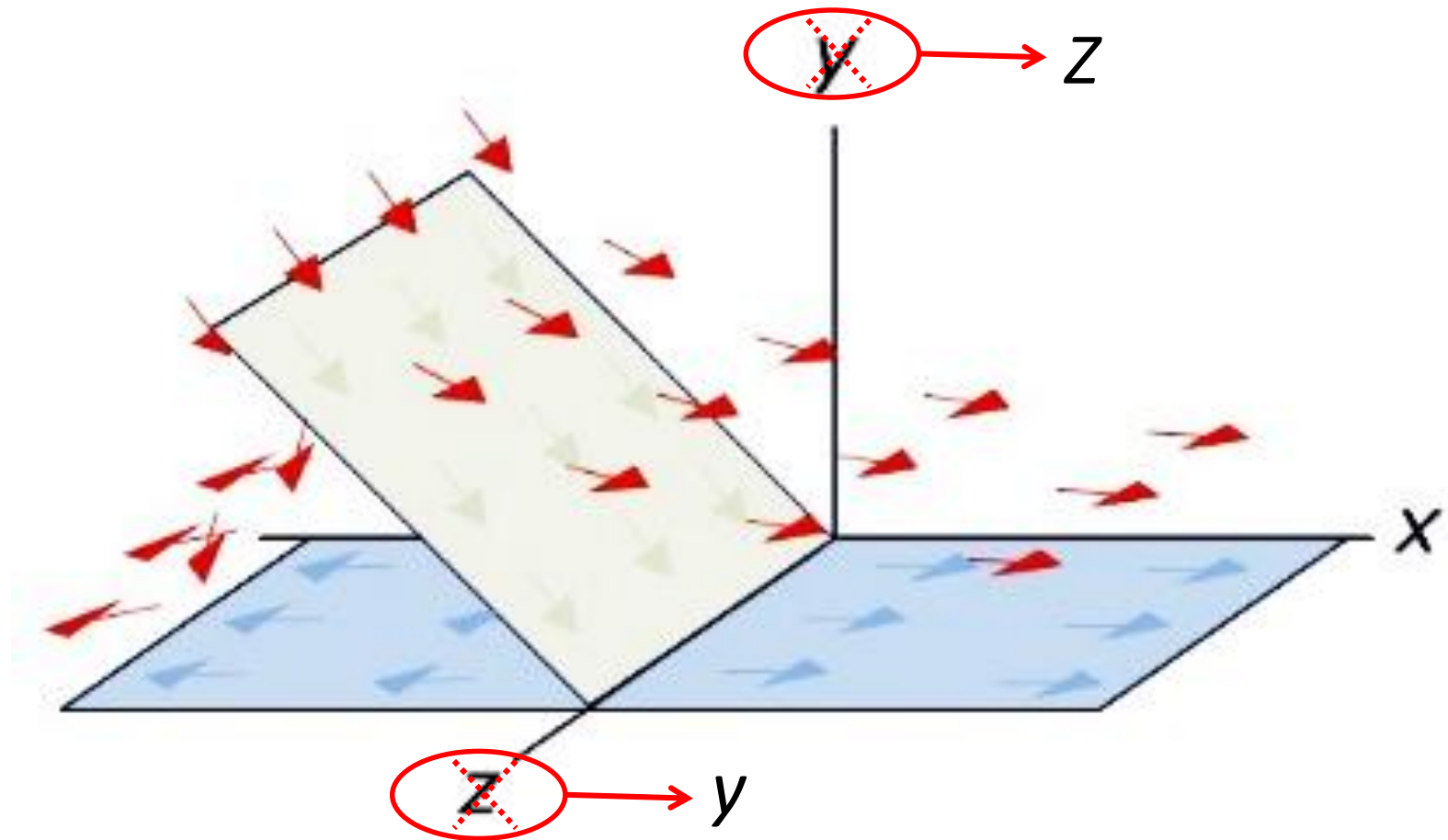
$\mathbf{L}$  ο τανυστής μεταβολής ταχυτήτων, που περιγράφει τις ταχύτητες των υλικών σωματιδίων μια δεδομένη χρονική στιγμή,

$\mathbf{x}$  περιγράφει τη θέση των υλικών σωματιδίων &

$\mathbf{t}$  προσδιορίζει την μετατόπιση των υλικών σωματιδίων.

Δεδομένου ότι το  $\mathbf{t}$  είναι απειροελάχιστο, θεωρούμε ότι  $\mathbf{t}=0$ . Άρα:

$$\mathbf{v} = \mathbf{L}\mathbf{x}$$



ΚΟΥΪΖ (2):

Εδώ υπάρχουν δύο "λαθάκια". Με δύο "κλίκ" με το ποντίκι πάνω στο σχήμα θα δείτε τις σωστές εκδοχές.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

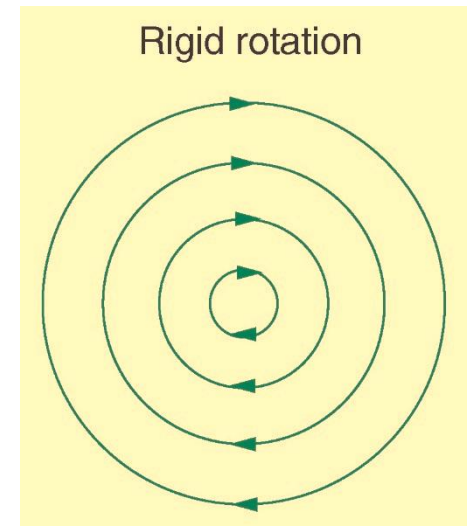
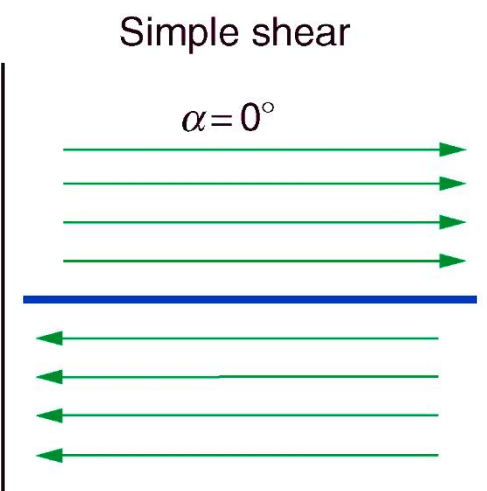
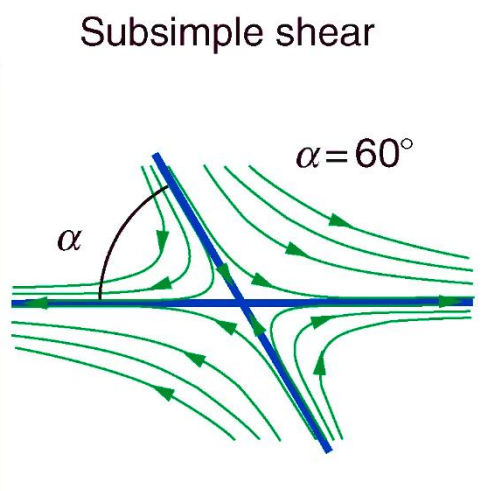
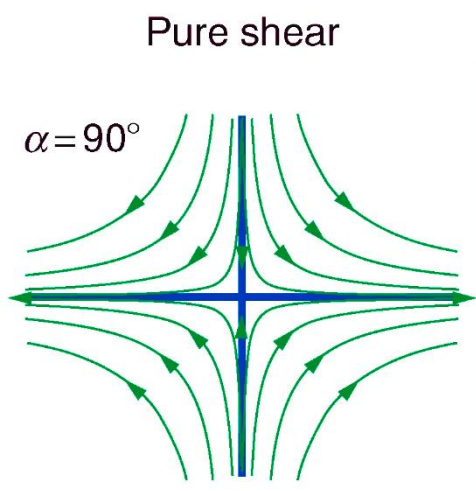
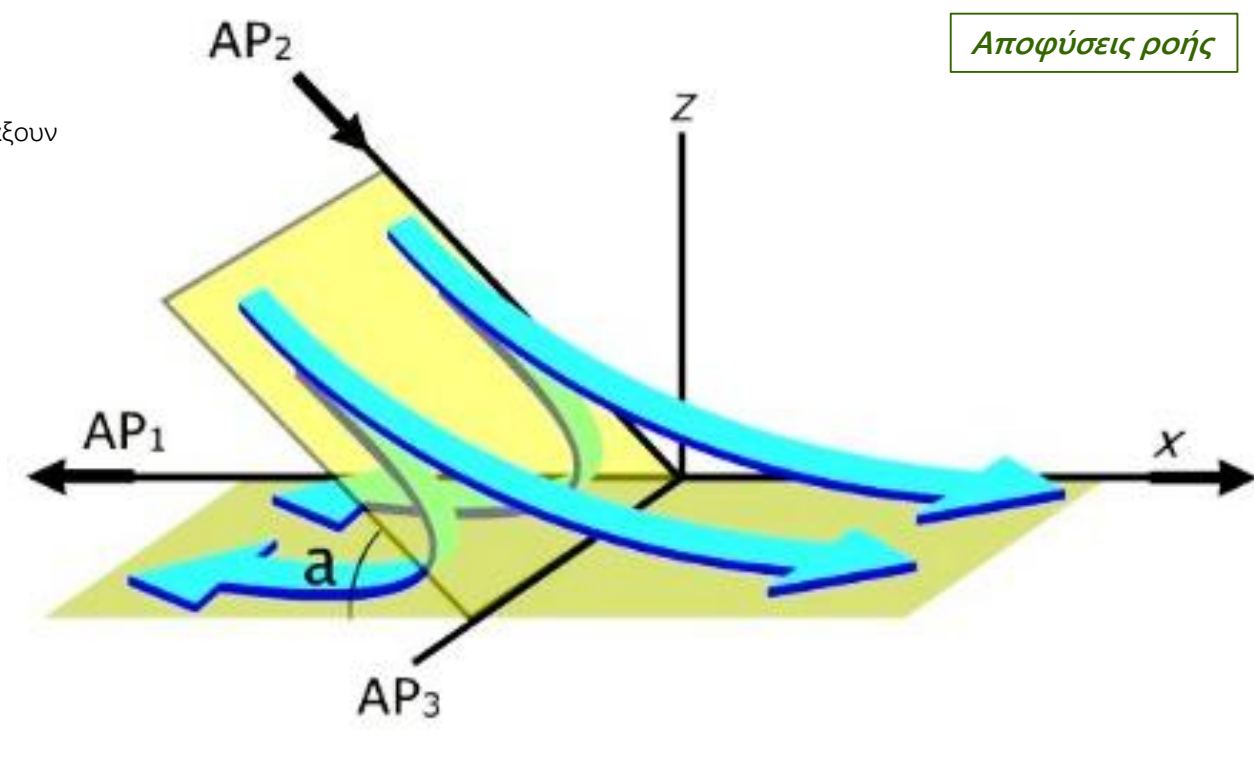
- Οι **αποφύσεις ροής (flow apophyses)** είναι θεωρητικά **επίπεδα** που χωρίζουν **τομείς με διαφορετικές τροχιές** υλικών σωματιδίων.
- Τα υλικά σωματίδια μπορούν να κινούνται πάνω και παράλληλα με τα επίπεδα αυτά, αλλά **δεν μπορούν να τα διασχίσουν**, εκτός και αν αλλάξουν οι συνθήκες κατά την διάρκεια της ιστορίας της παραμόρφωσης.
- Ο **μέγιστος αριθμός** αυτών των επιπέδων είναι **3** και για την επίπεδη παραμόρφωση **2**.

Σύμφωνα με τα πρότυπα ροής των υλικών σωματιδίων για την καθαρή, υπο-απλή και απλή διάτμηση, τα θεωρητικά επίπεδα των αποφύσεων ροής (μπλέ γραμμές) είναι αντίστοιχα: i) δύο επίπεδα κάθετα μεταξύ τους, ii) δύο πλάγια μεταξύ τους, που σχηματίζουν γωνία περίπου  $60^\circ$  και iii) ένα μόνο παράλληλο με τη ζώνη διάτμησης.

Η γωνία  $\alpha$  ανάμεσα στις δύο αποφύσεις κυμαίνεται από  $90^\circ$  στην καθαρή διάτμηση έως  $0^\circ$  στην απλή.

Στην περίπτωση της εξωτερικής περιστροφής (external or rigid rotation), οι τροχιές των υλικών σωματιδίων είναι τέλειοι κύκλοι.

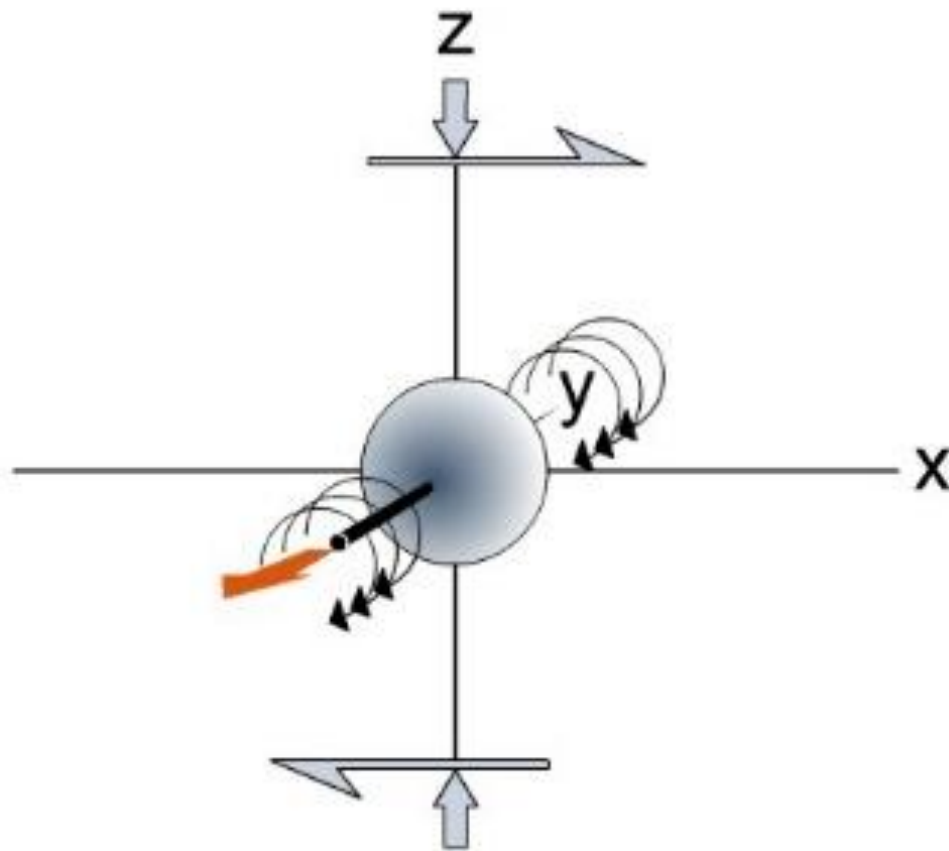
Η εξωτερική περιστροφή είναι απόλυτα κυκλική χωρίς διαστρωφική παραμόρφωση, ενώ η καθαρή διάτμηση είναι διαστρωφική παραμόρφωση χωρίς περιστροφή.





- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

### Στροβιλότητα



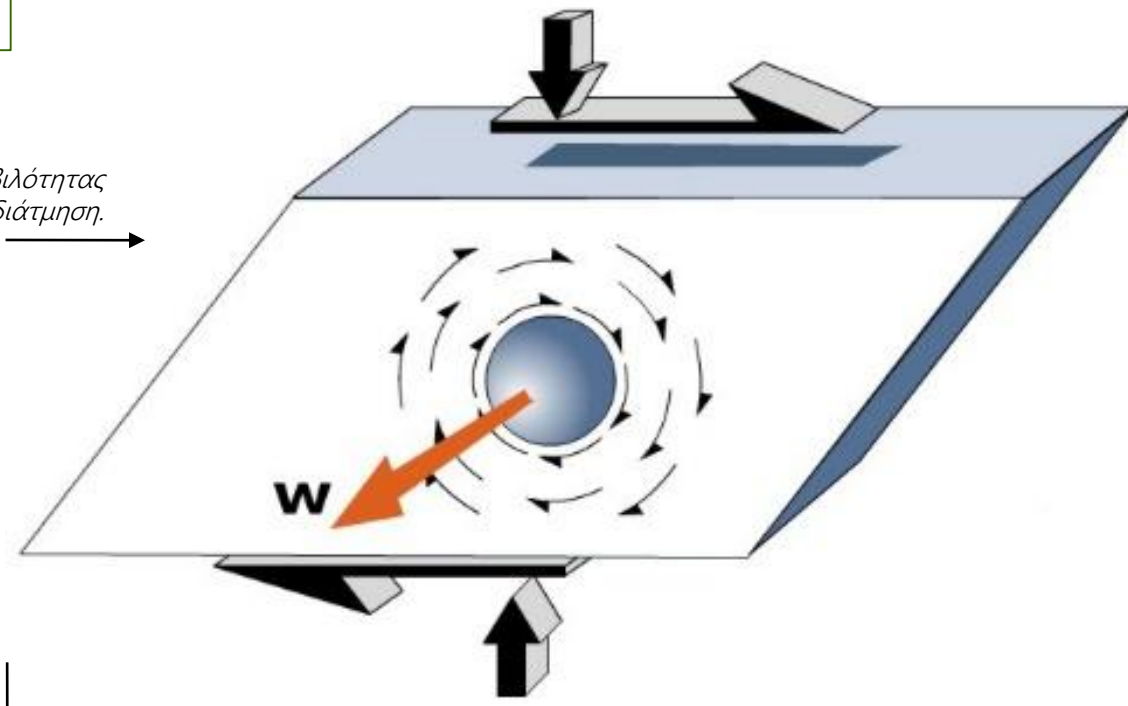
- Η **στροβιλότητα (vorticity)** είναι όρος γνωστός από την μετεωρολογία και την υδροδυναμική. Είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που ορίζει την **γωνιακή ταχύτητα** ή την **στροφορμή** των υλικών σωματιδίων του μέσου που μελετάμε (υγρό ή αέρα).
- Η **διεύθυνση** του ανύσματος της **στροβιλότητας** είναι **παράλληλη** με τον **άξονα** της δύνης, του **στροβίλου**.
- Για μια **δισδιάστατη ροή** στο επίπεδο **x-z**, το άνυσμα της **στροβιλότητας** είναι **παράλληλο** με τον -κάθετο στο επίπεδο- άξονα **y**.
- Ένα ανάλογο παράδειγμα για κατανόηση αποτελεί ένας **υδρόμυλος**, όπως φαίνεται στο πιο κάτω βίντεο.
- Το άνυσμα μπορεί να έχει **θετική** ή **αρνητική** τιμή και εξαρτάται από τη φορά περιστροφής του μύλου σε σχέση με το σύστημα αναφοράς.



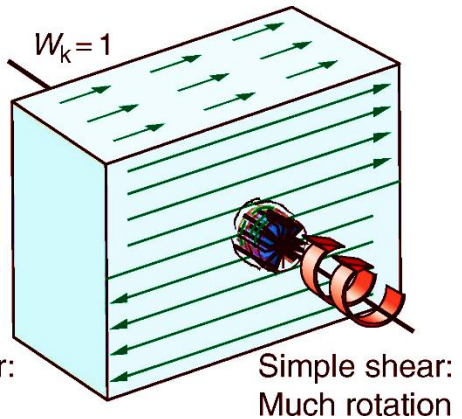
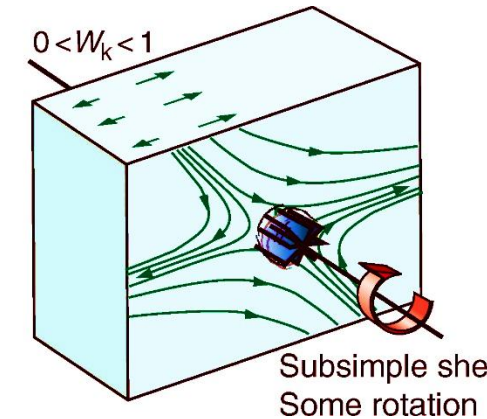
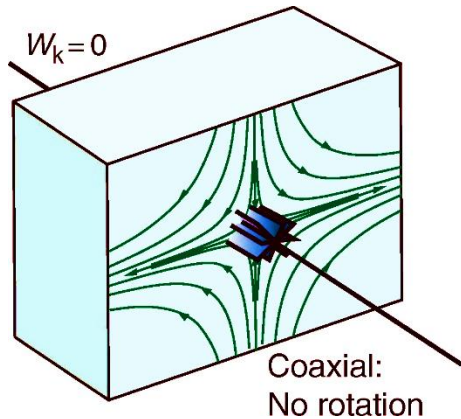
- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστροφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστροφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστροφική παραμόρφωση

**Στροβιλότητα και  $W_k$**

Το άνυσμα στροβιλότητας στην υπο-απλή διάτμηση.



Τα ανύσματα στροβιλότητας στην καθαρή, υπο-απλή και απλή διάτμηση. Στην καθαρή διάτμηση δεν υπάρχει περιστροφή ( $W_k = 0$ , ομοαξονική παραμόρφωση). Η περιστροφή αυξάνει όσο αυξάνει  $W_k$  όσο πάμε προς την απλή διάτμηση ( $W_k = 1$ ).



- Στην τεκτονική γεωλογία ο όρος **στροβιλότητα** είναι το **μέτρο** της **εσωτερικής περιστροφής** κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης. Το άνυσμα της στροβιλότητας δίνεται από το τύπο:

$w = 2\omega = \text{curl } v$ , όπου:

$w$  είναι το άνυσμα της γωνιακής ταχύτητας και  $v$  το πεδίο ταχυτήτων.

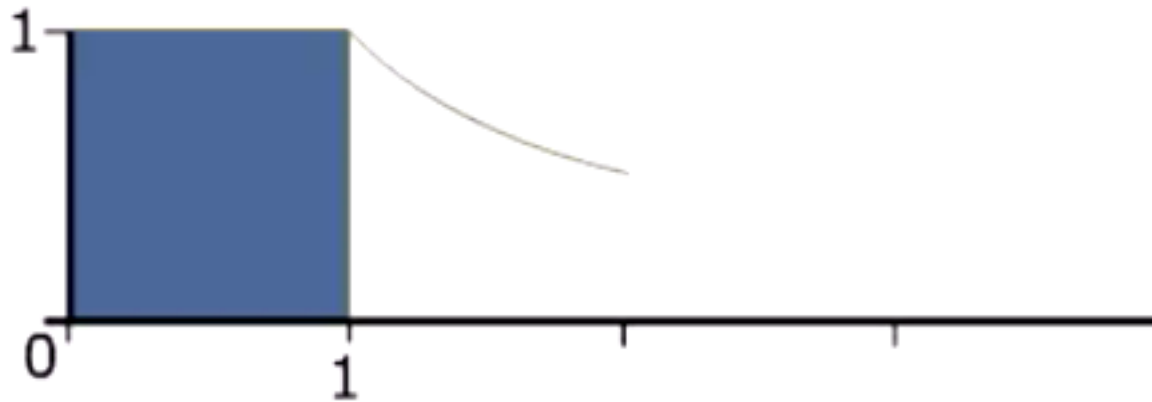
- Το **άνυσμα** της **στροβιλότητας** είναι πάντα **κάθετο** στην **φορά** της διάτμησης και **παράλληλο** στο **επίπεδο** της διάτμησης.
- Εσωτερική περιστροφή και στροβιλότητα έχουμε στις **μη-ομοαξονικές παραμορφώσεις** (όπως π.χ. η απλή διάτμηση).
- Η περιστροφή εξαρτάται από το ποσό της διαστροφικής παραμόρφωσης (**περισσότερη παραμόρφωση → περισσότερη περιστροφή**) και η σχέση αυτή δίνεται από τον **αριθμό κινηματικής στροβιλότητας  $W_k$**  (kinematic vorticity number). Από τους διάφορους τύπους που υπάρχουν για το  $W_k$ , δίνεται μόνο ο ακόλουθος:

$W_k = \varphi(\alpha)$ , όπου:

$\alpha$  είναι η οξεία γωνία ανάμεσα στα δύο επίπεδα των αποφύσεων ροής (α' είναι η αμβλεία).

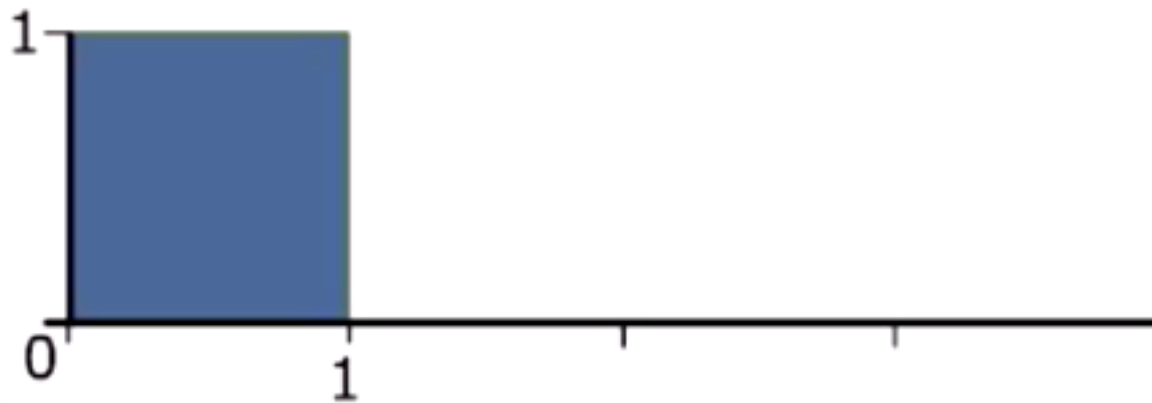
- Π.χ. στην υπο-απλή διάτμηση θα έχουμε μικρότερη περιστροφή, απ' ότι στην απλή, δεδομένου ότι το ποσό της διαστροφικής παραμόρφωσης είναι μικρότερο.
- Pure shear:  $W_k = 0$ , Simple shear:  $W_k = 1$ , Sub-simple shear:  $0 < W_k < 1$  & Rigid rotation:  $W_k = \infty$ .

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση



*Παραμόρφωση σταθερής και μη-σταθερής κατάστασης*

- Στην περίπτωση που το **πρότυπο ροής (flow pattern)** και οι **παράμετροι ροής (flow parameters)** παραμένουν **σταθεροί** κατά τη διάρκεια της ιστορίας της παραμόρφωσης, τότε λέμε ότι έχουμε **παραμόρφωση σταθερής κατάστασης (steady-state deformation)**, ή **ροή σταθερής κατάστασης (steady-state flow)**. Ωστόσο, ο ρυθμός παραμόρφωσης μπορεί να μεταβάλλεται.
- Αν από την άλλη μεριά οι άξονες **ISA** **περιστρέφονται**, ο αριθμός  **$W_k$**  **αλλάζει** τιμή και οι **τροχιές των υλικών σωματιδίων μεταβάλλονται** κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της παραμόρφωσης, τότε μιλάμε για **παραμόρφωση ή ροή μη-σταθερής κατάστασης (non-steady-state deformation or flow)**.



*Παραμόρφωση μη-σταθερής κατάστασης σε δύο κιβώτια στα οποία ασκούνται πανομοιότυπα ποσά απλής και καθαρής διάτμησης, αλλά με αντίθετη φορά. Επισημαίνεται η διαφορά στις τελικές (πεπερασμένες) διαστρωφικές παραμορφώσεις (finite strains).*

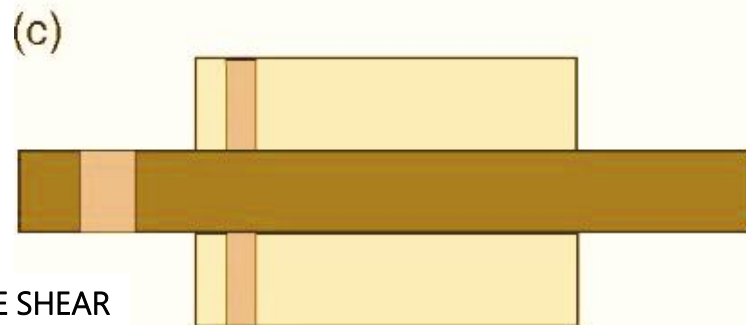
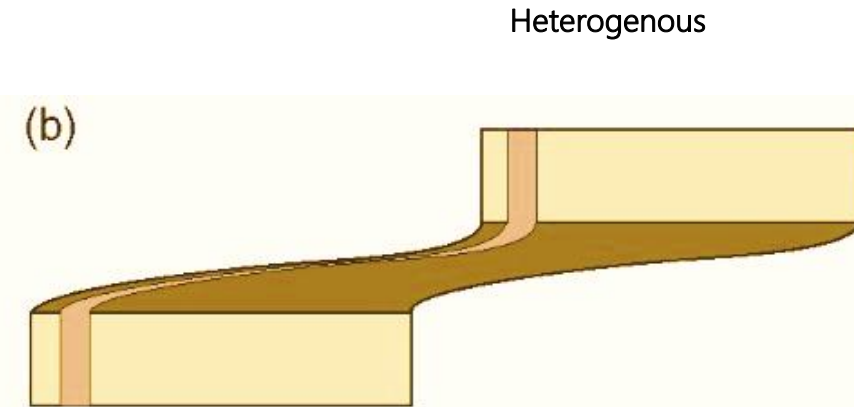
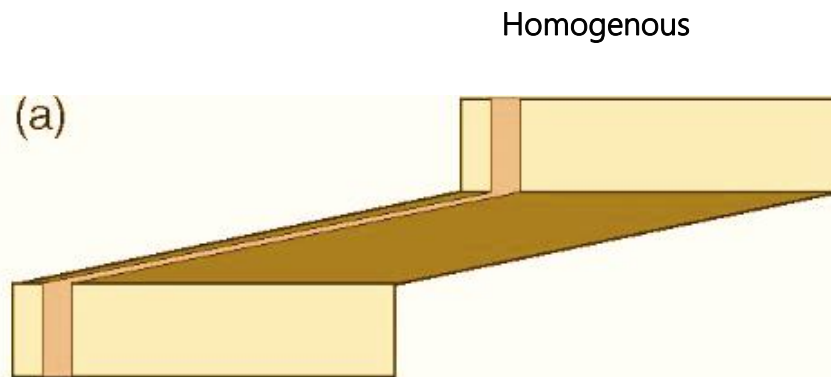




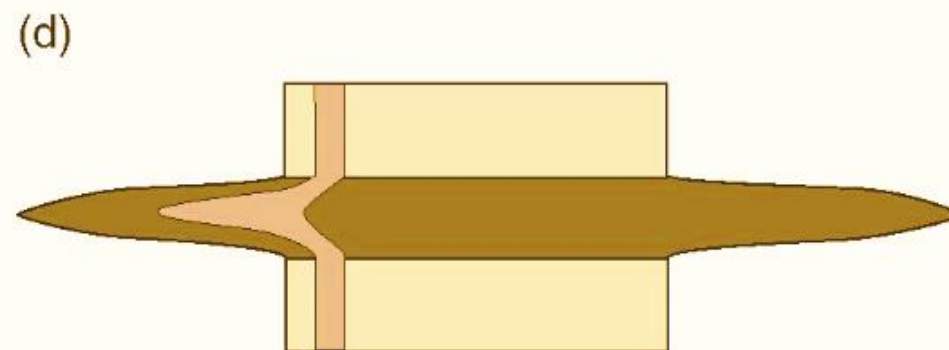
- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστροφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστροφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστροφική παραμόρφωση

*Προβλήματα συμβατότητας στη διαστροφική παραμόρφωση και συνθήκες περιθωρίων*

SIMPLE SHEAR



PURE SHEAR

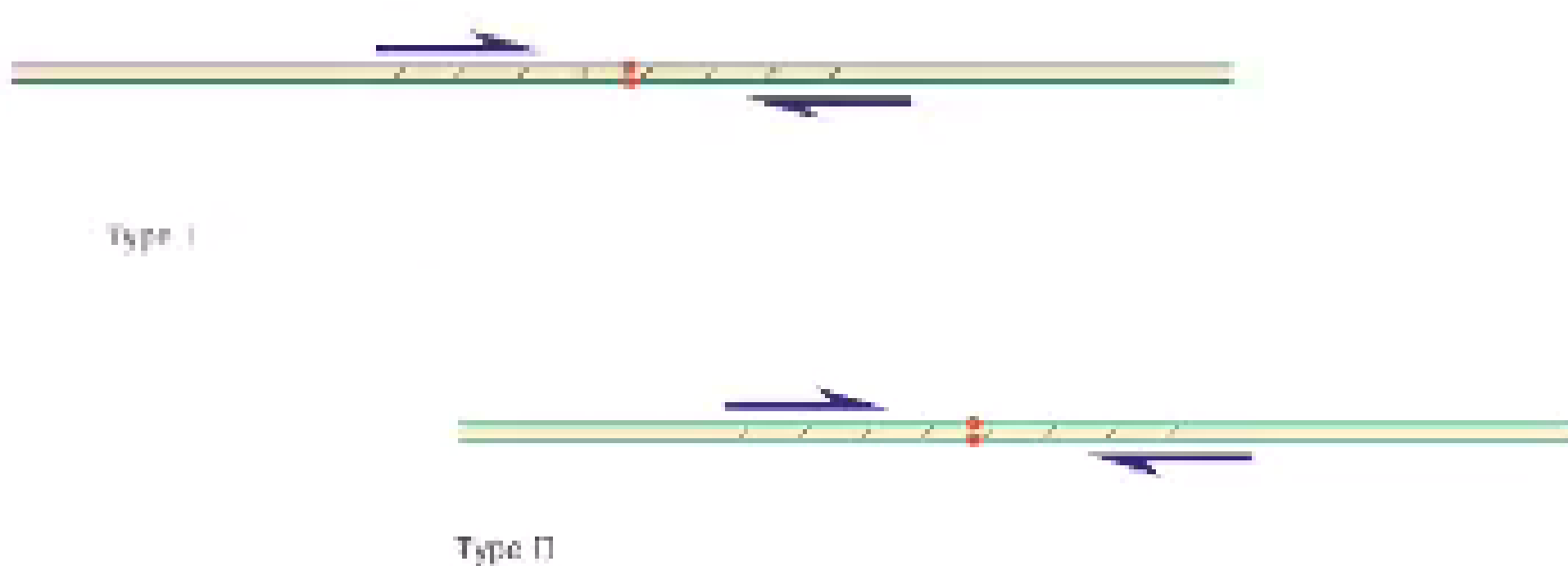


- Διακοπή της συνέχειας εγκάρσια στα όρια της ζώνης διάτμησης.
- Πρόβλημα συμβατότητας της διαστροφικής παραμόρφωσης ανάμεσα στη ζώνη διάτμησης και τα अपαραμόρφωτα τοιχώματα. →
- Ερμηνεία με ύπαρξη ασυνέχειας (ρήγμα, επιφάνεια ολίσθησης κλπ.). ΑΛΛΑ .... πρόβλημα χώρου?
- APA: Μια ζώνη διάτμησης με παράλληλα τοιχώματα δεν είναι συμβατή με τον μηχανισμό pure shear.
- ΟΜΩΣ ασυνέχειες και μη-παράλληλες ζώνες διάτμησης είναι συνήθεις στα παραμορφωμένα πετρώματα.



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση

*Παραμορφωμένα πετρώματα και ιστορία της παραμόρφωσης*

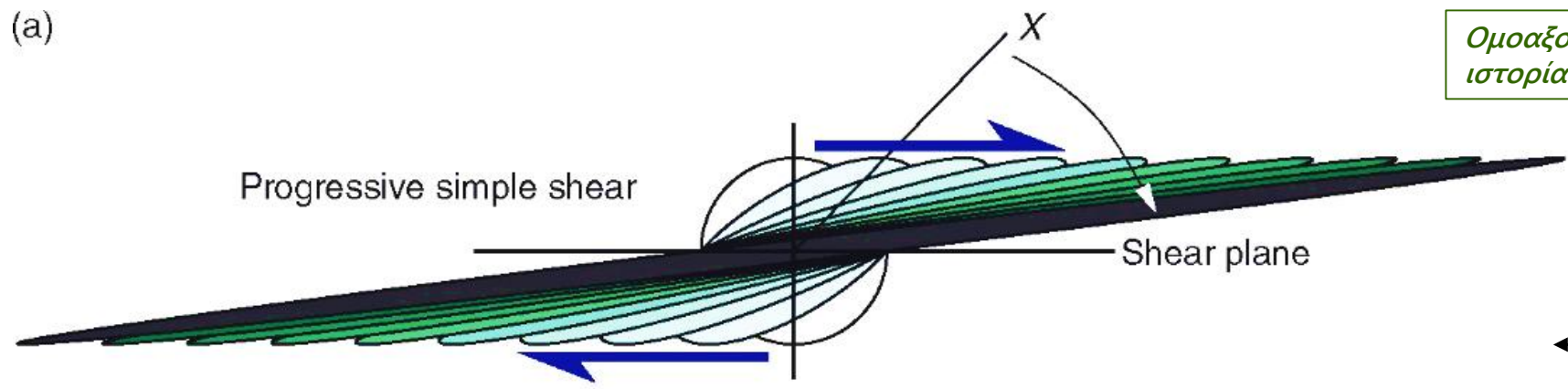


↑  
 Η εξέλιξη τύπου I και τύπου II ζωνών διάτμησης..

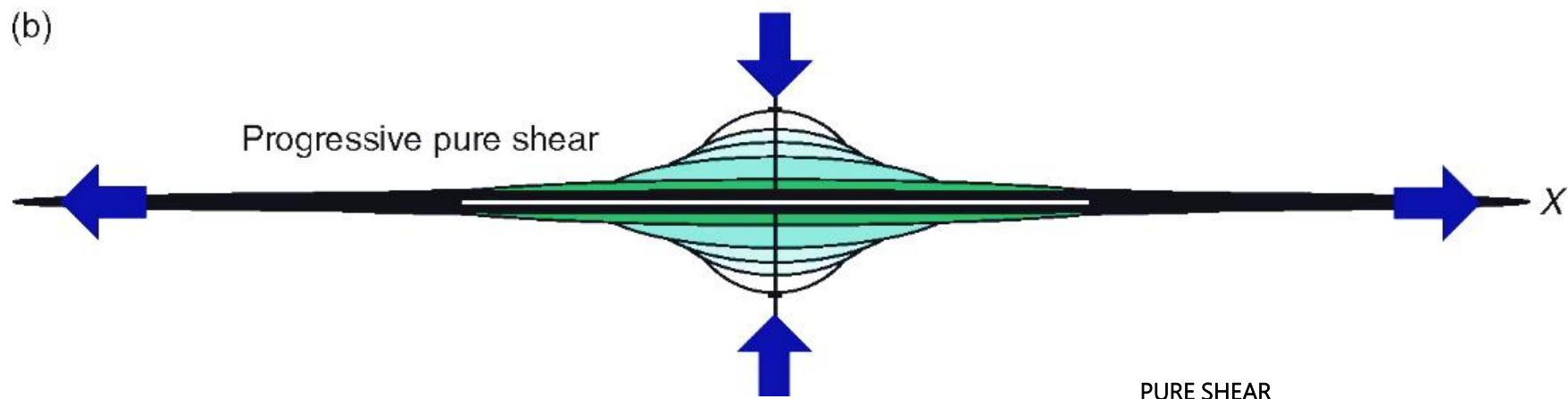
**Αναζητάμε δομές** που αναπτύσσονται στα **διάφορα στάδια** της ιστορίας της συνολικής παραμόρφωσης (total deformation). Π.χ. **μετατόπιση** της παραμόρφωσης μέσα στο παραμορφωμένο πέτρωμα. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ:

- Εξέλιξη ζωνών διάτμησης (2 περιπτώσεις).
- Γενιές **φλεβών** πληρωμένες με ινώδη ορυκτά (παράλληλα με τον ISA).
- Συσχετισμός παραμόρφωσης / μεταμόρφωσης.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση



Ομοαξονική και μη ομοαξονική ιστορία της παραμόρφωσης



← Η εξέλιξη της διαστρωτικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια προοδευτικής απλής (a) και καθαρής (b) διάτμησης.

**SIMPLE SHEAR**

- Διαφορετικός προσανατολισμός του ελλειψοειδούς διαστρ. παραμόρφωσης κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή οι κύριοι άξονες του ελλειψοειδούς X & Z περιστρέφονται.
- Ο μέγιστος άξονας X περιστρέφεται πάντα προς το επίπεδο διάτμησης, αλλά ποτέ δεν το διαπερνά.
- Ο όγκος (ή το εμβαδόν) διατηρούνται σταθερά.
- Οι άξονες ISA δεν περιστρέφονται.
- Γραμμές παράλληλες στους κύριους άξονες του ελλειψοειδούς και τους ISA περιστρέφονται.
- Αναφέρεται και ως περιστροφική ιστορία παραμόρφωσης.

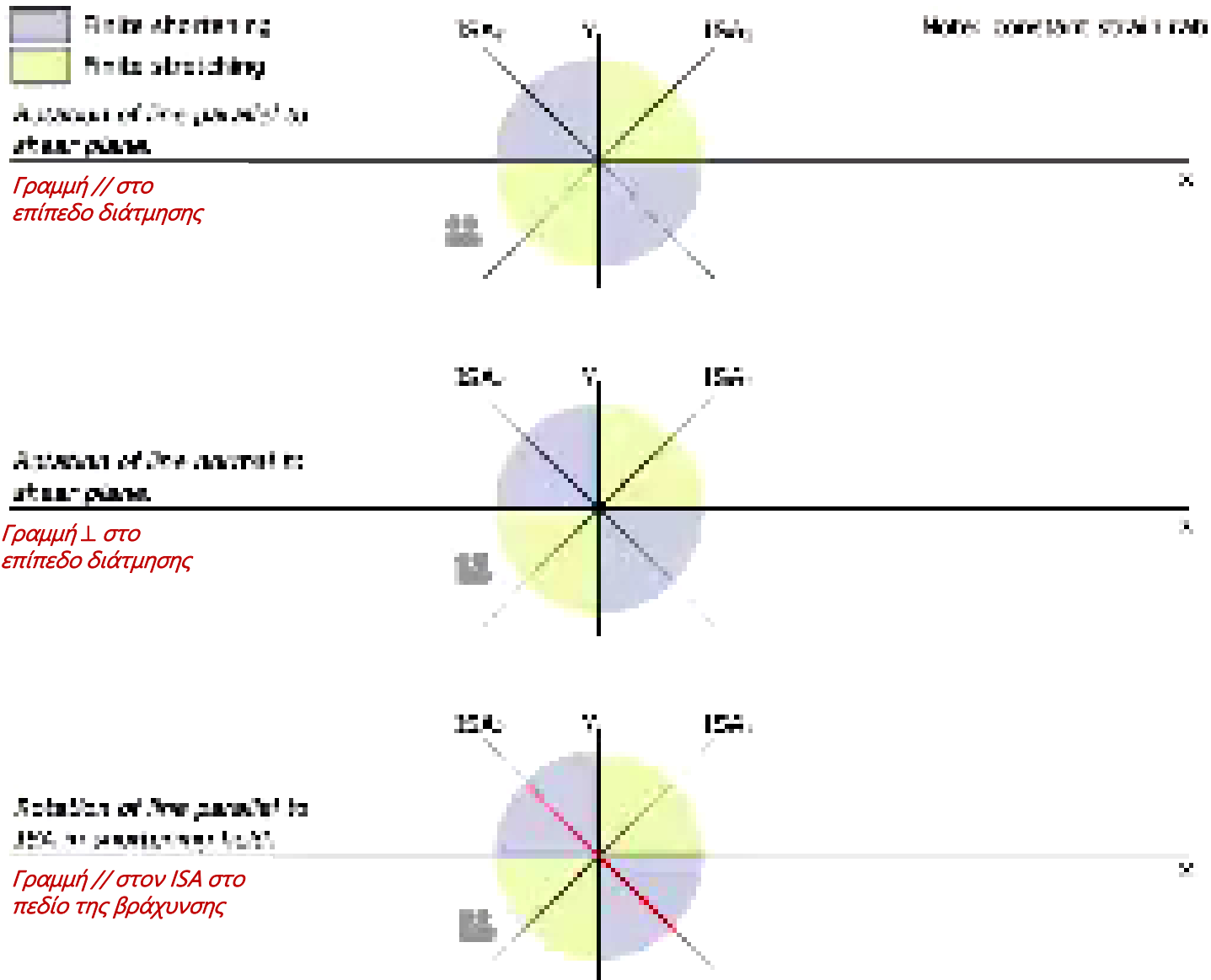
**PURE SHEAR**

- Οι κύριοι άξονες του ελλειψοειδούς διαστρ. παραμόρφωσης είναι παράλληλοι με τους ISA και δεν περιστρέφονται.
- Ο προσανατολισμός του ελλειψοειδούς διαστρ. παραμόρφωσης παραμένει σταθερός.
- Ο όγκος (3D) ή το εμβαδόν (2D) παραμένουν σταθερά.
- Γραμμές παράλληλες στους κύριους άξονες του ελλειψοειδούς και τους ISA δεν περιστρέφονται.
- Αναφέρεται και ως μη-περιστροφική ιστορία παραμόρφωσης.



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

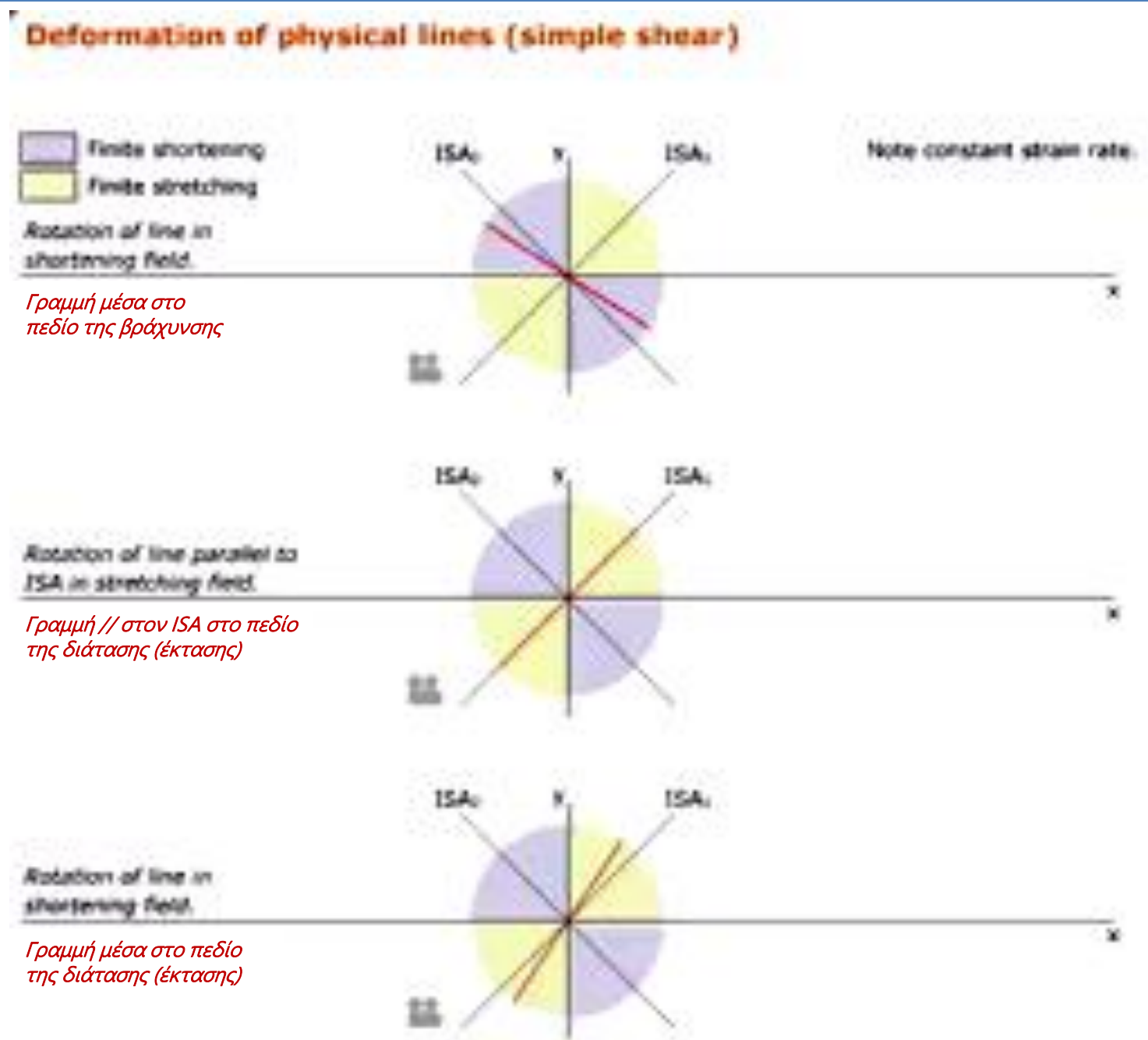
### Deformation of physical lines (simple shear)



Προοδευτική απλή διάτμηση και παραμόρφωση φυσικών (υλικών) γραμμών (physical lines)

- Γραμμές που προσανατολίζονται παράλληλα με το επίπεδο διάτμησης δεν περιστρέφονται και διατηρούν το αρχικό τους μέγεθος.
- Όλες οι άλλες γραμμές περιστρέφονται και μεταβάλλουν το μέγεθός τους.
- Δεξιόστροφη περιστροφή σύμφωνα με τους δείκτες του ωρολογίου και αριστερόστροφη αντίθετη με τους δείκτες.
- Αν το ποσό της παραμόρφωσης είναι αρκετά μεγάλο γραμμές μπορεί να περιστρέφονται από το πεδίο της ενεργού βράχυνσης στο πεδίο της ενεργού διάτασης (έκτασης).
- Ο ρυθμός παραμόρφωσης θεωρείται σταθερός.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

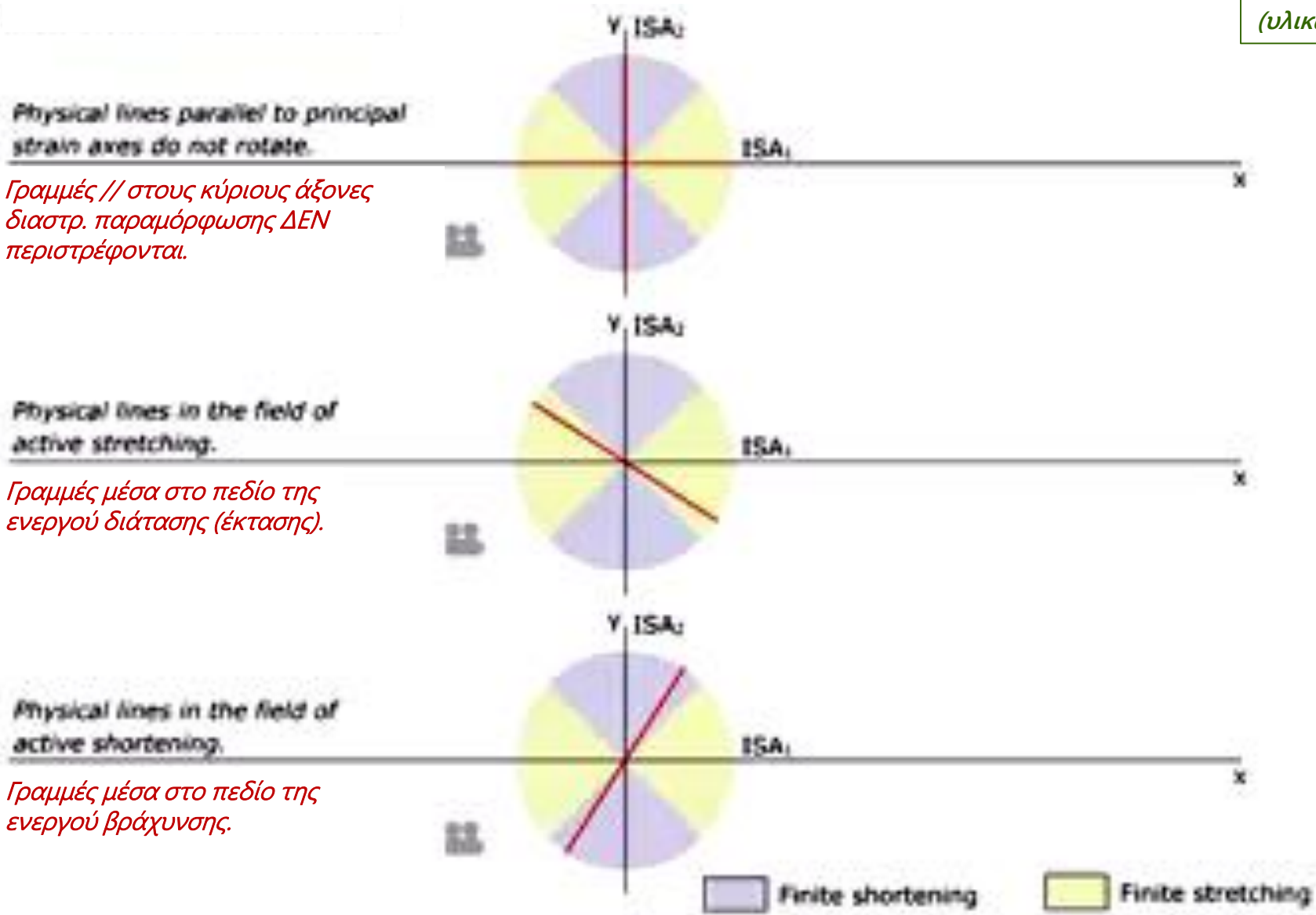


*Προοδευτική απλή διάτμηση και παραμόρφωση φυσικών (υλικών) γραμμών (physical lines)*

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

## Deformation of physical lines (pure shear)

Προοδευτική καθαρή διάτμηση και παραμόρφωση φυσικών (υλικών) γραμμών (physical lines)

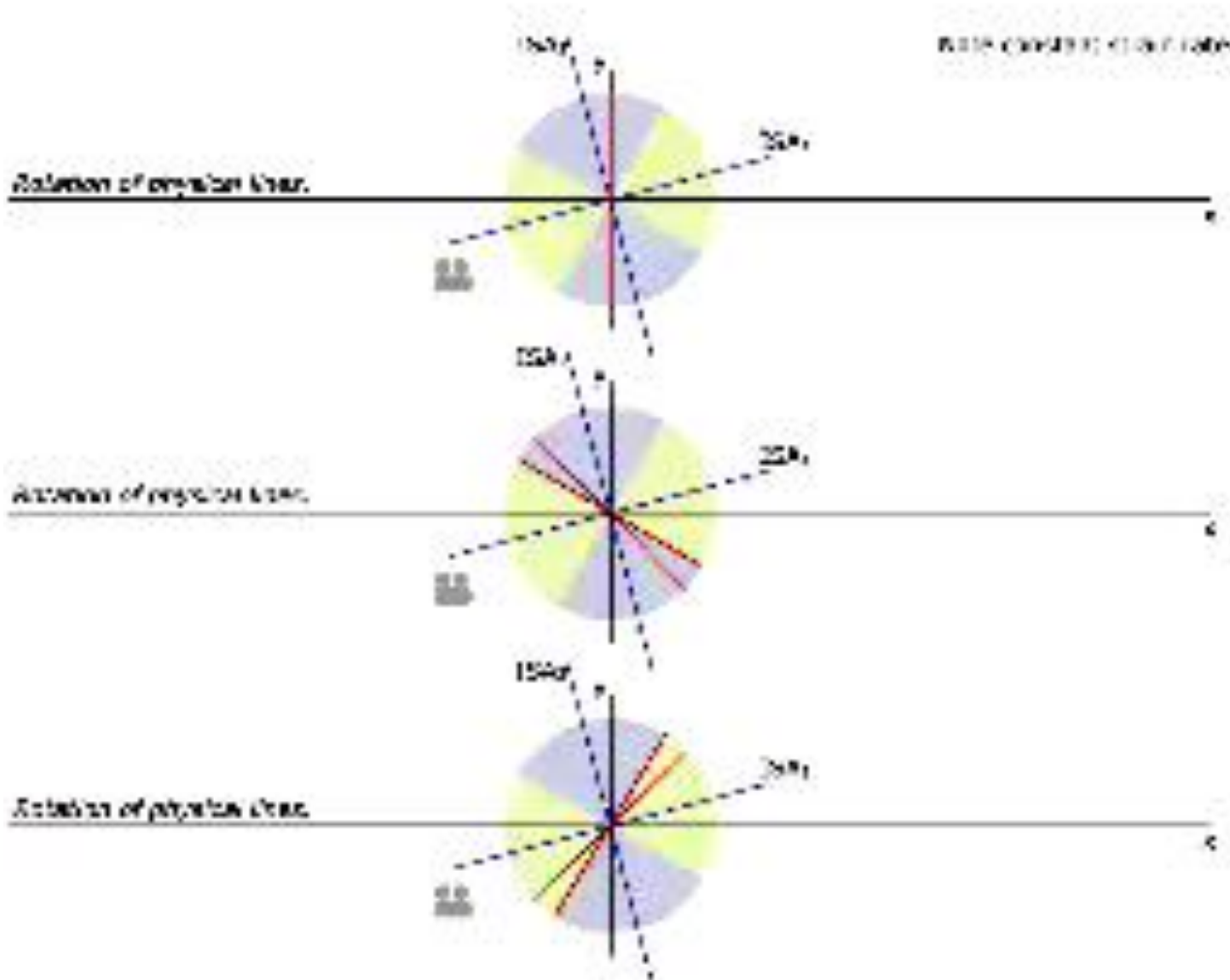


- Γραμμές που προσανατολίζονται παράλληλα με τους ISA δεν περιστρέφονται.
- Όλες οι άλλες γραμμές με διαφορετικό προσανατολισμό περιστρέφονται προς τον μέγιστο άξονα του ελλειψοειδούς, απομακρυνόμενες συμμετρικά από τον ISA<sub>2</sub>.
- Γραμμές μπορεί να περιστρέφονται από το πεδίο της ενεργού βράχυνσης στο πεδίο της ενεργού διάτασης (έκτασης), αλλά ποτέ το αντίθετο.
- Ο ρυθμός παραμόρφωσης θεωρείται σταθερός.



- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

### Deformation of physical lines (subsimpler shear)



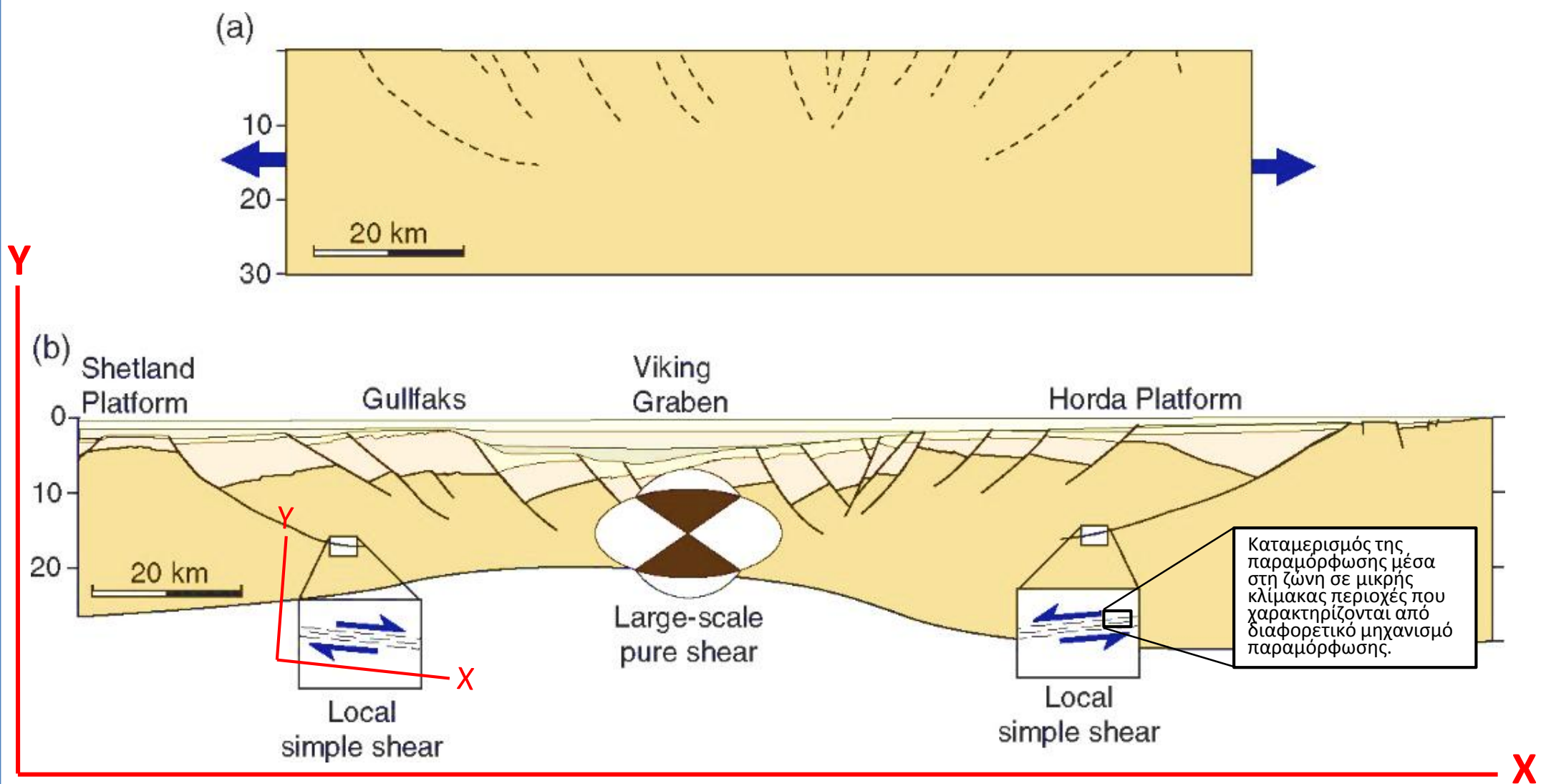
*Προοδευτική υπο-απλή διάτμηση και παραμόρφωση φυσικών (υλικών) γραμμών (physical lines)*

- Μη-ομοαξονική παραμόρφωση με διατήρηση του όγκου σταθερού.
- Αποτελεί συνδυασμό απλής και καθαρής διάτμησης.
- Οι κύριοι άξονες  $X$  και  $Z$  περιστρέφονται αλλά με πιο αργό ρυθμό σχετικά με την απλή διάτμηση.
- Ο προσανατολισμός των ISA εξαρτάται από το ποσοστό των συνιστωσών απλής και καθαρής διάτμησης.
- Όλες οι φυσικές γραμμές περιστρέφονται, εκτείνονται ή βραχύνονται κατά την παραμόρφωση.
- Μόνο γραμμές // στην ζώνη διάτμησης δεν περιστρέφονται.
- Γραμμές μπορεί να περιστρέφονται από το πεδίο της ενεργού βράχυνσης στο πεδίο της ενεργού διάτασης (έκτασης), αλλά ποτέ το αντίθετο.
- Ο ρυθμός παραμόρφωσης θεωρείται σταθερός.

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωτική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωτική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωτική παραμόρφωση

- Ο μηχανισμός απλής ή καθαρής διάτμησης είναι άμεσα εξαρτώμενος από την κλίμακα παρατήρησης.
- Επιλογή συστήματος αξόνων αναφοράς ανάλογα με την κλίμακα παρατήρησης.
- Καταμερισμός της παραμόρφωσης από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη κλίμακα παρατήρησης.

*Κλίμακα παρατήρησης και μηχανισμός απλής ή καθαρής διάτμησης*

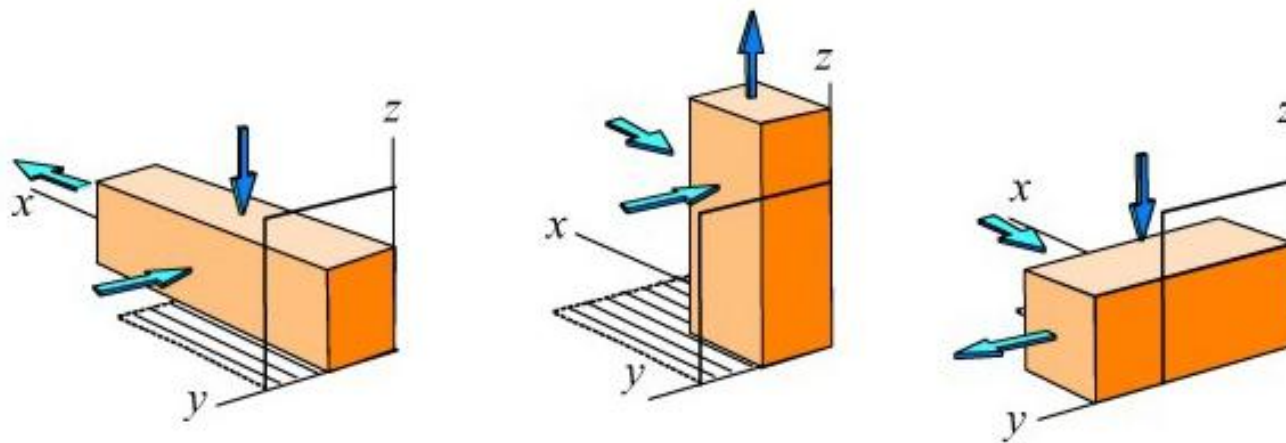


X

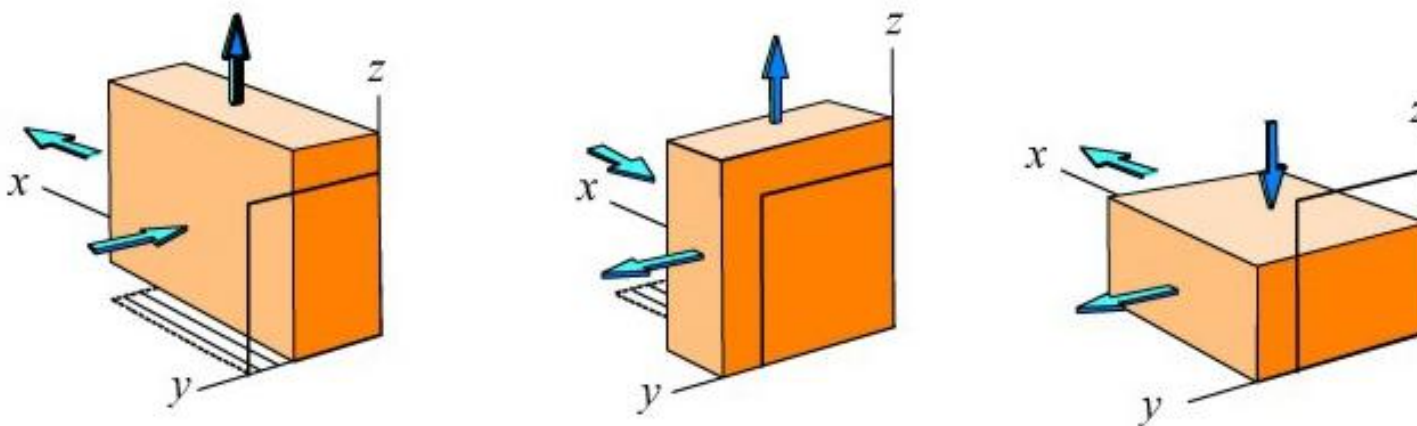
- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστροφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστροφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστροφική παραμόρφωση

3D διαστροφική παραμόρφωση

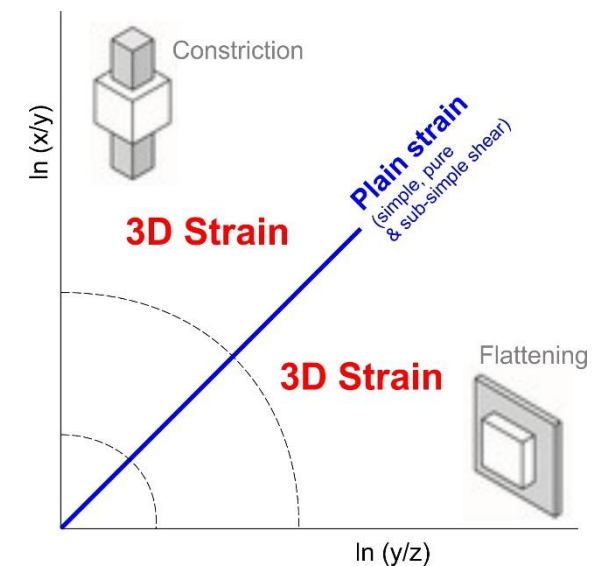
## Constriction (Σύσφιγξη)



## Flattening (Πλάτυνση)



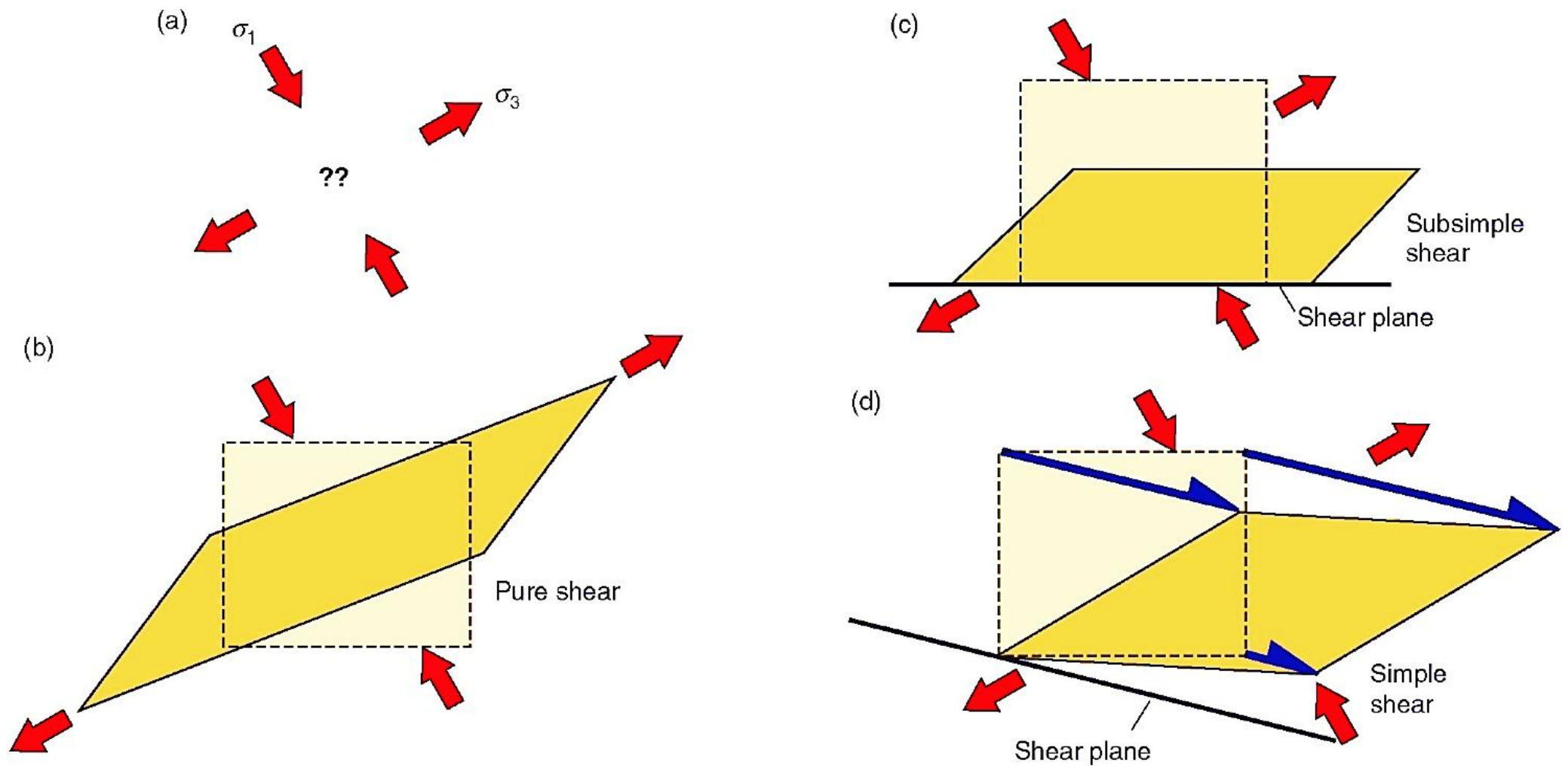
- Στη 3D διαστρ. παραμόρφωση **μεταβάλλονται και οι τρεις** κύριοι άξονες (X, Y, Z) του ελλειψοειδούς παραμόρφωσης.
- Άρα προβάλλονται **εκατέρωθεν της διαγωνίου** στο διάγραμμα Flinn.



- Συνιστούν **ομοαξονικές παραμορφώσεις** και **ακραία μέλη** της 3D παραμόρφωσης.
- Εισάγοντας και **συνιστώσα απλής διάτμησης** οδηγούμαστε στα πεδία παραμόρφωσης που χαρακτηρίζονται ως **διασυμπίεση (transpression)** ή **διεφελκυσμός (transtension)**.

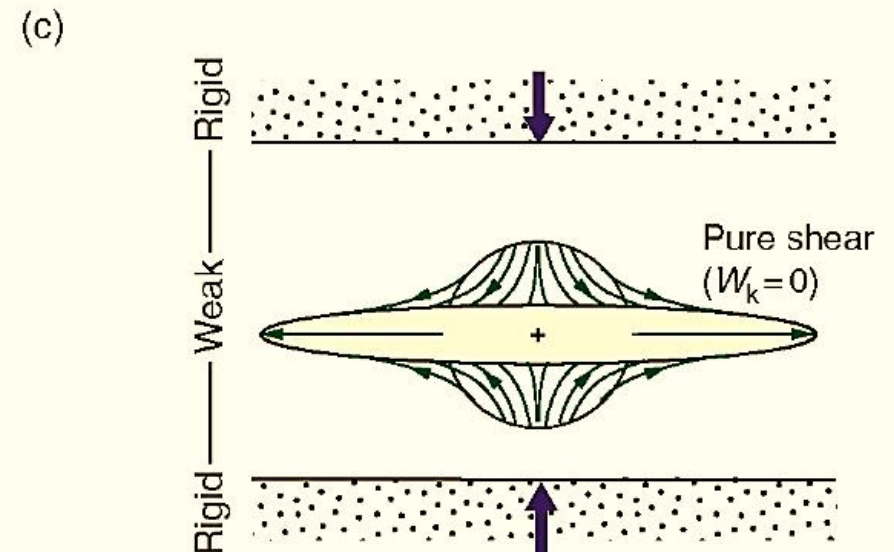
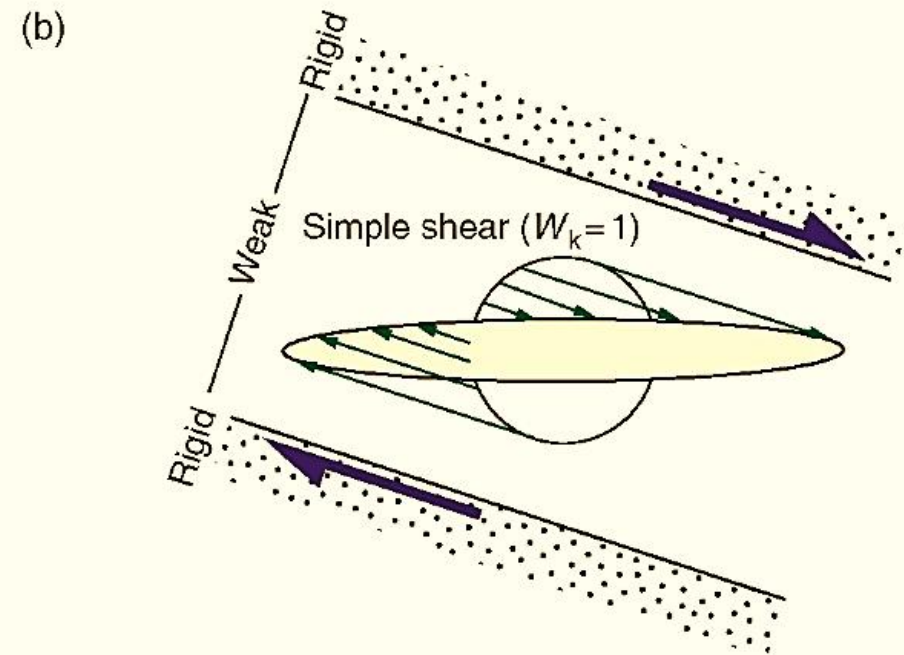
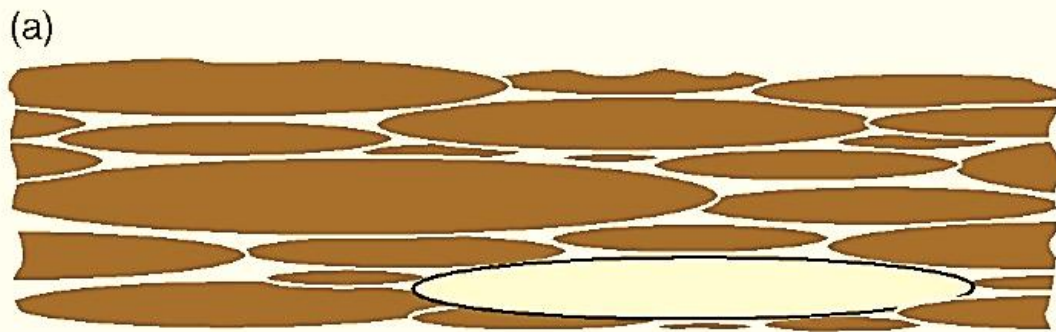


- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστροφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστροφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστροφική παραμόρφωση

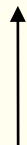


↑ Η γνώση του προσανατολισμού του πεδίου των τάσεων δεν οδηγεί απαραίτητα και στην πρόβλεψη της προκύπτουσας παραμόρφωσης. Σε ένα απόλυτα ισότροπο μέσο ο μηχανισμός θα είναι καθαρή διάτμηση (b). Αν υπάρχει μια ασθενής μηχανικά ζώνη (που θα λειτουργήσει σαν επίπεδο διάτμησης) ο μηχανισμός θα είναι υπο-απλή διάτμηση (c). Στην περίπτωση που το επίπεδο αυτό σχηματίζει γωνία 45° με τον  $\sigma_1$ , τότε ο μηχανισμός θα είναι απλή διάτμηση (d).

- Εισαγωγή
- Παραμόρφωση (Deformation). Ορισμός
- Συνιστώσες της παραμόρφωσης
- Μετάθεση (Translation)
- Περιστροφή (Rotation)
- Διαστρωφική παραμόρφωση (Strain)
- Ιστορία παραμόρφωσης
- Ομοιογενής & ανομοιογενής παραμόρφωση
- Η διαστρωφική παραμόρφωση στις τρεις διαστάσεις
- Βασικοί τύποι παραμόρφωσης
- Προοδευτική παραμόρφωση
- Πεδίο τάσεων VS διαστρωφική παραμόρφωση



Παραμορφωμένοι δείκτες, όπως π.χ. οι κροκάλες ενός μετακροκαλοπαγούς (a), δεν μας δίνουν απαραίτητα και την πληροφορία για το μηχανισμό παραμόρφωσης, που μπορεί να αντιπροσωπεύει απλή διάτμηση (b), καθαρή διάτμηση (c), ή οποιοδήποτε άλλο μηχανισμό. Επιπρόσθετες πληροφορίες, όπως τα περιθώρια της ζώνης διάτμησης ή η λιθολογική στρωμάτωση είναι απαραίτητες για την τελική ερμηνεία.





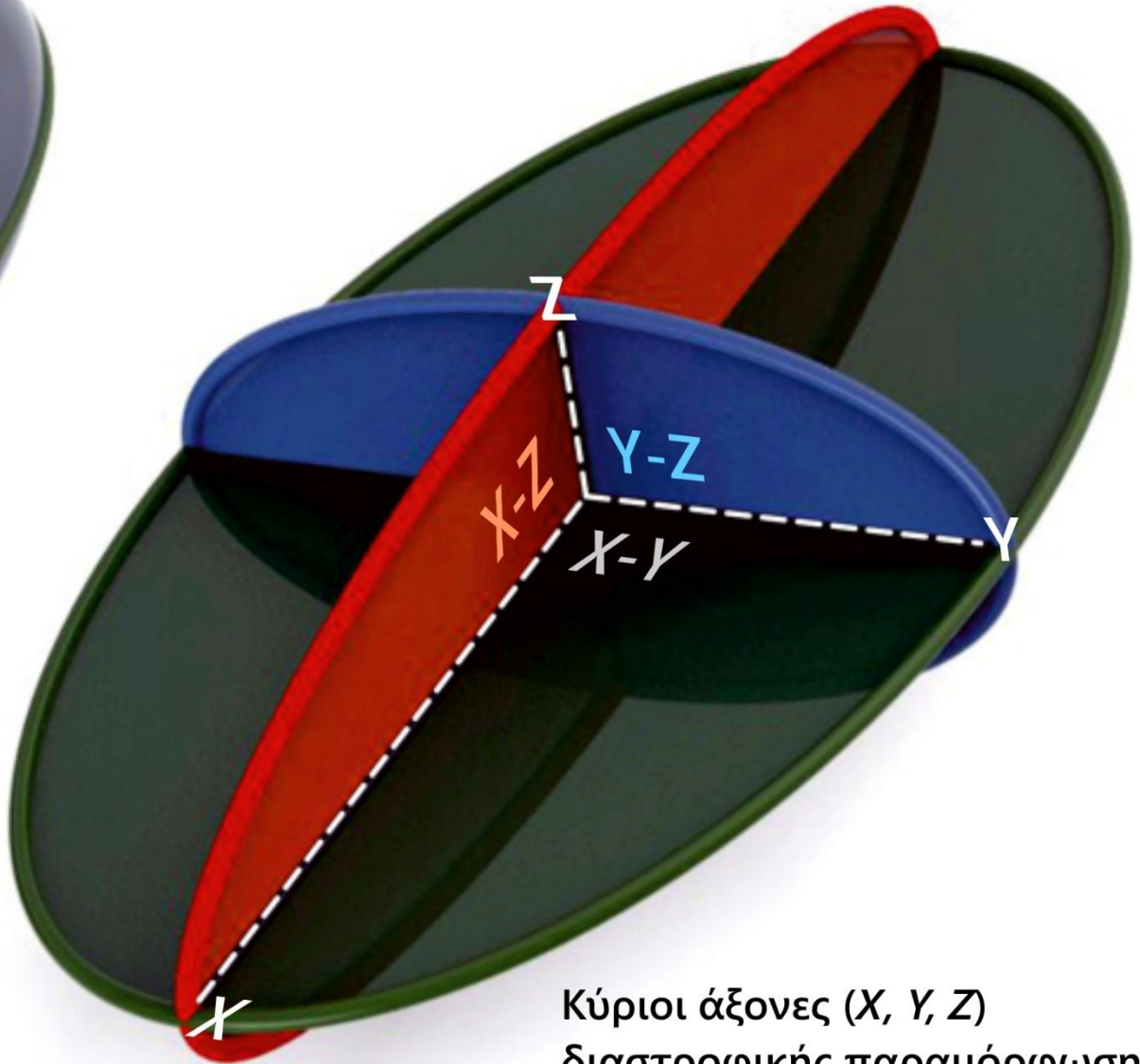
$$R_{XZ} = X/Z = (1+e_1)/(1+e_3)$$

$$R_{YZ} = Y/Z = (1+e_2)/(1+e_3)$$

$$R_{XY} = X/Y = (1+e_1)/(1+e_2)$$

Κύριες ελλείψεις ( $R_{XY}$ ,  $R_{XZ}$ ,  $R_{YZ}$ )  
διαστρωφικής παραμόρφωσης

Κύρια επίπεδα (XY, XZ, YZ)  
διαστρωφικής παραμόρφωσης

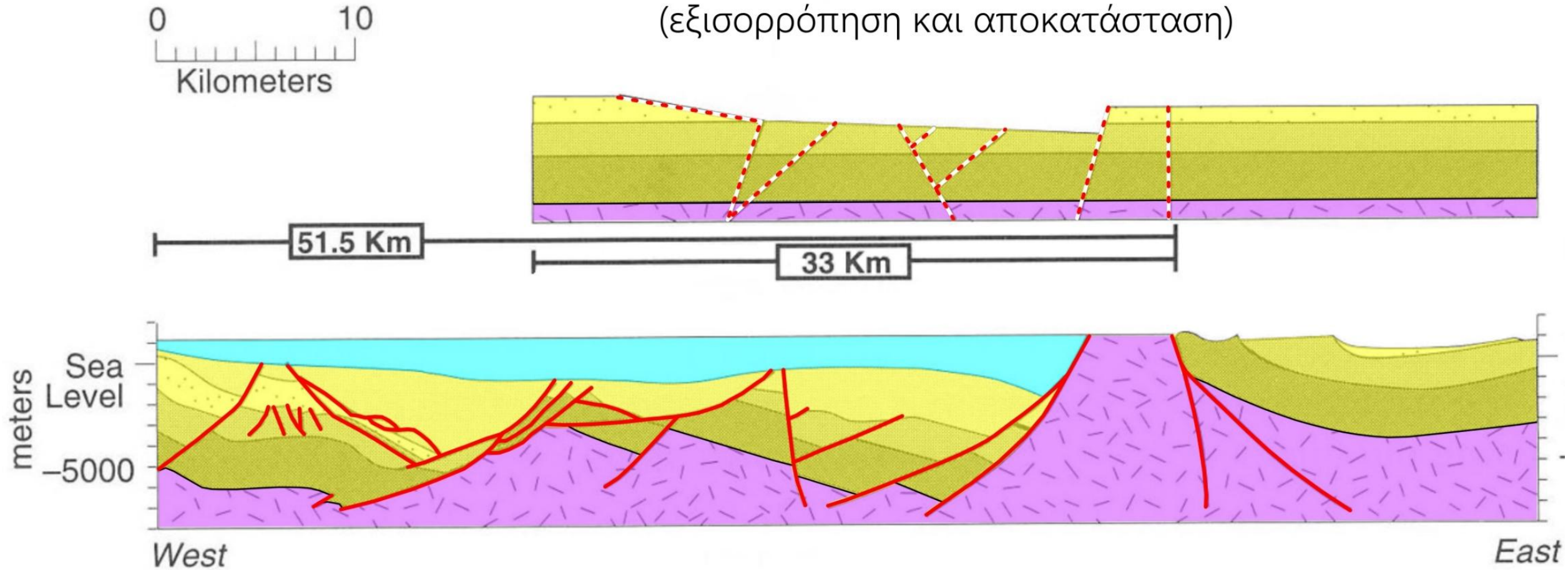


Κύριοι άξονες (X, Y, Z)  
διαστρωφικής παραμόρφωσης



# Test N<sub>0</sub> 1

## Balancing and restoration (εξισορρόπηση και αποκατάσταση)



Να υπολογισθούν η έκταση (extension)  $e$  και ο συντελεστής  $\beta$ .

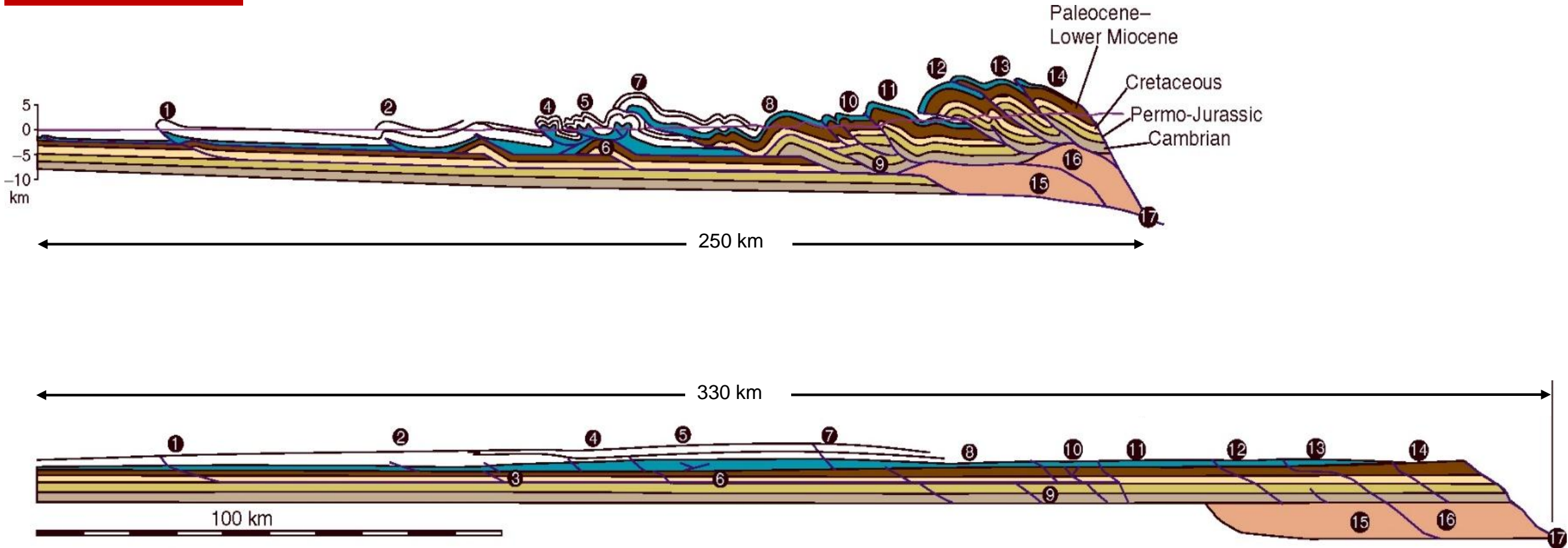
$$[e = (l - l_0) / l_0 \text{ \& } \beta = s = l / l_0 = 1 + e]$$



Test N<sub>0</sub> 2



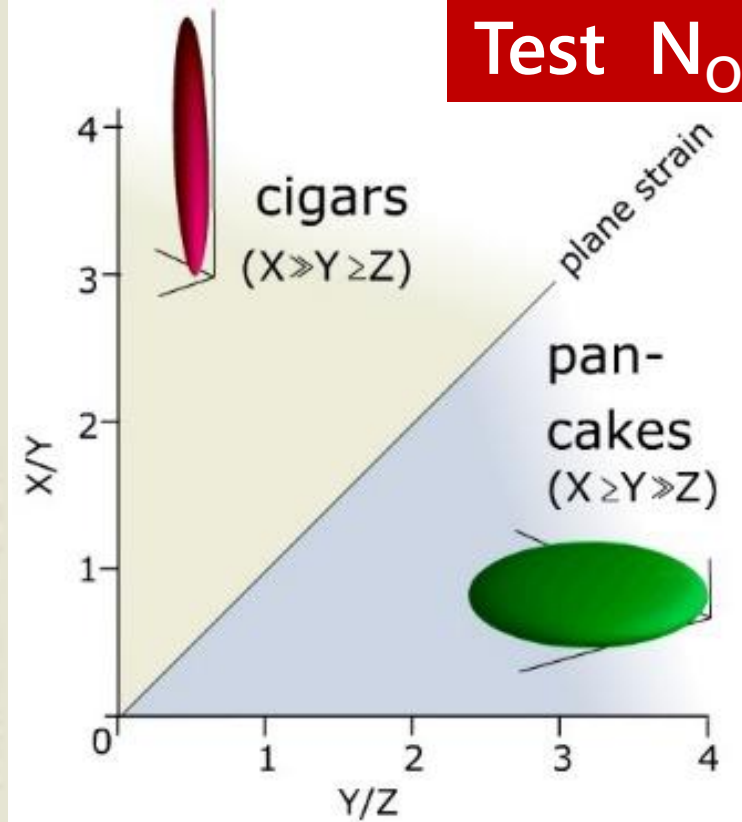
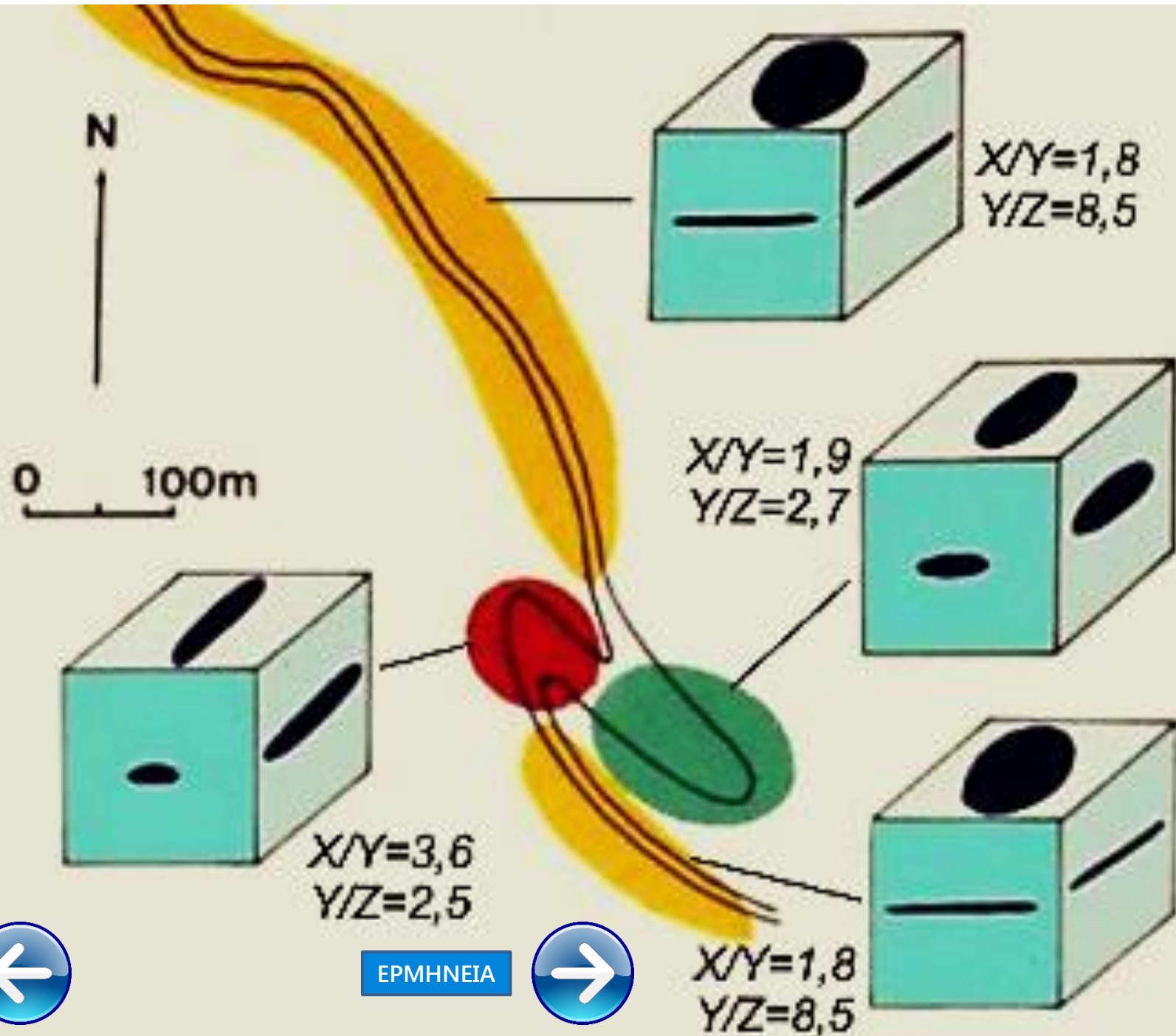
# Test N<sub>o</sub> 2



Να υπολογισθούν η μήκυνση (elongation)  $e$  και η διάταση (stretching)  $s$ .  
(contraction  $\rightarrow$  βράχυνση και shortening  $\rightarrow$  σύμπτυξη)

$$e = (l-l_0)/l_0 \quad \& \quad s = l/l_0 = 1+e$$





Με βάση τις ελλείψεις διαστροφικής παραμόρφωσης (σε τρεις κάθετες μεταξύ τους τομές) στα σκέλη και το κορυφαίο μιας ισοκλινούς πτυχής (και τους λόγους  $X/Y$  &  $Y/Z$ ) να προσδιορισθεί η θέση των προβολών των ελλειψοειδών παραμόρφωσης στο **διάγραμμα Flinn** και η παράμετρος  $\kappa = (R_{XY} - 1) / (R_{YZ} - 1)$



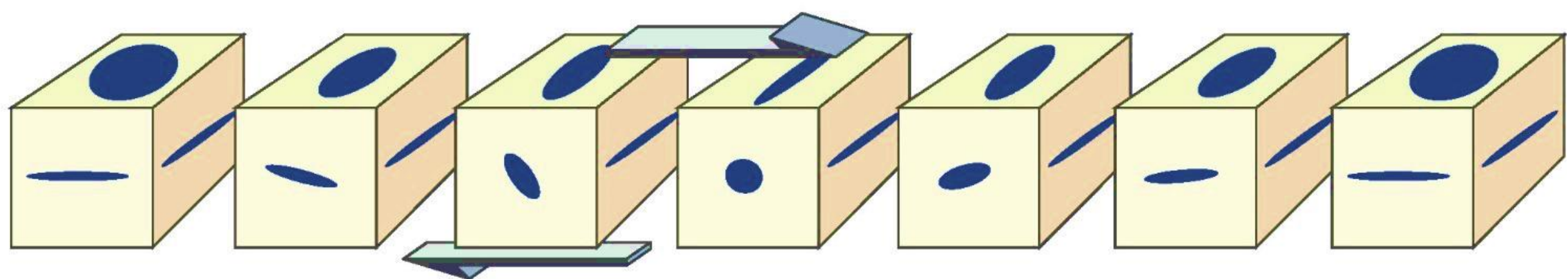
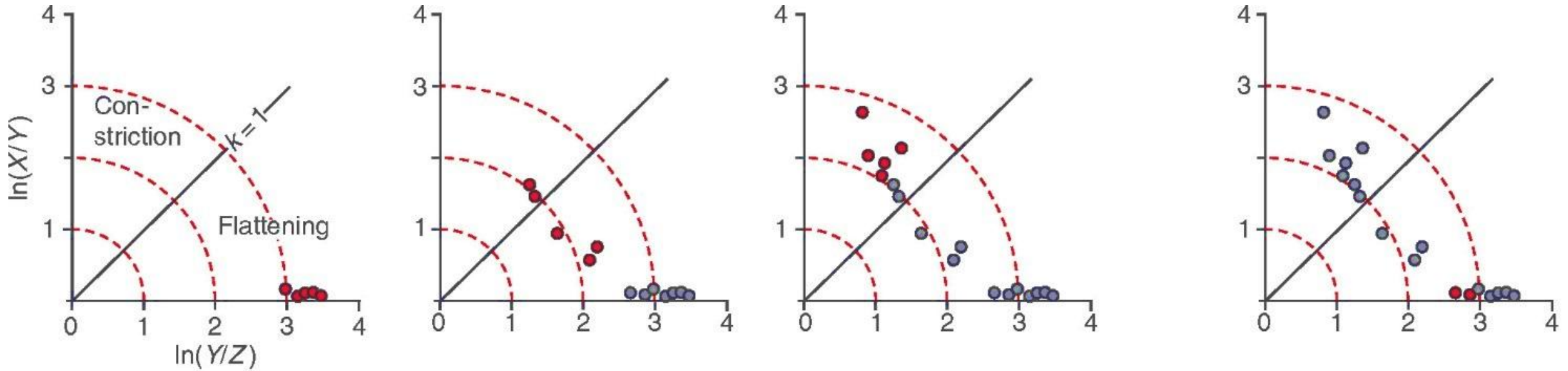
ΕΡΜΗΝΕΙΑ





# Test N<sub>0</sub> 3

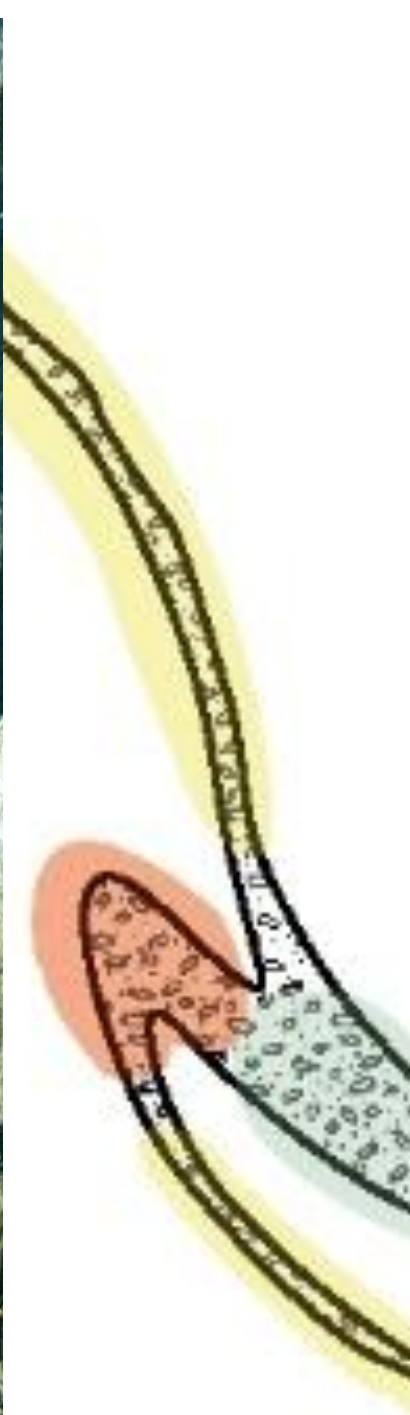
Ερμηνεία

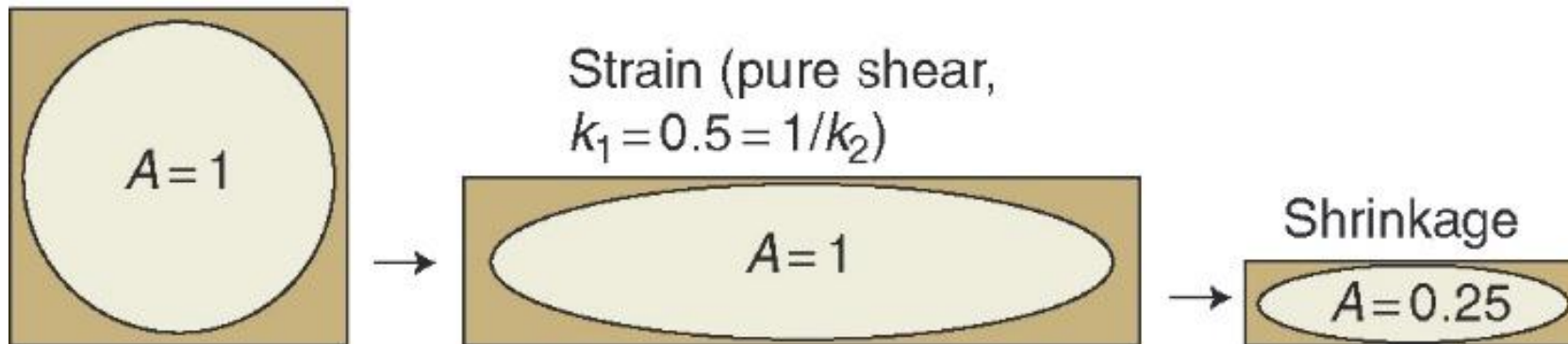
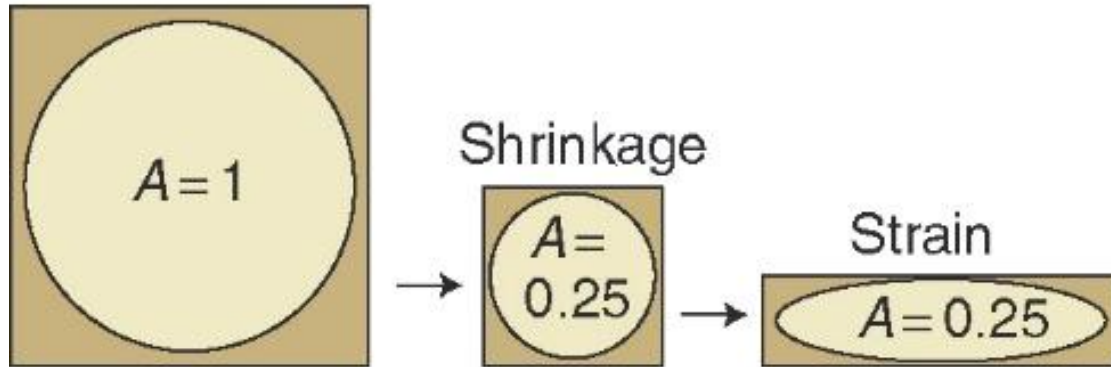
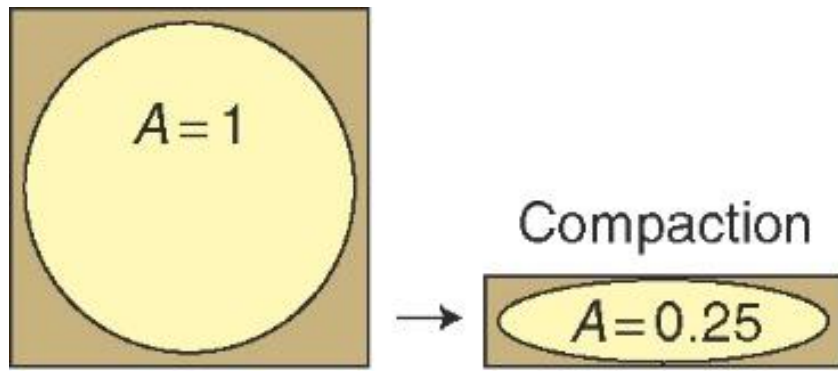


Συνέχεια στο επόμενο slide









Η διαστρωτική παραμόρφωση που συνεπάγεται η διαδικασία της συμπύκνωσης και διαγένεσης των ιζημάτων στη φάση της απόθεσης, μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, της καθαρής μεταβολής στον όγκο (*volumetric strain*) και της μεταβολής στην διαστρωτική παραμόρφωση (*strain*).

Στο σχήμα η μεταβολή αυτή αναπαρίσταται στις δύο διαστάσεις (*area change* – μεταβολή εμβαδού ή έκτασης).

Επισημαίνεται ότι η ανάλυση αυτή σε καμία περίπτωση δεν έχει να κάνει με την ιστορία και την εξέλιξη της παραμόρφωσης (*deformation history*) και αποτελεί μια απλή τεχνική για την περιγραφή και τον υπολογισμό της παραμόρφωσης.

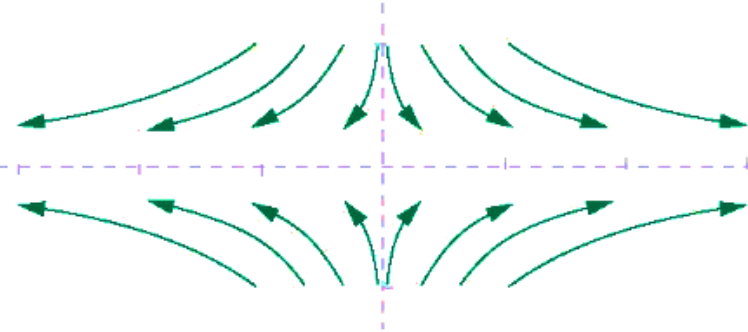
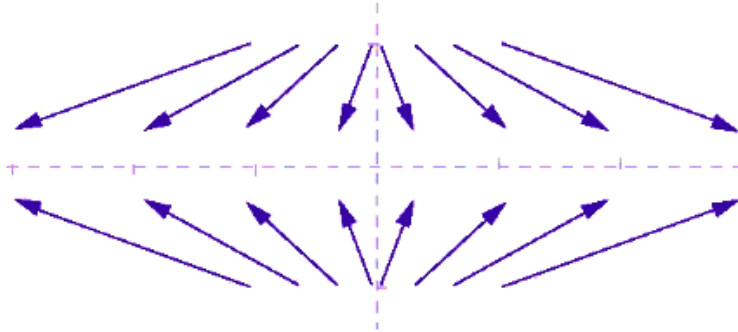
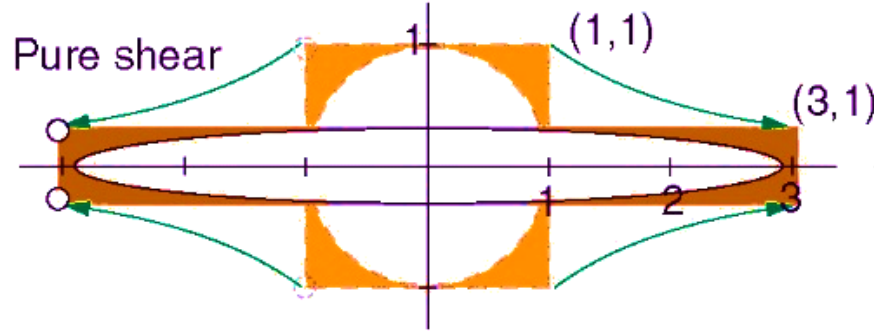
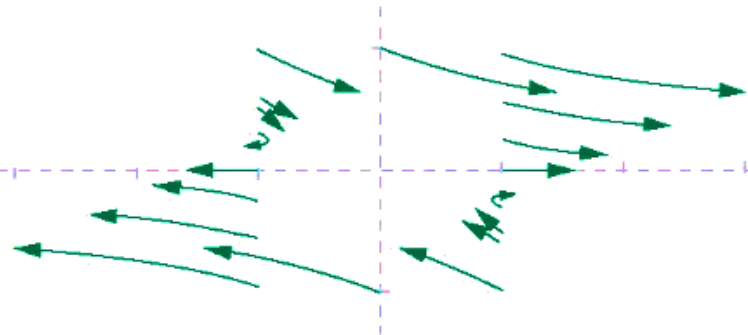
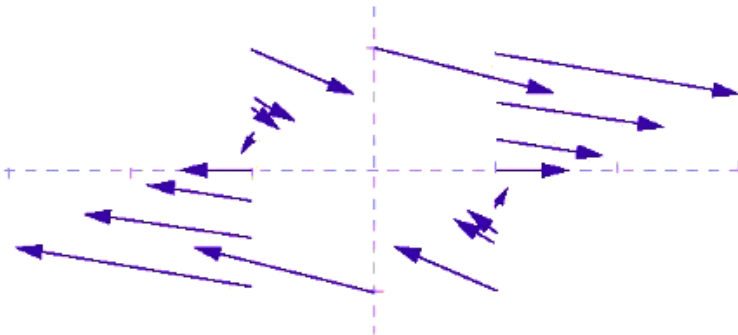
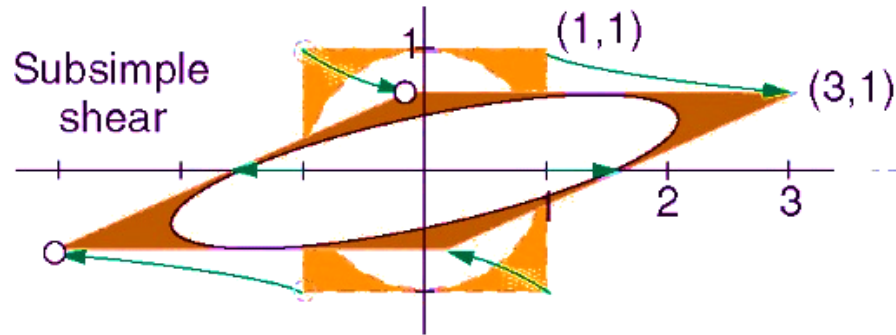
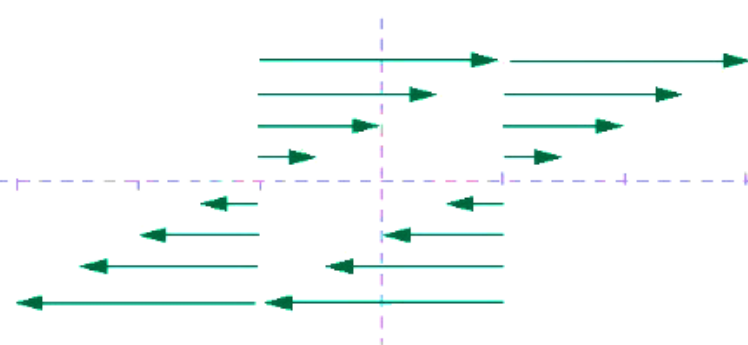
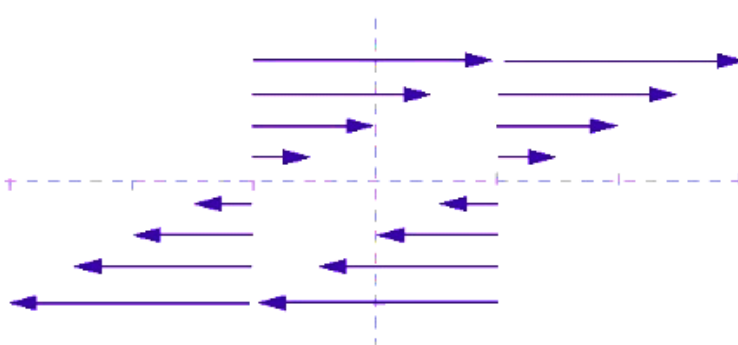
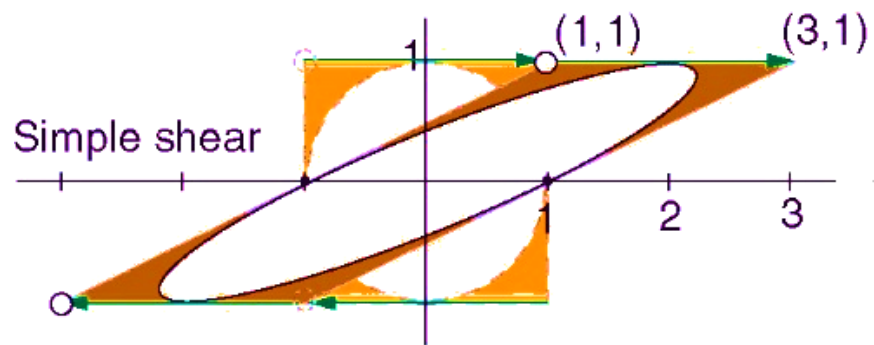


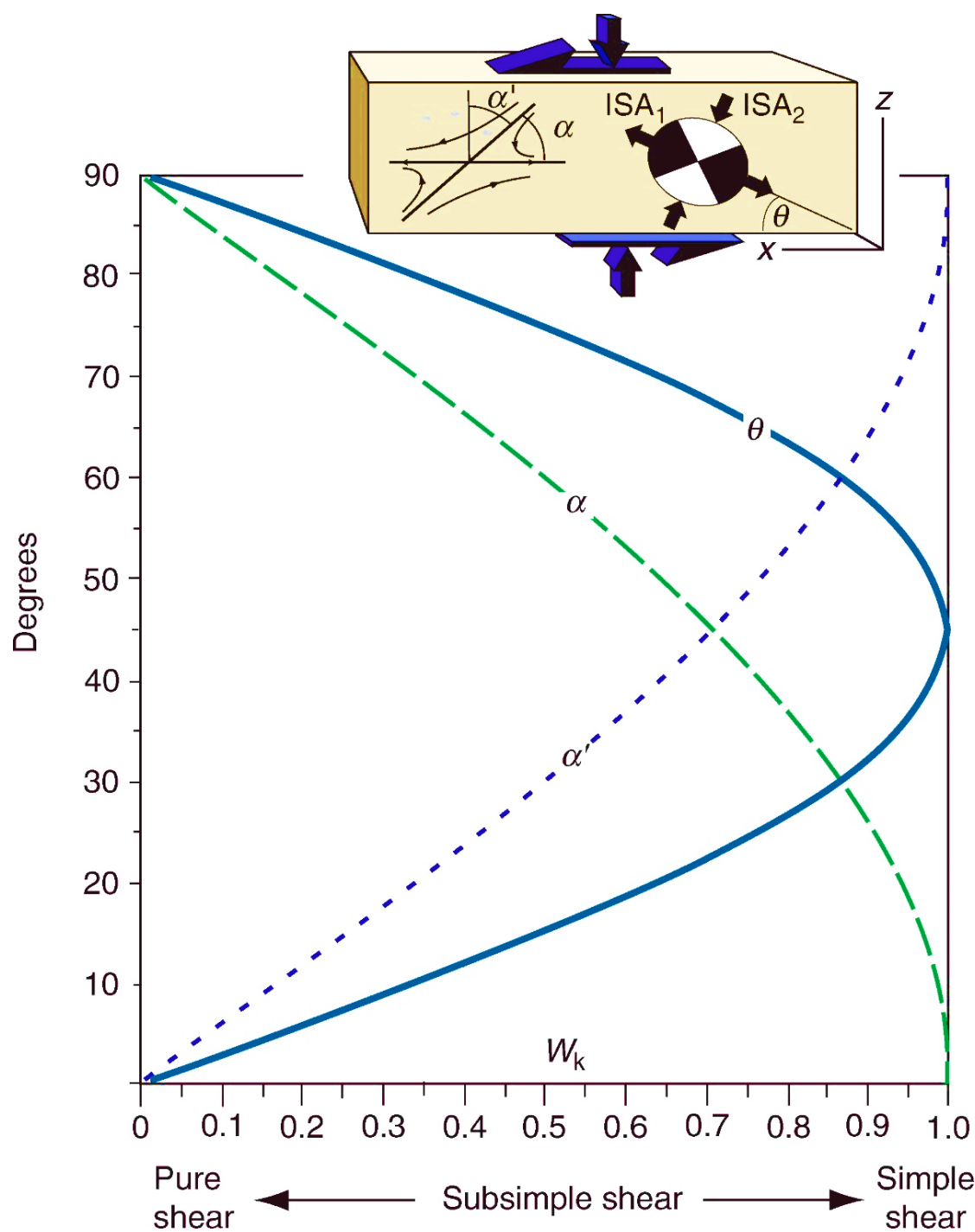


Strain

Displacement field

Particle paths





Η υπο-απλή διάτμηση σχετίζεται με βράχυνση παράλληλα με τον άξονα Z και εγκάρσια στο επίπεδο διάτμησης, το οποίο ταυτίζεται με το επίπεδο X-Y.

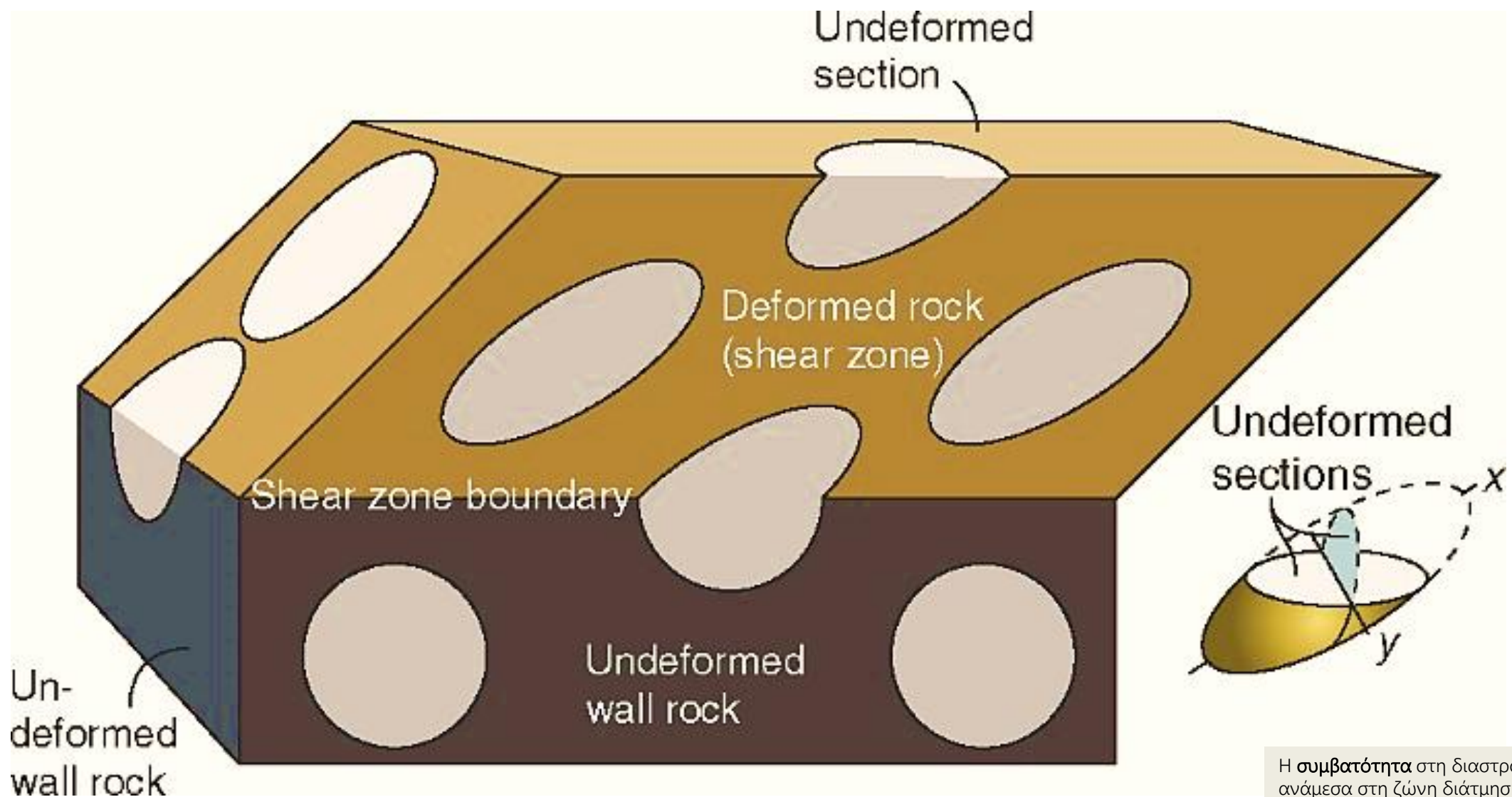
Αυτή μη-αξονική παραμόρφωση προϋποθέτει περιστροφή περί τον άξονα Y.

Το διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζει τη σχέση ανάμεσα στα μεγέθη  $W_k$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha'$  &  $\theta$ .

Συγκεκριμένο ποσό διαστρωφικής παραμόρφωσης (συνδυασμός καθαρής και απλής διάτμησης) προκαλεί συγκεκριμένη περιστροφή του ελλειψοειδούς και χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο αριθμό  $W_k$  και τις αντίστοιχες γωνίες  $\alpha$ ,  $\alpha'$  και  $\theta$ .

Όταν η μία από τις δύο συνιστώσες παραμόρφωσης μηδενιστεί, τότε έχουμε είτε καθαρή, είτε απλή διάτμηση.





Η **σμβατότητα** στη διαστροφική παραμόρφωση ανάμεσα στη ζώνη διάτμησης και τα अपαραμόρφωτα τοιχώματα προϋποθέτει ότι η μάζα που παραμορφώνεται είναι **συμπαγής, χωρίς ασυνέχειες, αλληλοεπικαλύψεις και κενά**.

Στην περίπτωση της **απλής διάτμησης** κάθε **τομή παράλληλη** στη ζώνη διάτμησης θα παρουσιάζεται **απαραμόρφωτη**.



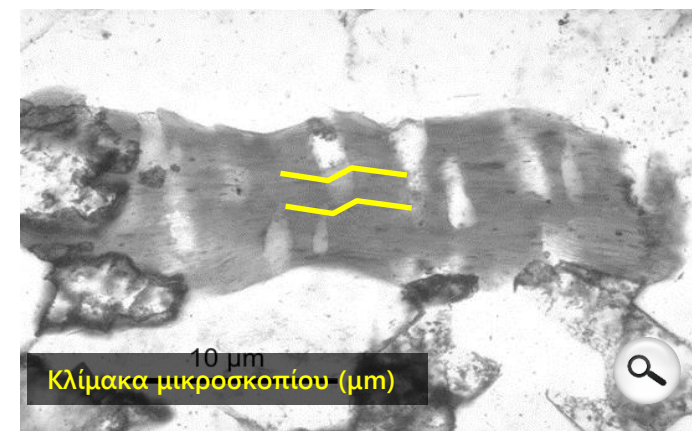
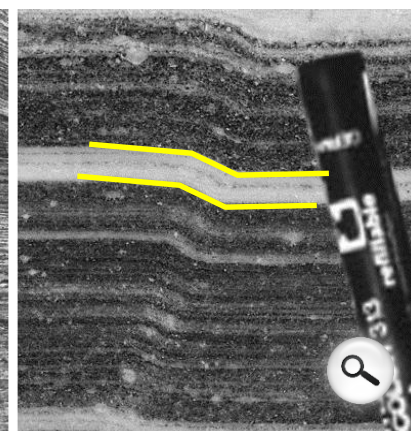
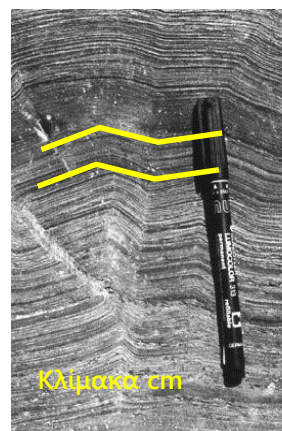
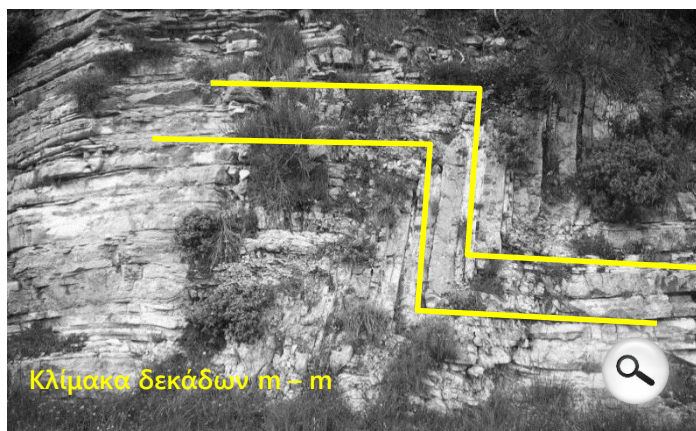
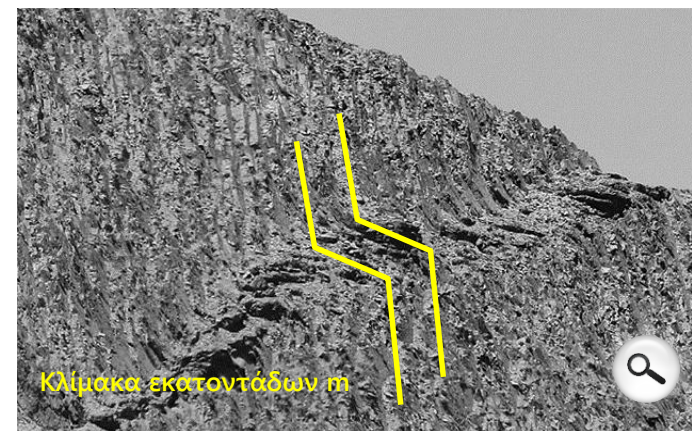
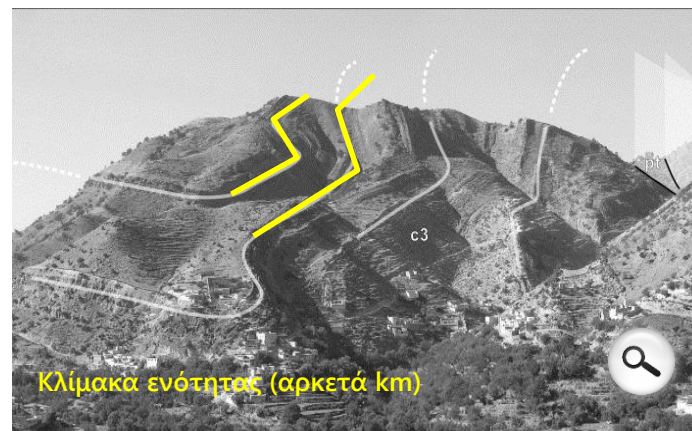
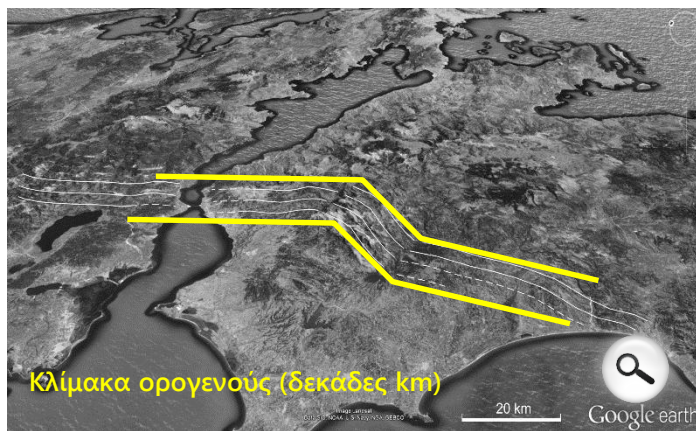


- Αντικείμενο - Ορισμοί
- Κλίμακες εργασίας
- Ο fractal χαρακτήρας των τεκτονικών δομών
- Κλάδοι και εξειδικεύσεις
- Τεχνικές έρευνας
- Εργασία υπαίθρου
- Τηλεανίχνευση
- Γεωδαιτικές τεχνικές
- DEM, GIS & Google Earth
- Γεωφυσικά δεδομένα
- Πειραματικά δεδομένα
- Αριθμητικά μοντέλα
- Τεκτονική ανάλυση & σύνθεση
- Εφαρμογές της Τεκτονικής Γεωλογίας

ΣΥΝΟΨΗ  
ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

**Ένα παράδειγμα για την fractal φύση των πτυχώσεων:**

Δομές τύπου kink folds (λοξοζωνικές πτυχές) που επαναλαμβάνουν τον εαυτό τους (self similar) σε όλες τις κλίμακες, από την κλίμακα σε επίπεδο ορογενούς (αρκετών δεκάδων χιλιομέτρων), μέχρι την κλίμακα σε επίπεδο ορυκτού (κλίμακα μικροσκοπίου της τάξης των  $\mu\text{m}$ ).



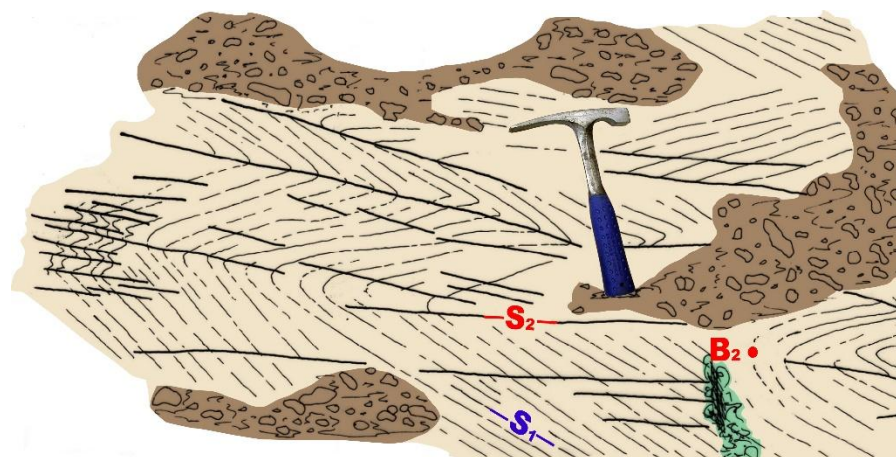


- Αντικείμενο - Ορισμοί
- Κλίμακες εργασίας
- Ο fractal χαρακτήρας των τεκτονικών δομών
- Κλάδοι και εξειδικεύσεις
- Τεχνικές έρευνας
- Εργασία υπαίθρου
- Τηλεανίχνευση
- Γεωδαιτικές τεχνικές
- DEM, GIS & Google Earth
- Γεωφυσικά δεδομένα
- Πειραματικά δεδομένα
- Αριθμητικά μοντέλα
- Τεκτονική ανάλυση & σύνθεση
- Εφαρμογές της Τεκτονικής Γεωλογίας

ΣΥΝΟΨΗ  
ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

## Structural Geology Τεκτονική Γεωλογία\*

Εστιάζει κυρίως στις δομές (γεωμετρία, κατανομή, ανάλυση) που σχηματίζονται από την παραμόρφωση των πετρωμάτων, δηλαδή τις τεκτονικές δομές (πτυχές, ρήγματα, φυλλώσεις κλπ.).



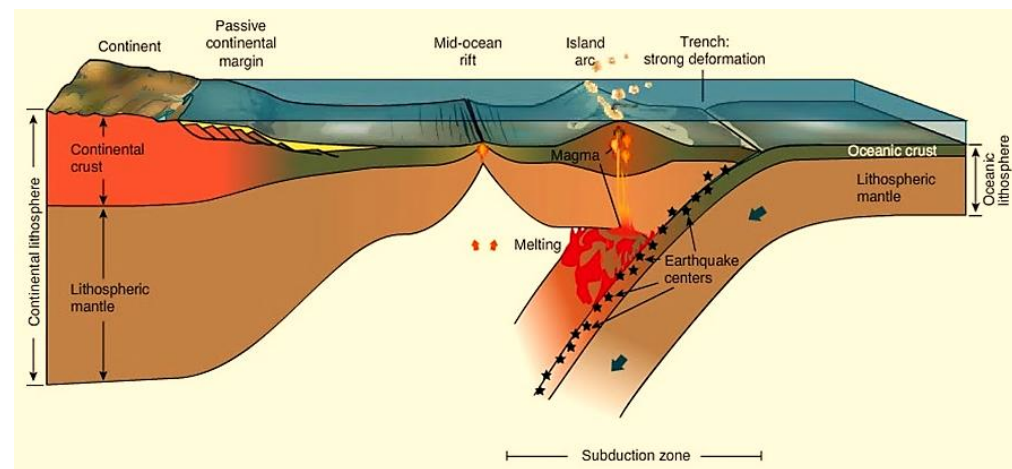
\*Δομική Γεωλογία ?

*Structural* → Λατινική ρίζα "struere"

VS

## Tectonics Γεωτεκτονική\*

Εστιάζει κυρίως στους μηχανισμούς και τις διαδικασίες της παραμόρφωσης στη μεγάλη κλίμακα, δηλαδή σε κλίμακα φλοιού (αφορά κυρίως την τεκτονική λιθосφαιρικών πλακών).



\*Geodynamics (Γεωδυναμική)

*Tectonics* → Ελληνική ρίζα "τέκτος"

Τέλος



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.

Έχουν προηγηθεί οι κάτωθι εκδόσεις:

- Έκδοση διαθέσιμη εδώ <http://eclass.uoa.gr/courses/GEOL135/>





# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Δημήτριος Παπανικολάου, Στυλιανός Λόζιος 2015. Δημήτριος Παπανικολάου, Στυλιανός Λόζιος. «Τεκτονική Γεωλογία. Ενότητα 2: Παραμόρφωση και Τροπή». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/GEOL4>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.





# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/15)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

## **Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

Εικόνες 1-2, Διαφάνεια 2: Η "κραυγή" ("skrik") είναι μία σειρά από εξπρεσιονιστικούς ζωγραφικούς πίνακες του Νορβηγού Edvard Munch.

Copyrighted. <http://www.southerncrossreview.org/39/munch.scream.jpg>  
<https://studentrygh.files.wordpress.com/2010/09/skrik.jpg>

Εικόνα 3, Διαφάνεια 3: Two types of stress,compression and tension. Copyrighted.  
<http://explorethepossibilities.weebly.com/uploads/5/4/4/2/5442899/8678891.jpg?186>

Εικόνα 4, Διαφάνεια 3: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συμπιεστικού ή εκτατικού εντατικού πεδίου στην παραμόρφωση του προσώπου του πίνακα.  
Copyrighted. <http://blogs.agu.org/mountainbeltway/files/2012/08/coaxial.jpg>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/15)

Εικόνα 5, Διαφάνεια 4: Μηχανισμοί παραμόρφωσης. Copyrighted.

[http://sanuja.com/blog/wp-content/uploads/2013/03/341\\_deformation\\_mechanisms.jpg](http://sanuja.com/blog/wp-content/uploads/2013/03/341_deformation_mechanisms.jpg)

Εικόνα 6, Διαφάνεια 6: Copyrighted.

Εικόνα 7, Διαφάνεια 6: Deformation associated with reverse drag along a normal fault by Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 8, Διαφάνεια 6: Coordinate axes can be attached to the shear zone wall in order to describe the strain and internal rotation components separately and to omit rotation and translation. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules).

Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/15)

Εικόνα 9, Διαφάνεια 7: Translation of fault blocks in a horst and graben system. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 10, Διαφάνεια 7: Το κάλυμμα Jotun των Σκανδιναβικών Καλιδονίδων φαίνεται να έχει μετατεθεί τουλάχιστον 300 km προς τα SE, σύμφωνα με υπολογισμούς που βασίζονται σε τεχνικές αποκατάστασης και εξισορρόπησης αλλά και στον προσανατολισμό των γραμμώσεων. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 11, Διαφάνεια 8: Rotation of the principal axes in the strain ellipse during simple shear. . Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>





# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (4/15)

Εικόνα 12, Διαφάνεια 8: Extension in the upper crust is partly accommodated by rotation of large fault blocks. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 13, Διαφάνεια 9: Ductile deformation: Deformed Ordovician trilobite. Copyrighted. <http://plate-tectonic.narod.ru/srd-53.jpg>

Εικόνα 14, Διαφάνεια 9: Deformed conglomerate rock. Copyrighted. <http://marlimillerphoto.com/images/SrD-39.jpg>

Εικόνα 15, Διαφάνεια 9: Copyrighted.

Εικόνα 16, Διαφάνεια 9: Animation με τους κύκλους στο υπό παραμόρφωση αντικείμενο να χαρακτηρίζουν την διαστροφική παραμόρφωση (strain). Copyrighted.

Εικόνα 17, Διαφάνεια 10: Copyrighted.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (5/15)

Εικόνα 18, Διαφάνεια 11: Ομοιογενής παραμόρφωση (είτε pure shear είτε simple shear) σε ένα πέτρωμα που περιέχει βραχιονόποδα, αμμωνίτες, reduction spots και φλέβες. Copyrighted. [http://2.bp.blogspot.com/-Ae8j1\\_E9yPM/U9x2rr4ZyHI/AAAAAAAAADk/E-07SocZfLU/s1600/deformasi+2.png](http://2.bp.blogspot.com/-Ae8j1_E9yPM/U9x2rr4ZyHI/AAAAAAAAADk/E-07SocZfLU/s1600/deformasi+2.png)

Εικόνα 19, Διαφάνεια 11: Η παραμόρφωση μπορεί να είναι ομοιογενής σε μία κλίμακα και ανομοιογενής (ετερογενής) σε μία άλλη. Copyrighted.

Εικόνες 20-21-22, Διαφάνεια 12: Ομοιογενής και ανομοιογενής παραμόρφωση animations by Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνες 23-24-25-26-27-28, Διαφάνειες 13-14: Graphics and animations by Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (6/15)

Εικόνες 29-30, Διαφάνεια 17: Χάρτες της περιοχής Basin and Range, USA. Copyrighted.

Εικόνα 31, Διαφάνεια 18: Διατμητική διαστροφική παραμόρφωση σε καθεστώς απλής διάτμησης (simple shear). Copyrighted.

Εικόνα 32, Διαφάνεια 18: Η γωνιακή διαστροφική παραμόρφωση  $\psi$  στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι  $45^\circ$  κατά μήκος της γραμμής A και  $-45^\circ$  κατά μήκος της γραμμής B. Copyrighted.

Εικόνα 33, Διαφάνεια 20: Η διαστροφική παραμόρφωση που συνεπάγεται η διαδικασία της συμπύκνωσης και διαγένεσης των ιζημάτων στη φάση της απόθεσης, στις δύο διαστάσεις μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, της μεταβολής στο εμβαδό και της μεταβολής στη διαστροφική παραμόρφωση. Copyrighted.

[http://geode.colorado.edu/~structure/teaching\\_GEOL3120/coursenotes/02Deformation.pdf](http://geode.colorado.edu/~structure/teaching_GEOL3120/coursenotes/02Deformation.pdf)





# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (7/15)

Εικόνα 34, Διαφάνεια 21: Seven circles and their corresponding strain ellipses. "Structural Analysis and Synthesis: A Laboratory Course in Structural Geology" from Stehen M. Rowland, Ernest M.. Copyrighted.

Εικόνα 35, Διαφάνεια 22: Ταξινόμηση των ελλείψεων διαστροφικής παραμόρφωσης (Ramsay & Huber 1983). Copyrighted.

Εικόνα 36, Διαφάνεια 24: Βασικά καθεστώτα αναφοράς διαστροφικής παραμόρφωσης στις 3 διαστάσεις. Copyrighted.

Εικόνες 37-38, Διαφάνειες 25-26: Graphics by Fossen, H., 2010, Structural Geology. Copyrighted.

Εικόνα 39, Διαφάνεια 27: Διάγραμμα Flinn. Copyrighted.

<http://tamop412a.ttk.pte.hu/files/kornyezettan9/www/images/img103.jpg>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (8/15)

Εικόνα 40, Διαφάνεια 28: Διάγραμμα Hsü. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 41, Διαφάνεια 29: Προβολή χαρακτηριστικών τεκτονικών δομών στο διάγραμμα ταξινόμησης των ελλείψεων διαστροφικής παραμόρφωσης στις δύο διαστάσεις. Copyrighted.

Εικόνα 42, Διαφάνεια 30: Οι τρεις κύριοι άξονες παραμόρφωσης. Copyrighted.

Εικόνα 43, Διαφάνεια 32: Ισότροπη αύξηση και μείωση όγκου (volumetric strain), χωρίς μεταβολή στο σχήμα (strain). Copyrighted.

Εικόνα 44, Διαφάνεια 32: Η ανισότροπη μείωση όγκου περιλαμβάνει και μεταβολή στο σχήμα (strain). Copyrighted.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (9/15)

Εικόνα 45, Διαφάνεια 33: Vertical compaction of sediments involves anisotropic negative dilation and reduction of fault and bedding dips. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 46, Διαφάνεια 34: Καθαρή διάτμηση και ομοαξονικές παραμορφώσεις. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/StructuralGeoBookEmodules.html>

Εικόνες 47-48, Διαφάνεια 35: Απλή διάτμηση και μη-ομοαξονική παραμόρφωση. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 49, Διαφάνεια 36: Sub-simple shear. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>





# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (10/15)

Εικόνες 50-51, Διαφάνεια 37: Ιστορία της παραμόρφωσης και προοδευτική παραμόρφωση. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 52, Διαφάνεια 38: Άξονες στιγμιαίας διάτασης (έκτασης). Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνες 53-54, Διαφάνεια 39: Άξονες στιγμιαίας διάτασης (έκτασης). Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 55, Διαφάνεια 40: Πεδίο ταχυτήτων. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (11/15)

Εικόνες 56-57-58, Διαφάνεια 41: Αποφύσεις ροής. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνες 59-60, Διαφάνεια 42: Στροβιλότητα. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνες 61-62, Διαφάνεια 43: Στροβιλότητα και  $W_K$ . Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 63, Διαφάνεια 44: Παραμόρφωση σταθερής και μη-σταθερής κατάστασης. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (12/15)

Εικόνα 64, Διαφάνεια 45: Προβλήματα συμβατότητας στη διαστροφική παραμόρφωση και συνθήκες περιθωρίων. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνες 65-66, Διαφάνεια 46: Παραμορφωμένα πετρώματα και ιστορία της παραμόρφωσης. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 67, Διαφάνεια 47: Ομοαξονική και μη ομοαξονική ιστορία της παραμόρφωσης. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνες 68-69, Διαφάνειες 48-49: Προοδευτική απλή διάτμηση και παραμόρφωση φυσικών γραμμών. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>





# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (13/15)

Εικόνα 70, Διαφάνεια 50: Προοδευτική καθαρή διάτμηση και παραμόρφωση φυσικών γραμμών. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 71, Διαφάνεια 51: Προοδευτική υπο-απλή διάτμηση και παραμόρφωση φυσικών γραμμών. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 72, Διαφάνεια 52: Κλίμακα παρατήρησης και μηχανισμός απλής ή καθαρής διάτμησης. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνες 73-74, Διαφάνεια 53: 3D διαστροφική παραμόρφωση. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (14/15)

Εικόνες 75-76, Διαφάνειες 54-55: Πεδίο τάσεων VS διαστροφική παραμόρφωση. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 77, Διαφάνεια 56: Triaxial Ellipsoid of semi-axes lengths. Public domain.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triaxial\\_Ellipsoid.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triaxial_Ellipsoid.jpg)

Εικόνα 78, Διαφάνεια 57: Copyrighted.

Εικόνα 79, Διαφάνεια 59: The fold at the Sandviksfjellet locality. From Holst and Fossen 1987. Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 80, Διαφάνεια 59: Flinn diagram. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (15/15)

Εικόνα 81, Διαφάνεια 60: Copyrighted.

Εικόνα 82, Διαφάνεια 61: True constriction in the lower hinge zone. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 83, Διαφάνεια 61: Flattened conglomerate (pancake cobbles). Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 84, Διαφάνεια 64: Το διάγραμμα παρουσιάζει τη σχέση ανάμεσα στα μεγέθη  $W_k$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha'$  &  $\theta$ . Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%202/02%20Deformation.swf>

Εικόνα 85, Διαφάνεια 65: Copyrighted.

