

Τάση (Stress) – Παραμόρφωση (Strain)

Ορισμοί • Τανυστής τάσης • Μετασχηματισμοί • Ελλειψοειδές & τροχιές τάσεων
Μέτρηση Παραμόρφωσης • Πεδίο Παραμόρφωσης

Τι είναι εδαφική παραμόρφωση και γιατί μας ενδιαφέρει

Βασικές έννοιες

Παραμόρφωση = μεταβολή σχήματος, όγκου ή θέσης της λιθόσφαιρας.

Παρατηρείται σε σεισμική, μετασεισμική και τεκτονική κλίμακα.

Επηρεάζει σεισμικό κίνδυνο, ηφαίστεια, καθιζήσεις, κατολισθήσεις και υποδομές.

- Η Γεωφυσική ποσοτικοποιεί τόσο τις αιτίες όσο και τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης.
- Η **Τάση** (stress) είναι η «αιτία» που φορτίζει τα υλικά.
- Η **Παραμόρφωση** (strain) είναι το «αποτέλεσμα» της τάσης.



Οι ρηξιγενείς δομές είναι ένας μηχανισμός εκτόνωσης του συστήματος.

Θεμελιώδεις Έννοιες και η Δομή της Γης

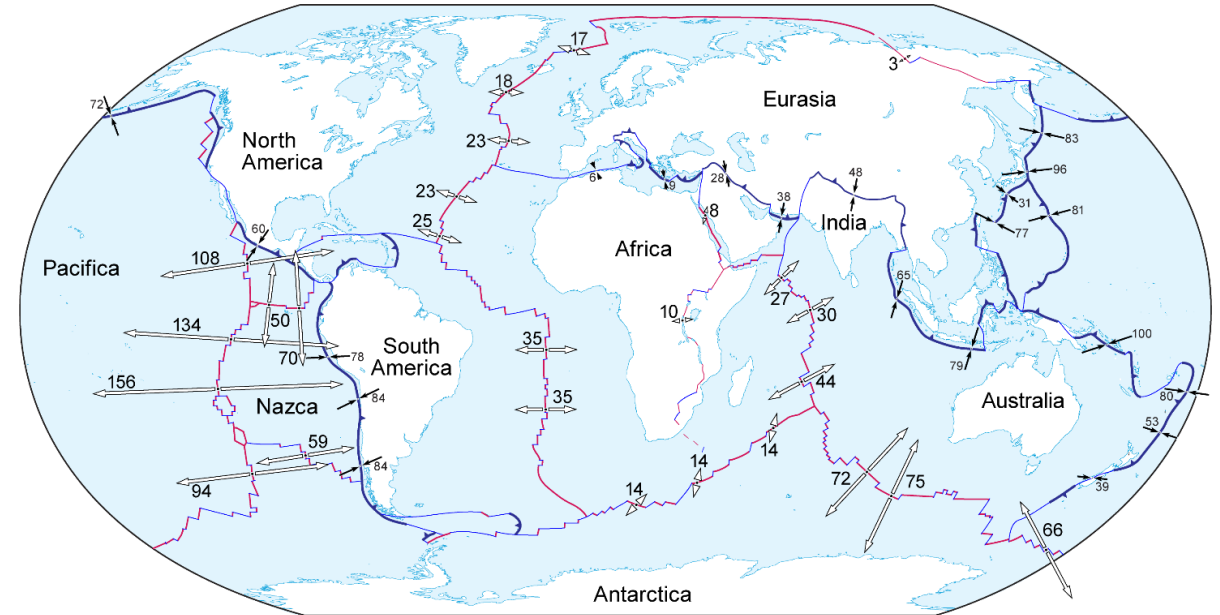
Η Γη αποτελείται από στρώματα με διαφορετική σύσταση και φυσικές ιδιότητες: τον πυρήνα, τον μανδύα και τον φλοιό.

Το ανώτερο τμήμα του μανδύα μαζί με τον φλοιό σχηματίζουν τη **λιθόσφαιρα**, το εξωτερικό κέλυφος της Γης.

- **Τεκτονικές Πλάκες:** Η λιθόσφαιρα είναι κατακερματισμένη σε τμήματα που ονομάζονται πλάκες.

Υπάρχουν 7 μεγάλες πλάκες (Αφρικανική, Ανταρκτική, Αυστραλιανή, Ευρασιατική, Βορειοαμερικανική, Νοτιοαμερικανική και του Ειρηνικού) και αρκετές μικρότερες (π.χ. Αραβική, Νάζκα, Φιλιππίνων).

- **Τεκτονική των Πλακών:** Είναι η μελέτη των σχετικών κινήσεων των πλακών και των συνεπειών τους. Οι κινήσεις αυτές επιτρέπουν τη σύνδεση των επιφανειακών γεωλογικών δομών με βαθιές διεργασίες της Γης.



Σχετικές κινήσεις και όρια πλακών

Μεγέθη και τάξεις μεγέθους

- Οριζόντιες σχετικές κινήσεις: μέχρι και >20 cm/έτος (π.χ. πλάκα Ειρηνικού).
- Κατακόρυφες κινήσεις: τυπικά έως ~ 10 mm/έτος (μικρότερη τάξη μεγέθους).
- Τα όρια πλακών μετακινούνται/αναδιοργανώνονται στον γεωλογικό χρόνο.
- Η γεωμετρία των ορίων ελέγχει σεισμικότητα, ηφαιστειότητα και ορογένεση.

Τύποι Ορίων:

Αποκλίνοντα όρια (Divergent): Οι πλάκες απομακρύνονται η μία από την άλλη.

- Διάταση / ρήγματα κανονικά, Μεσοωκεάνιες Ράχες, rifts, Παραγωγή νέου ωκεάνιου φλοιού

Συγκλίνοντα όρια (Convergent): Οι πλάκες κινούνται η μία προς την άλλη, οδηγώντας συχνά σε υποβύθιση (κατάδυση της μιας πλάκας κάτω από την άλλη).

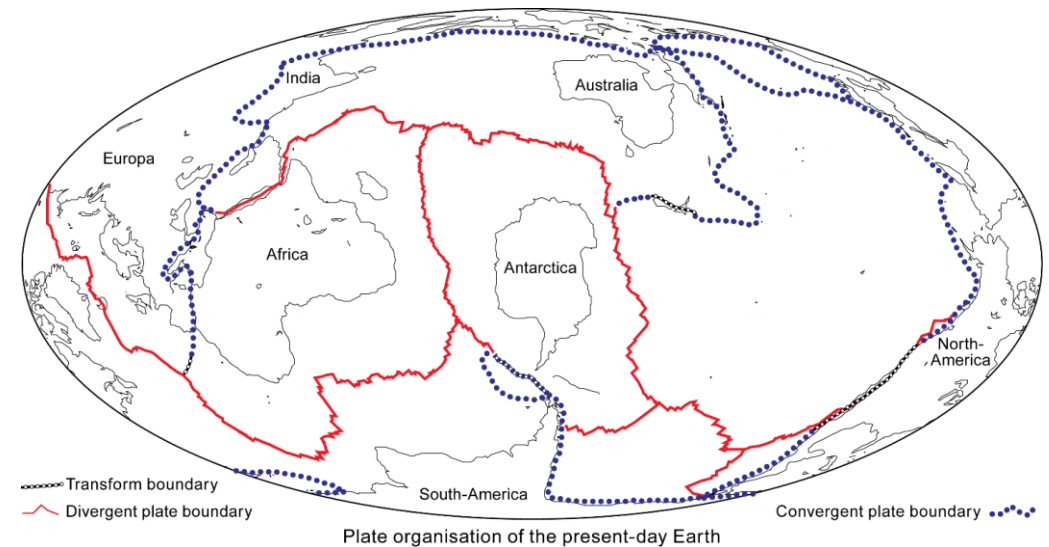
- Συμπίεση / ωθήσεις, Υποβύθιση ή σύγκρουση ηπείρων, Τάφρος – ηφαιστειακό τόξο – ορογένεση

Όρια οριζόντιας μετατόπισης (Wrench/Transform): Οι πλάκες γλιστρούν πλευρικά η μία δίπλα στην άλλη.

- Οριζόντια ολίσθηση (strike-slip), Σύνδεση τμημάτων ραχών/τάφρων, Σεισμικά ενεργά ρήγματα

Στη σύγχρονη Γεωφυσική περιγράφονται δύο μεγάλα «δίκτυα» αποκλινόντων και συγκλινόντων ορίων, που τεμαχίζονται ή συνδέονται από ολισθηρά όρια.

Η γενική αυτή οργάνωση σχετίζεται με τις φυσικές διεργασίες του μανδύα, και οι κινητήριες τάσεις ανάγονται σε βαρυτικές δράσεις πάνω σε ανομοιογένειες πυκνότητας εντός και κάτω από τη λιθόσφαιρα.



Τεκτονικά Συστήματα και Παραμόρφωση

Ένα γεωλογικό σύστημα είναι μια ομάδα αλληλεξαρτώμενων στοιχείων και δυνάμεων που αλληλεπιδρούν και τείνουν προς ισορροπία (ελάχιστη ενέργεια).

Στη γεωλογία διακρίνονται:

- Κλειστά συστήματα (ανταλλάσσουν μόνο θερμότητα),
- Ανοικτά συστήματα (ανταλλάσσουν θερμότητα και ύλη).

Τα περισσότερα γεωλογικά συστήματα είναι “ανοιχτά”, ανταλλάσσοντας θερμότητα και ύλη με το περιβάλλον.

Θεμελιώδη Υποσυστήματα Δομών:

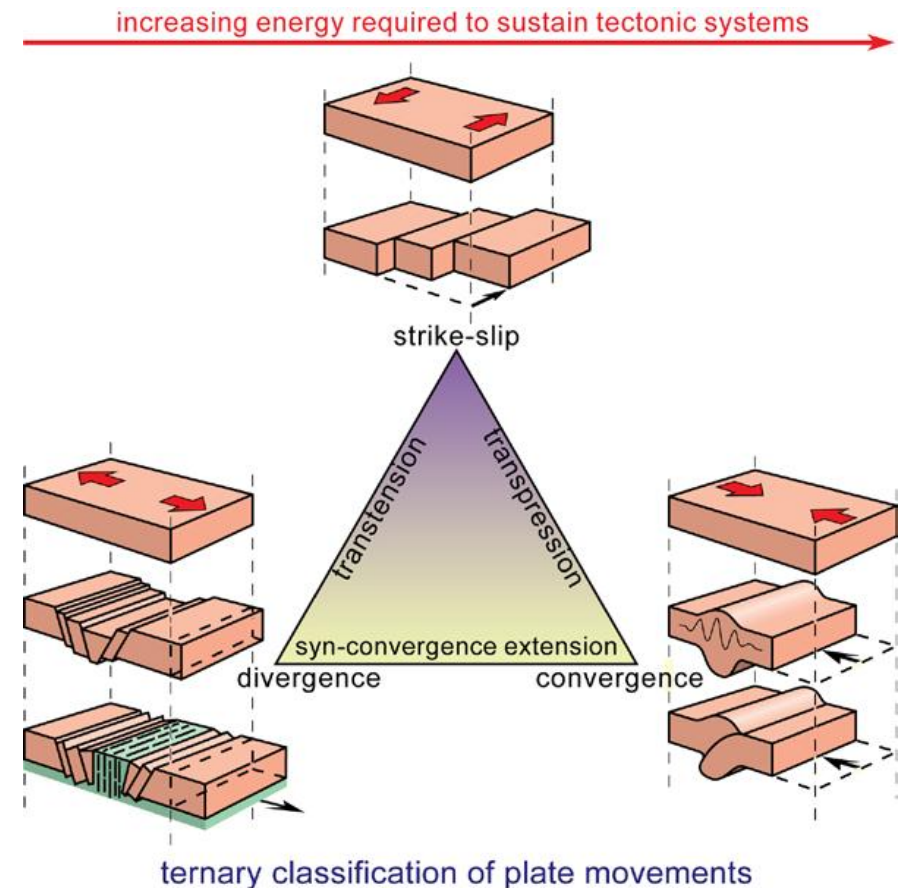
Οι περιφερειακές τάσεις στη λιθόσφαιρα δημιουργούν χαρακτηριστικά υποσυστήματα παραμόρφωσης:

Συμπιεστικό Σύστημα (Compressive): Δημιουργεί επωθήσεις (thrusts).

Εφελκυστικό Σύστημα (Extension): Δημιουργεί κανονικά ρήγματα (normal faults).

Σύστημα Οριζόντιας Μετατόπισης (Strike-slip): Δημιουργεί ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης.

Το τεκτονικό σύστημα είναι ένα βασικό γεωλογικό σύστημα, επειδή αφορά την κίνηση των πλακών: είναι δυναμικό, με μεταφορά ύλης/ενέργειας και ανάπτυξη δομών, ιδιαίτερα στα όρια πλακών.



Συστήματα ρηγμάτων και Παραμόρφωσης

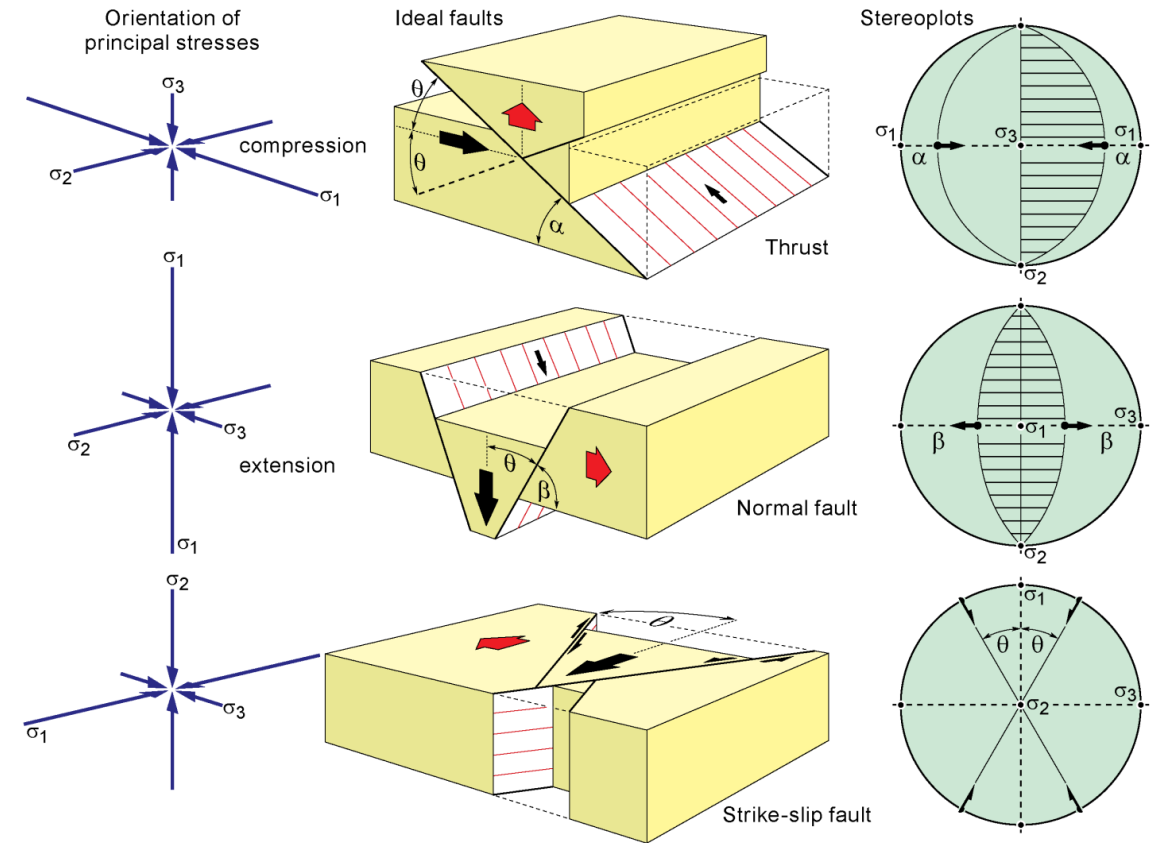
Πείραμα-μοντέλο:

- Στρογγυλό καπάκι ενός κάδου ως «πλάκα» (ισχυρό και άκαμπτο).

Γύρω από το καπάκι άμμος (αντιπροσωπεύει τις ασθενείς οροσειρές και/ή τις ιζηματογενείς λεκάνες)

Τι συμβαίνει στην άμμο όταν μετακινούμε το καπάκι/«πλάκα»;

1. Μπροστά από την «πλάκα» αναπτύσσεται ένα εύθραυστο σύστημα συμπίεσης με ωθήσεις (thrusts).
2. Πίσω από την «πλάκα» αναπτύσσεται ένα εύθραυστο σύστημα έκτασης/εφελκυσμού με κανονικά ρήγματα (normal faults).
3. Στα δύο πλάγια του καπακιού αναπτύσσονται συστήματα οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip): το ένα δεξιόστροφο (dextral) και το άλλο αριστερόστροφο (sinistral).

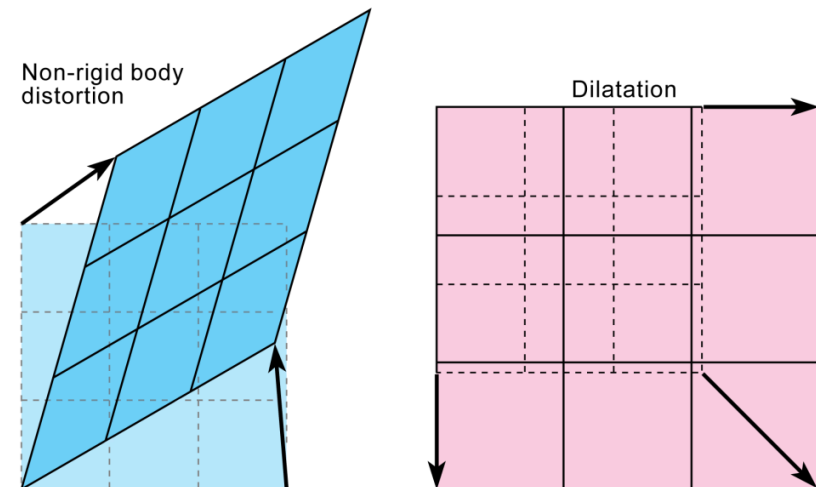
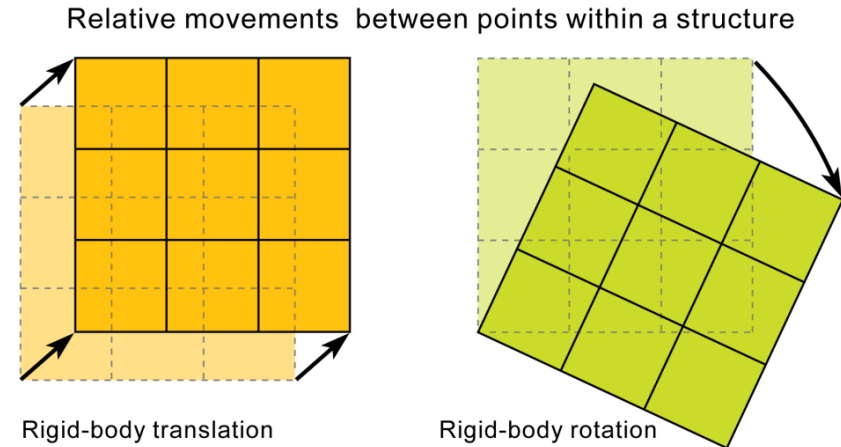


Μηχανική και Παραμόρφωση

Η Μηχανική είναι η μελέτη των επιδράσεων των δυνάμεων πάνω στα σώματα. Ένα στερεό σώμα που υποβάλλεται σε εξωτερικές δυνάμεις τείνει να αλλάξει τη θέση του ή το σχήμα του.

Διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες κινήσεων:

- 1. Παραμόρφωση Στερεού Σώματος (Rigid body deformation):** Τα πετρώματα μετατοπίζονται ή περιστρέφονται χωρίς να αλλάξει το αρχικό τους μέγεθος ή σχήμα. Αυτό περιλαμβάνει τη *μετάθεση* (translation) και την *περιστροφή* (rotation).
- 2. Παραμόρφωση μη-Στερεού Σώματος (Non-rigid body deformation - Strain):** Εάν ένα σώμα απορροφήσει τις δυνάμεις αντί να μετακινηθεί, τότε αποκτά τάση. Οι δυνάμεις προκαλούν μετατοπίσεις σωματιδίων με αποτέλεσμα την αλλαγή σχήματος (παραμόρφωση/distortion) ή όγκου (διαστολή/dilatation).

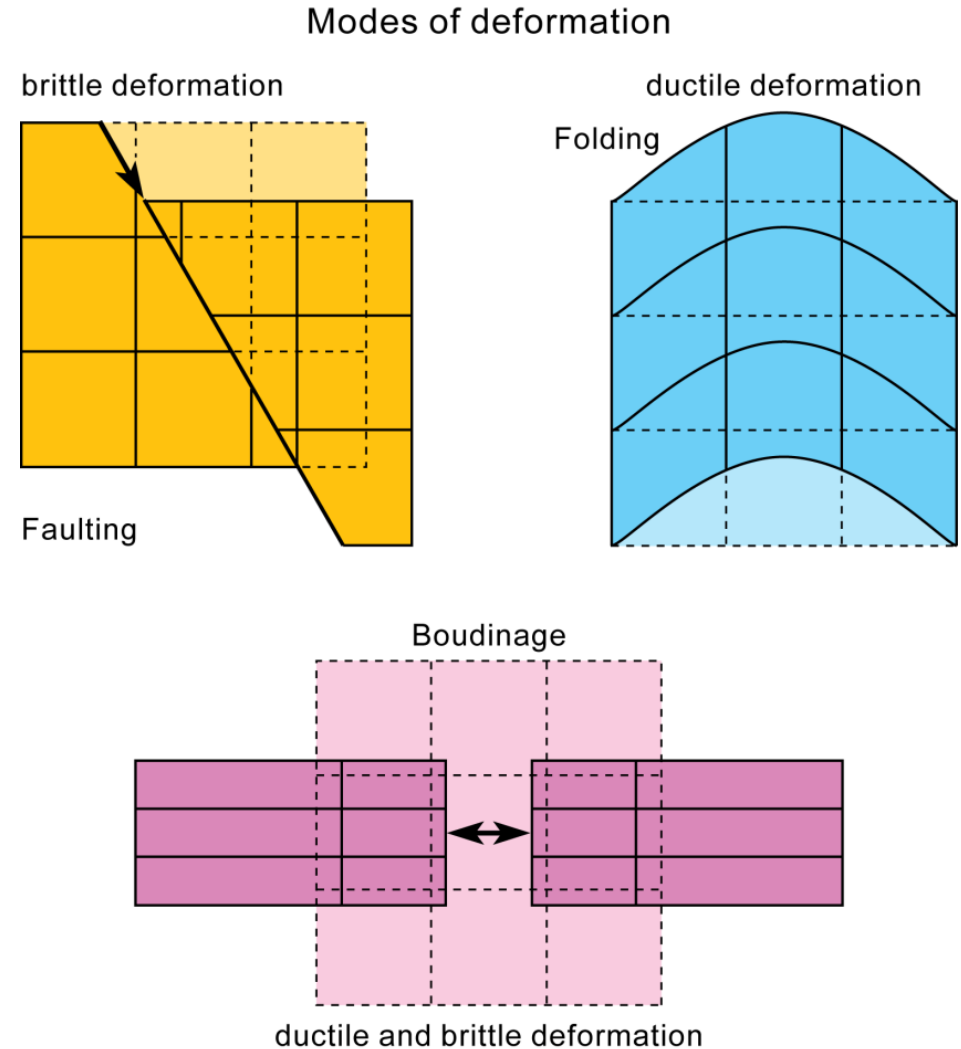


Μηχανική και Παραμόρφωση

Τρόποι Παραμόρφωσης

Η συμπεριφορά των πετρωμάτων εξαρτάται από φυσικούς και χημικούς παράγοντες:

- **Θραυσιγενής (Brittle):** Το πέτρωμα χάνει τη συνοχή του και σπάει (π.χ. ρήγματα - faulting).
- **Πλαστική (Ductile):** Το πέτρωμα παραμορφώνεται χωρίς να χάσει τη συνοχή του, διατηρώντας μόνιμη αλλαγή σχήματος (π.χ. πτυχές).



Μηχανική και Παραμόρφωση

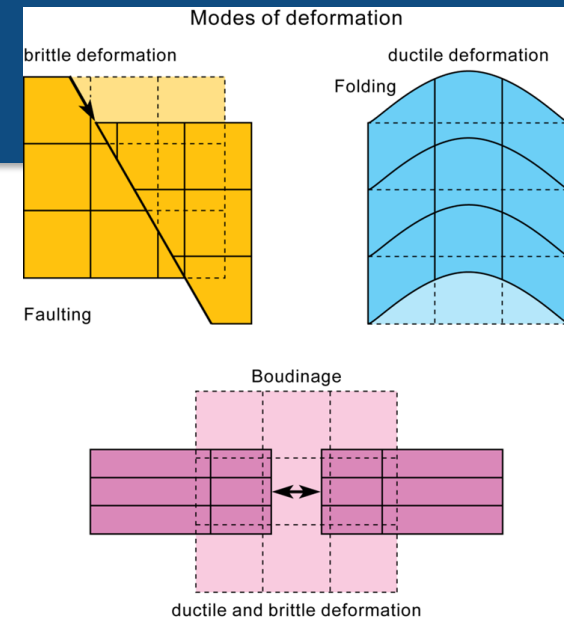
Σε ένα πείραμα θλίψης, καταγράφουμε την τάση (σ) και την παραμόρφωση (ϵ).

- **Ελαστική Συμπεριφορά** (Elastic): Σε χαμηλές τάσεις, η παραμόρφωση είναι γραμμική και αναστρέψιμη. Αν αφαιρέσουμε το φορτίο, το πέτρωμα επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα. Αυτό περιγράφεται από τον Νόμο του Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

όπου E είναι το Μέτρο του Young (Young's Modulus), που δείχνει την "ακαμψία" του πετρώματος.

- **Όριο Ελαστικότητας** (Yield Point): Το σημείο πέρα από το οποίο η παραμόρφωση γίνεται μόνιμη (πλαστική).
- **Πλαστική Συμπεριφορά** (Plastic): Το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα χωρίς να σπάσει.
- **Θραύση** (Failure): Όταν η τάση ξεπεράσει την αντοχή του υλικού, το πέτρωμα σπάει (δημιουργία ρήγματος).



- **Λόγος Poisson** (ν): Περιγράφει πόσο "φουσκώνει" το υλικό στο πλάι όταν το πιέζουμε από πάνω. Για τα περισσότερα πετρώματα, $\nu \approx 0.25$
- **Μέτρο Διάτμησης** (G): Αντίσταση στην αλλαγή σχήματος.
- **Μέτρο Συμπιεστότητας** (K): Αντίσταση στην αλλαγή όγκου.

Δυνάμεις

Η κατανόηση της παραμόρφωσης βασίζεται στους νόμους του Νεύτωνα, με θεμελιώδη τη σχέση δύναμης, μάζας και επιτάχυνσης:

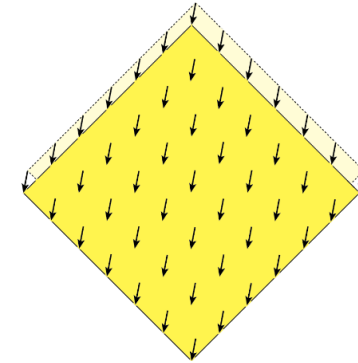
$$F = m \cdot a$$

Στο φλοιό της Γης, οι σημαντικότερες δυνάμεις οφείλονται στη βαρύτητα και στις σχετικές κινήσεις μεγάλων μαζών πετρωμάτων.

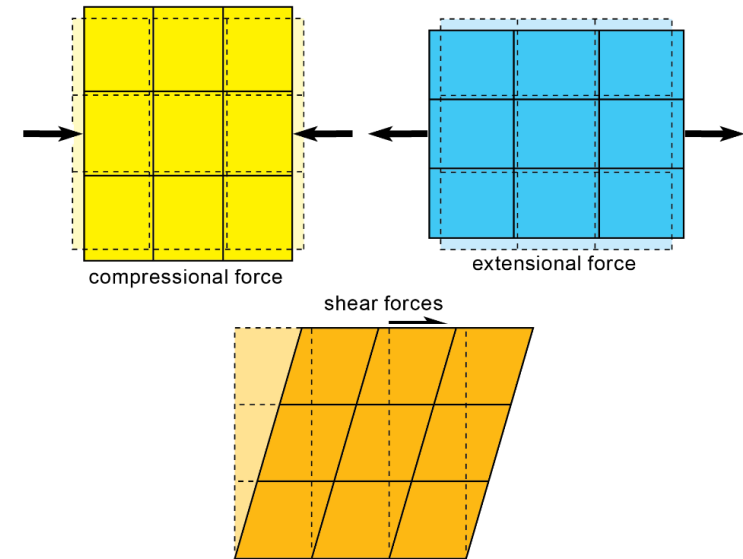
Κατηγορίες Δυνάμεων

- **Μαζικές Δυνάμεις (Body forces):** Δρουν σε κάθε σωματίδιο του σώματος (π.χ. βαρύτητα). Είναι ανάλογες της μάζας και του όγκου.
- **Επιφανειακές Δυνάμεις (Surface forces):** Δρουν σε μια επιφάνεια, είτε αυτή είναι το εξωτερικό όριο του σώματος είτε μια εσωτερική τομή του σώματος και είναι ανάλογες της επιφάνειας. Στη γεωλογία, οι τεκτονικές δυνάμεις μεταδίδονται μέσω των ορίων των πλακών.
- Σε ένα σημειακό στοιχείο όγκου (άπειρα μικρό), οι μαζικές δυνάμεις θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με τις επιφανειακές

Body force
(forces that act on each point of a body)



Orientation of surface forces
(forces that act on the boundaries of a body)



Δυνάμεις και Νόμοι της Κίνησης

Ανάλυση Δυνάμεων σε Επίπεδο

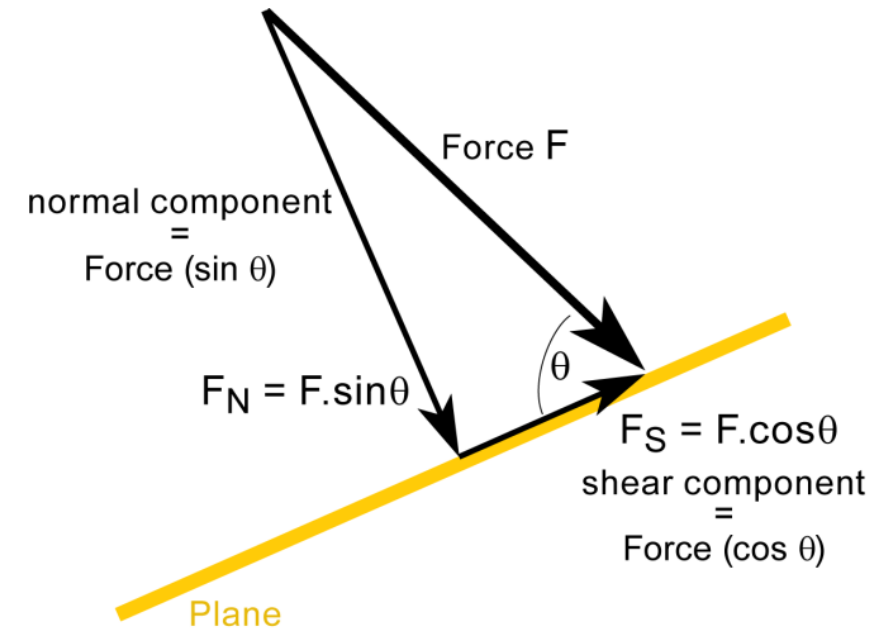
Μια δύναμη F που ασκείται σε ένα επίπεδο μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες

Ορθή δύναμη (F_N): Κάθετη στο επίπεδο. Προκαλεί αλλαγή όγκου.

Διατμητική δύναμη (F_S): Παράλληλη στο επίπεδο. Προκαλεί αλλαγή σχήματος

Αν θ είναι η γωνία μεταξύ της δύναμης και του επιπέδου, ισχύουν οι σχέσεις

$$F_N = F \sin \theta \quad \text{και} \quad F_S = F \cos \theta$$



Η Έννοια της Τάσης (Stress)

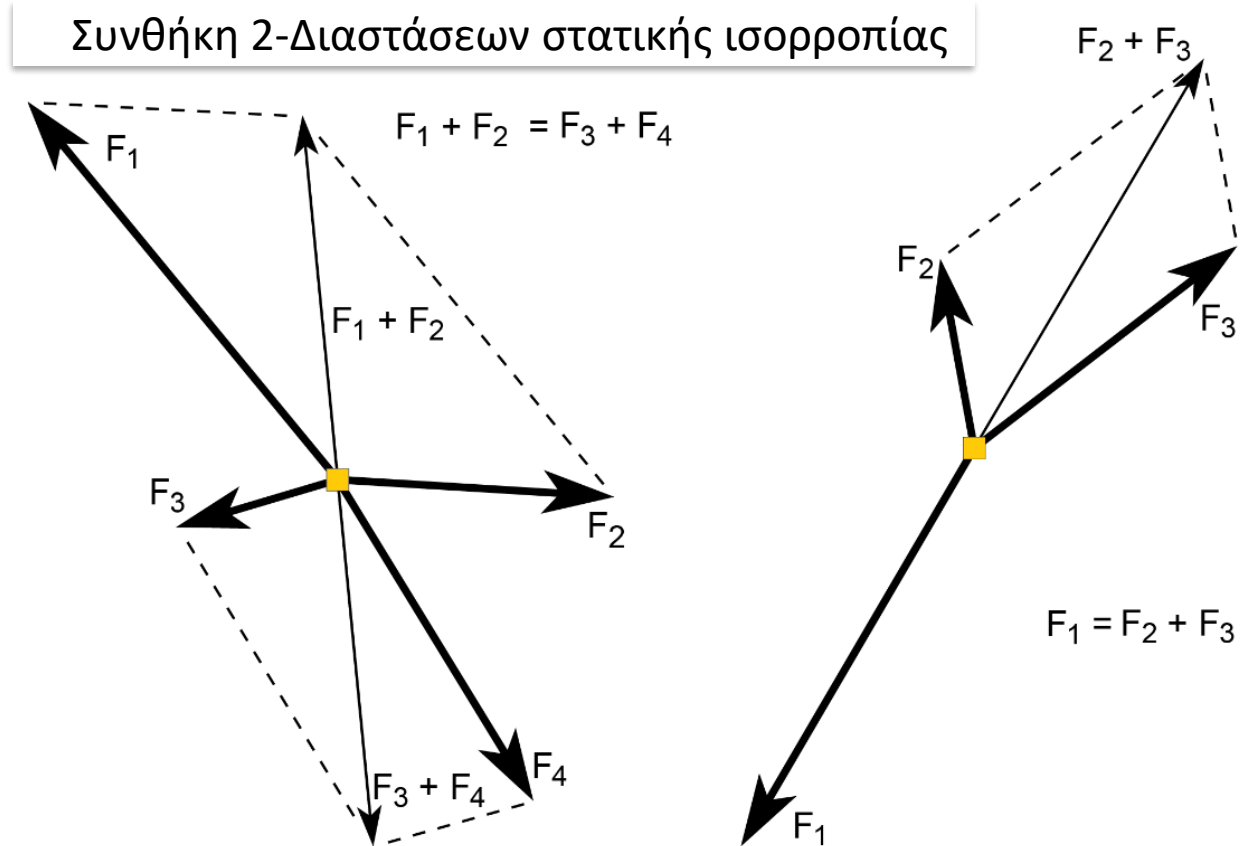
Η δύναμη που εφαρμόζεται στην εξωτερική επιφάνεια ενός σώματος δημιουργεί εσωτερικές δυνάμεις μέσα στο σώμα, το οποίο τότε βρίσκεται σε κατάσταση “τάσης”

Η τάση εφαρμόζεται όπως η τάση σε ένα ελατήριο:

Υπάρχουν ίσες και αντίθετες δυνάμεις στις άλλες (κρυφές) τρεις έδρες του κύβου, με ισορροπημένη δράση και αντίδραση μεταξύ γειτονικών τμημάτων.

Η τάση περιλαμβάνει τόσο τη δράση όσο και την αντίδραση.

Επομένως, η τάση είναι ένα ζεύγος ίσων και αντίθετων δυνάμεων που δρουν ανά μονάδα επιφάνειας.



Η Έννοια της Τάσης (Stress)

Η τάση είναι η εσωτερική “κατανομή” δυνάμεων που εγκαθίσταται στο σώμα λόγω εξωτερικών φορτίων.

Έχει ίδιες διαστάσεις με την πίεση (Pa) και στην γεωλογία συχνά δουλεύουμε σε MPa.

Η τάση ορίζεται ως η δύναμη ανά μονάδα επιφανείας και εκφράζει την ένταση της δύναμης σε ένα σημείο.

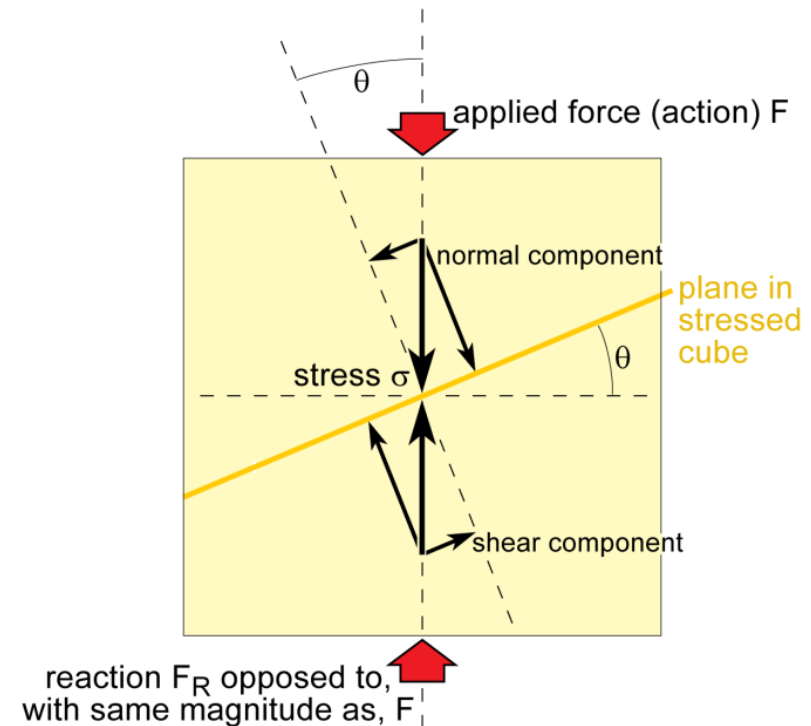
$$t = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

Μονάδα μέτρησης: Pascal (P_α).

Ανάλυση σε επίπεδο:

Ορθή / Κανονική Τάση (σ): Κάθετη στην επιφάνεια.

Διατμητική Τάση (τ): Παράλληλη στην επιφάνεια.



Τάση σε συνεχές μέσο

Η Τάση (stress) είναι αυτό που τείνει να παραμορφώσει ένα σώμα.

Τα μεγέθη των δυνάμεων που δρουν στις εξωτερικές επιφάνειες του κύβου εξαρτώνται από τα εμβαδά αυτών των επιφανειών.

Είναι χρήσιμο να έχουμε ένα μέτρο των παραμορφωτικών δυνάμεων που να μην εξαρτάται από το μέγεθος του κύβου που εξετάζουμε.

Ελκτική τάση (Traction)

Η ελκτική τάση $\mathbf{t}$ ορίζεται τυπικά ως δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που εφαρμόζεται σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο και σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση.:

- $\mathbf{t} = \mathbf{F} / A$ (περιλαμβάνει τόσο τη δράση όσο και την αντίδραση)

Για τοπικό (σημειακό) ορισμό χρησιμοποιείται το όριο του Cauchy:

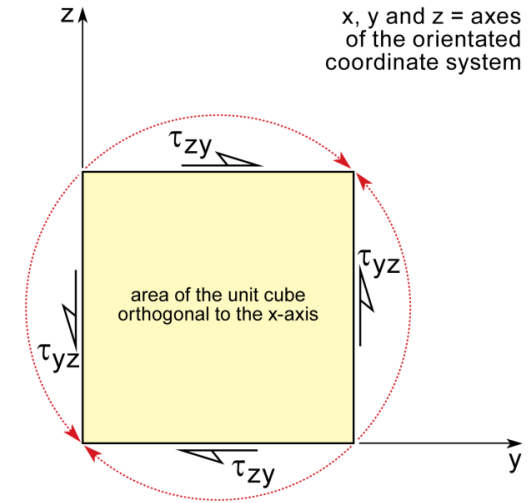
$$\bar{\mathbf{t}} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} (\Delta \mathbf{F} / \Delta A) = d\mathbf{F} / dA$$

και η δύναμη που αντιστοιχεί σε traction σε εμβαδό A με μοναδιαίο κανονικό $\mathbf{n}$ γράφεται:

- $\mathbf{F} = \mathbf{t} \cdot A \cdot \mathbf{n}$

Η ελκτική τάση είναι διάνυσμα και ορίζεται από τρία στοιχεία:

- το μέτρο της,
- τον προσανατολισμό (διεύθυνση) της,
- τον προσανατολισμό του επιπέδου πάνω στο οποίο εφαρμόζεται, ο οποίος ορίζεται από το μοναδιαίο διάνυσμα καθέτου $\mathbf{n}$.



Στο σχήμα φαίνεται τόσο η λογική του traction όσο και η ιδέα ότι οι διατμητικές συνιστώσες “ζευγαρώνουν” για να μην υπάρχει καθαρή ροπή στο στοιχείο (ισορροπία ροπών / συμμετρία διατμήσεων).

Δύο «κατευθυντικές» συνιστώσες: μία για τη διεύθυνση της δύναμης και μία για τον προσανατολισμό του επιπέδου.

Η ελκτική τάση μπορεί να μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο πάνω στο ίδιο επίπεδο και να είναι τελείως διαφορετική για το άπειρο πλήθος επιπέδων που διέρχονται από ένα δεδομένο σημείο.

Γι' αυτό, η ελκτική τάση εκφράζεται πάντα σε αναφορά προς ένα συγκεκριμένο επίπεδο.

Τανυστής Τάσης σ_{ij}

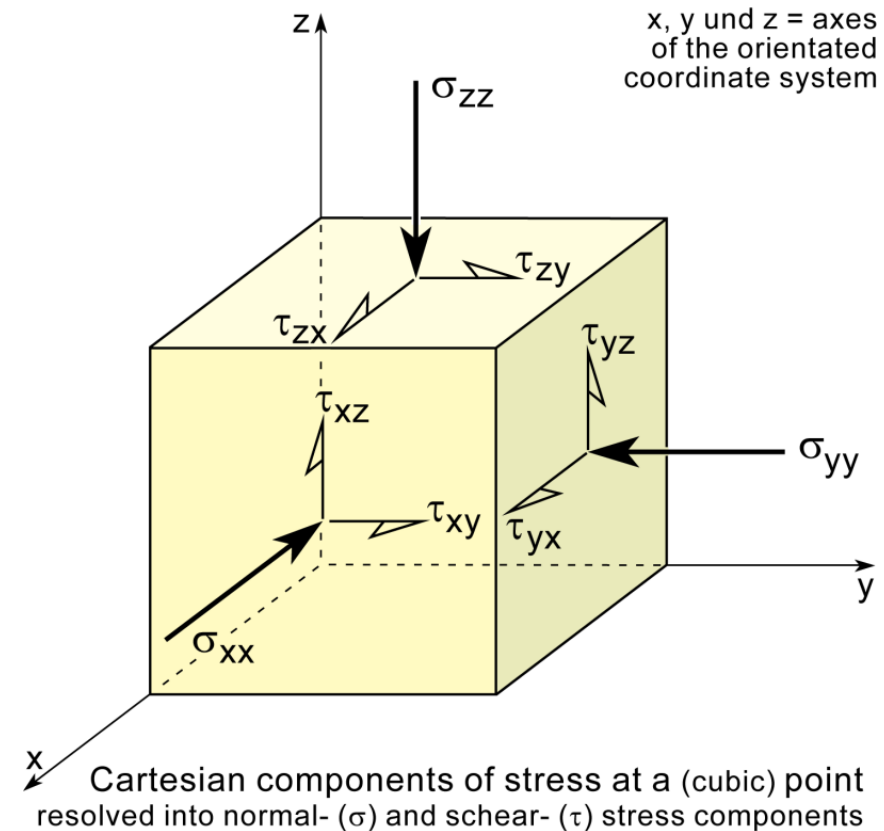
Σε ένα απειροστό κύβο, σε κάθε έδρα υπάρχουν:

- 1 κανονική τάση (σ) κάθετη στην έδρα
- 2 διατμητικές (τ) παράλληλες στην έδρα
- Συνολικά προκύπτουν 9 συνιστώσες, οι οποίες οργανώνονται σε πίνακα 3×3 (τανυστής 2ης τάξης).

Με ισορροπία/απουσία καθαρής περιστροφής προκύπτει συμμετρία:

$\tau_{ij} = \tau_{ji}$ (άρα 6 ανεξάρτητες παράμετροι).

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$



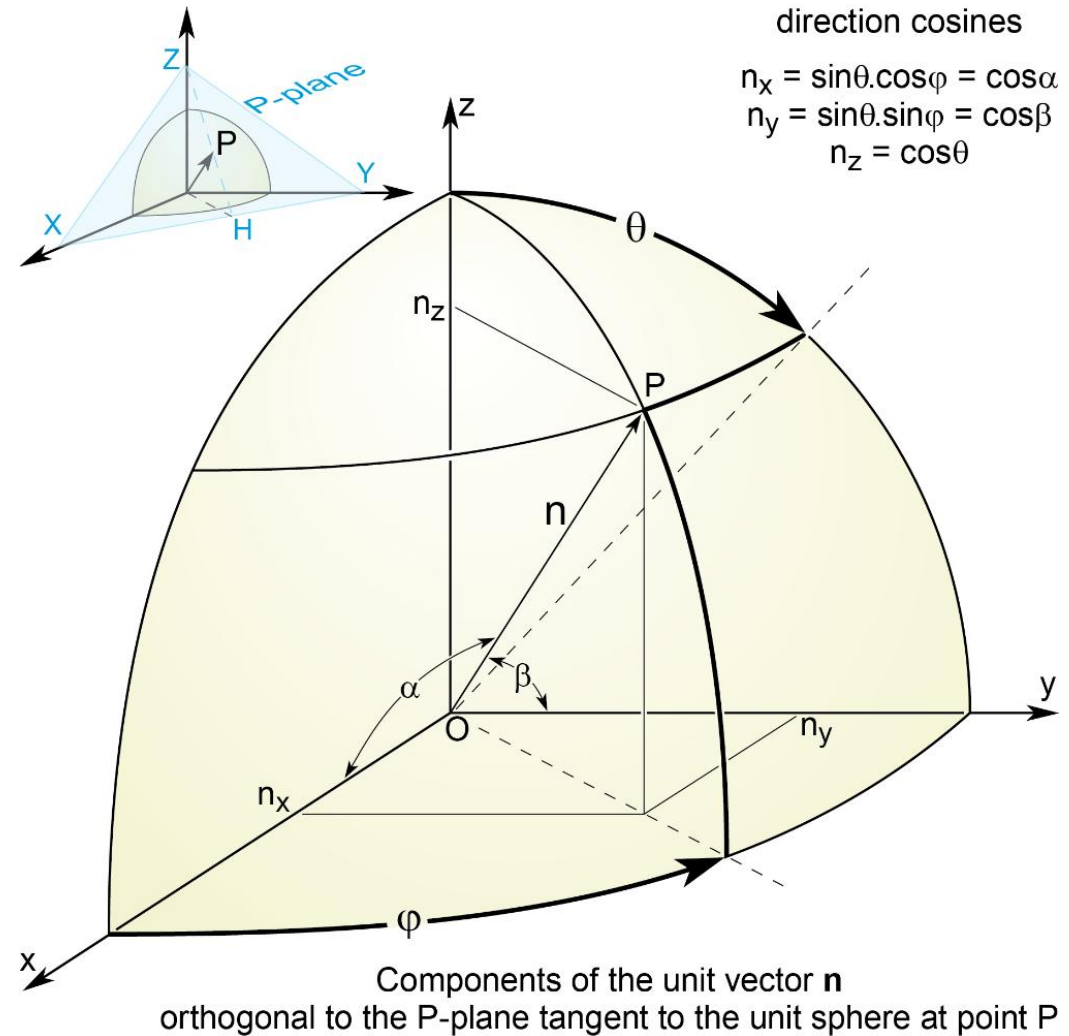
Τανυστής Τάσης σ_{ij}

Η θεμελιώδης σχέση (μορφή Cauchy) συνδέει το διάνυσμα τάσης **T** σε επίπεδο με κανονικό **n** μέσω του τανυστή:

$$\mathbf{T} = [\sigma_{ij}] \cdot \mathbf{n}$$

Στο σχήμα φαίνεται η γεωμετρία σε σχέση με το (n_X, n_Y, n_Z)

$$n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1$$



Ο τανυστής μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την τάση σε οποιοδήποτε επίπεδο μέσα στο πέτρωμα, ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό του. Αν γνωρίζουμε τον τανυστή, μπορούμε να βρούμε:

1. **Τις Κύριες Τάσεις :** Τις διευθύνσεις δηλαδή όπου η πίεση είναι μέγιστη ή ελάχιστη και η διάτμηση μηδενίζεται.
2. **Την Αποκλίνουσα Τάση (Deviatoric Stress):** Το τμήμα εκείνο της τάσης που ευθύνεται για την αλλαγή σχήματος (παραμόρφωση) του πετρώματος.

Δηλαδή: Αν η δύναμη είναι μια απλή ώθηση, ο τανυστής είναι ο πλήρης χάρτης όλων των ωθήσεων και των τριβών που δέχεται ένα σώμα από όλες τις πλευρές του ταυτόχρονα.

Κύριες Τάσεις (Principal Stresses)

Ο τανυστής της τάσης εξαρτάται από το σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) που επιλέγουμε.

Ωστόσο, η φυσική πραγματικότητα (το πόσο πιέζεται το πέτρωμα) είναι ανεξάρτητη από το πώς το κοιτάμε.

Υπάρχει πάντα ένας συγκεκριμένος προσανατολισμός όπου:

- Όλες οι **διατμητικές τάσεις** $\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$ μηδενίζονται.
- Απομένουν μόνο **τρεις ορθές τάσεις** στους άξονες.

Οι άξονες αυτοί ονομάζονται **Κύριοι Άξονες Τάσης** και οι αντίστοιχες ορθές τάσεις είναι οι **Κύριες Τάσεις**:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

Αυτές είναι οι Κύριες Τάσεις:

σ_1 (Μέγιστη): Η κατεύθυνση της μεγαλύτερης συμπίεσης.

σ_2 (Ενδιάμεση)

σ_3 (Ελάχιστη): Η κατεύθυνση της μικρότερης συμπίεσης.

Προσοχή στο Πρόσημο: Στη Γεωλογία, η συμπίεση (compression) θεωρείται θετική (+) και ο εφελκυσμός (tension) αρνητικός (-), αντίθετα με τη μηχανική, διότι στο εσωτερικό της Γης επικρατούν συμπιεστικές τάσεις

Διαχωρισμός Τάσεων

Κάθε κατάσταση τάσης μπορεί να διαχωριστεί σε:

1. Μέση Τάση ή Υδροστατική Πίεση (Mean Stress / Hydrostatic Pressure): Είναι το τμήμα της τάσης που προκαλεί μόνο αλλαγή στον όγκο (dilatation) του πετρώματος, χωρίς να αλλάζει το σχήμα του.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

2. Αποκλίνουσα Τάση (Deviatoric Stress): Είναι το τμήμα της τάσης που απομένει αν αφαιρέσουμε την υδροστατική πίεση από τη συνολική τάση. Αυτή η συνιστώσα είναι υπεύθυνη για την παραμόρφωση (distortion), δηλαδή την αλλαγή στο σχήμα του πετρώματος (πτυχές, ρήγματα).

Οι διατμητικές τάσεις είναι πάντα αποκλίνουσες.

Αν σ_{ij} είναι ο τανυστής της συνολικής τάσης και p η μέση τάση, τότε η αποκλίνουσα τάση S_{ij} δίνεται από τον τύπο:

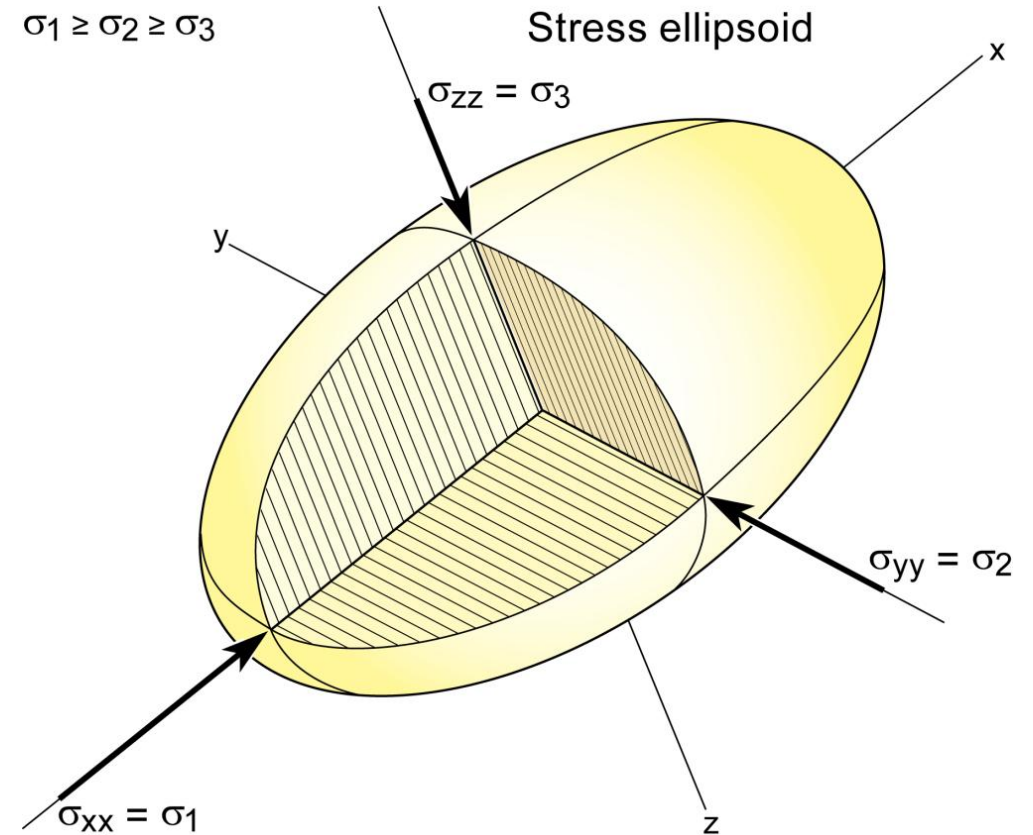
$$S_{ij} = \sigma_{ij} - p \cdot \delta_{ij} \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{for } i \neq j \\ 1 & \text{for } i = j \end{cases}$$

Ελλειψοειδές Τάσης (Stress Ellipsoid)

Αν σχεδιάσουμε τις κύριες τάσεις ως διανύσματα που ξεκινούν από ένα σημείο, οι άκρες τους ορίζουν το ελλειψοειδές.
Το ελλειψοειδές είναι η πλήρης γραφική αναπαράσταση της κατάστασης τάσης σε ένα σημείο σε τρεις διαστάσεις.

Ορίζεται από τρεις αμοιβαία κάθετους άξονες, που αντιστοιχούν στις Κύριες Τάσεις ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$)

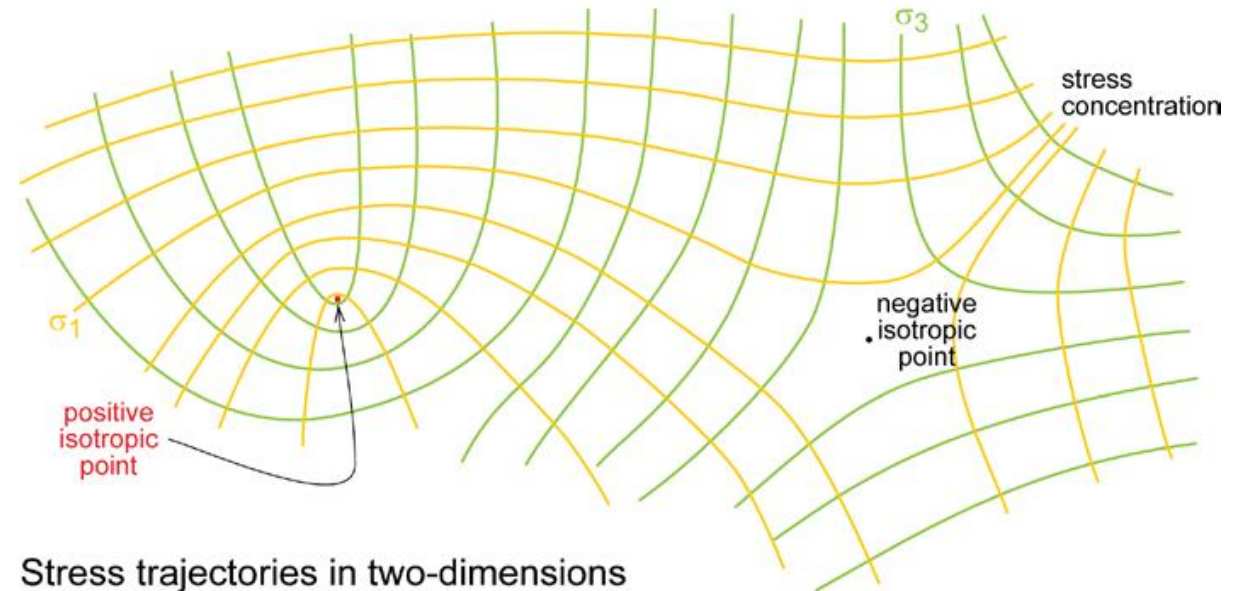
- σ_1 (Μέγιστη): Η κατεύθυνση της μεγαλύτερης συμπίεσης.
- σ_2 (Ενδιάμεση)
- σ_3 (Ελάχιστη): Η κατεύθυνση της μικρότερης συμπίεσης.
- Το μέγεθος και το σχήμα του ελλειψοειδούς περιγράφουν πλήρως τον τανυστή της τάσης. Η ακτίνα του ελλειψοειδούς σε οποιαδήποτε κατεύθυνση αντιπροσωπεύει το διάνυσμα της τάσης που ασκείται σε ένα επίπεδο κάθετο σε αυτή την ακτίνα
- Αν $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ έχουμε σφαίρα (υδροστατική πίεση - καμία παραμόρφωση σχήματος).
- Όσο πιο "πεπλατυσμένο" είναι το ελλειψοειδές, τόσο μεγαλύτερη είναι η **αποκλίνουσα τάση** και τόσο πιο πιθανό είναι το πέτρωμα να σπάσει ή να πτυχωθεί.



Ο τανυστής/ελλειψοειδές είναι ο "χάρτης" όλων των επιπέδων σε ένα σημείο

Πεδίο Τάσης και Τροχιές (Stress Field & Trajectories)

- **Πεδίο Τάσης:** Είναι η κατανομή των τανυστών τάσης σε όλα τα σημεία ενός σώματος. Στη γεωλογία, τα πεδία είναι συνήθως ανομοιογενή.
- **Τροχιές Τάσης (Stress Trajectories):** Είναι νοητές γραμμές που δείχνουν τη διεύθυνση των κύριων τάσεων σε κάθε σημείο του χώρου.
 - Οι τροχιές των σ_1 και σ_3 είναι πάντα κάθετες μεταξύ τους.
 - Η σύγκλιση των τροχιών δηλώνει συγκέντρωση τάσης (πιθανή ενίσχυση παραμόρφωσης).
 - Τα σημεία όπου οι κύριες τάσεις είναι ίσες ονομάζονται **ισότροπα σημεία** (isotropic points).
- **Γραμμές Ολίσθησης (Slip Lines):** Είναι οι γραμμές που σχηματίζουν γωνία (συνήθως 45°) με τις τροχιές τάσης και δείχνουν τις επιφάνειες μέγιστης διάτμησης, όπου είναι πιθανό να συμβεί ρήγμα.

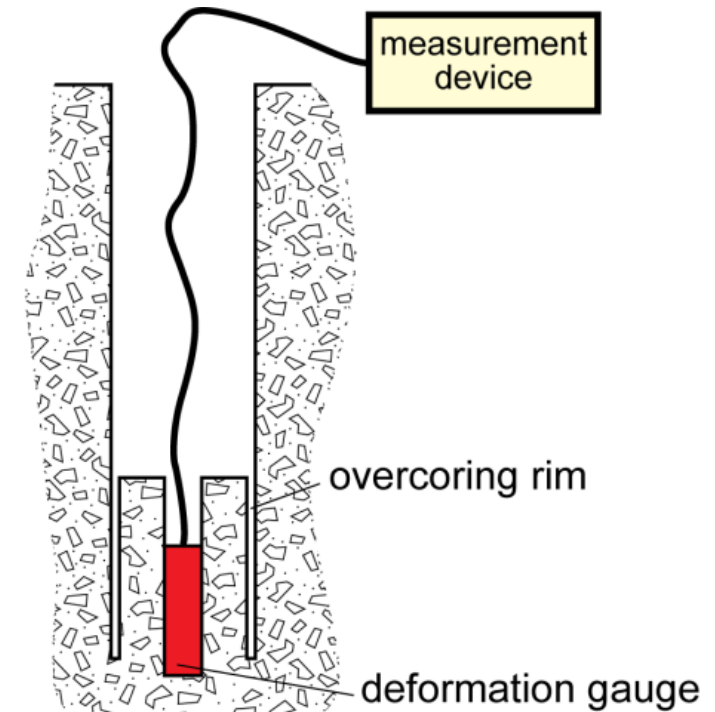


Μέτρηση της Τάσης (Stress Measurement)

Επειδή δεν μπορούμε να δούμε τις τάσεις, τις μετράμε έμμεσα μέσω της απόκρισης των πετρωμάτων:

1. Overcoring (Υπερπυρήνευση): Ανοίγουμε μια οπή, τοποθετούμε μετρητές παραμόρφωσης και στη συνέχεια κόβουμε (αποκολλάμε) τον κύλινδρο πετρώματος γύρω από την οπή. Μετρώντας την "ελαστική ανάκαμψη" (εκτόνωση) του πετρώματος όταν απελευθερώνεται από τις τάσεις, υπολογίζουμε το αρχικό πεδίο τάσης.

2. Υδραυλική Ρωγμάτωση (Hydraulic Fracturing): Σε γεωτρήσεις, πιέζουμε ρευστό μέχρι να σπάσει το τοίχωμα του πετρώματος. Η πίεση θραύσης (breakdown pressure) εξισώνεται με την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος συν την ελάχιστη οριζόντια τάση. Οι ρωγμές ανοίγουν κάθετα στην ελάχιστη τάση (σ_3)



Principle of stress measurement by overcoring

Η Έννοια της Παραμόρφωσης (Strain)

Τάση (Stress) είναι η δύναμη που ασκείται ανά μονάδα επιφάνειας

Παραμόρφωση (Strain) είναι η φυσική μεταβολή που προκύπτει ως απόκριση σε αυτή τη δύναμη.

Όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική αντοχή του πετρώματος, η παραμόρφωση εκδηλώνεται με τη μορφή αλλαγής του σχήματος ή του όγκου του πετρώματος που προκαλείται από την τάση. Η παραμόρφωση στα πετρώματα μπορεί να προκαλέσει μεταβολή στον όγκο ή/και στο σχήμα τους. Μπορεί επίσης να προκαλέσει τη θραύση (διάρρηξη) ενός πετρώματος.

Στη Γεωφυσική, δεν μας ενδιαφέρει απλώς αν ένα μπλοκ πετρώματος μετακινήθηκε (μετάθεση), αλλά αν άλλαξε σχήμα ή μέγεθος.

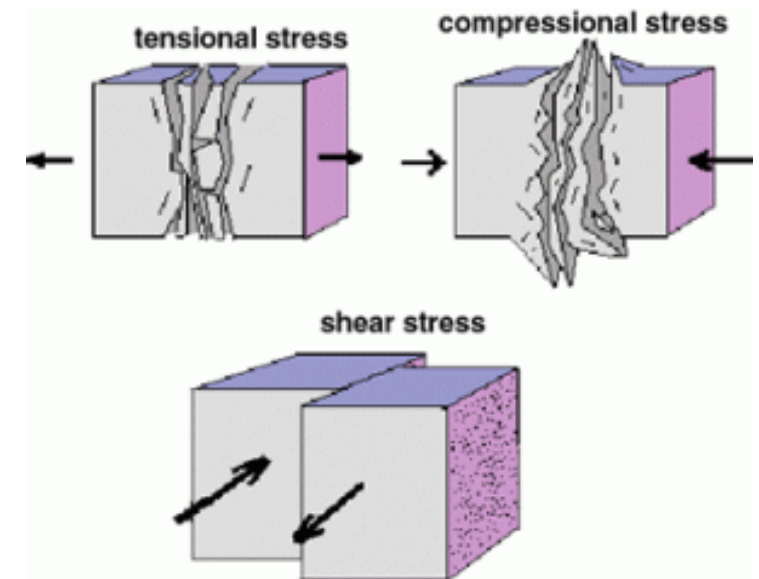
Έστω ένα τετράγωνο στο έδαφος με πλευρές dx και dy . Μετά από έναν σεισμό ή λόγω τεκτονικής φόρτισης, το τετράγωνο αυτό παραμορφώνεται σε παραλληλόγραμμο.

- Η παραμόρφωση μετράει τη *σχετική* μεταβολή των αποστάσεων.

Ορισμός Απλής Παραμόρφωσης

Αν έχουμε μια ράβδο μήκους L που επιμηκύνεται κατά ΔL , η αξονική παραμόρφωση ϵ ορίζεται ως:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$



Από τάση (stress) σε παραμόρφωση (strain)

- Το Mohr μας δίνει *πότε/πώς* αστοχεί ένα ρήγμα
- Οι γεωδαιτικές τεχνικές μετρούν **μετατοπίσεις/ταχύτητες** → από αυτές βγάζουμε ρυθμό παραμόρφωσης (strain-rate)

Μετρήσιμα μεγέθη

- Μετατόπιση: $\Delta u = (\Delta E, \Delta N, \Delta U)$ Ταχύτητα: $v = (V_E, V_N, V_U)$ (mm/yr)
- Παραμόρφωση (οριζόντια): από χωρικές παράγωγους $\partial V / \partial x$, $\partial V / \partial y$

Τι κερδίζουμε: πού “συγκεντρώνεται” παραμόρφωση, ποια είναι η **διεύθυνση εφελκυσμού/συμπίεσης**, πού υπάρχει **διατμητική συνιστώσα**

Μετάφραση σε τεκτονική: πεδίο παραμόρφωσης (strain) → πιθανός τύπος ρηγμάτων (κανονικό / ανάστροφο / οριζόντιας ολίσθησης) και προσανατολισμοί

Σύγχρονες τεχνικές μέτρησης παραμόρφωσης

GNSS/GPS (συνεχές ή καμπάνια)

- Μετρά **3D μετατοπίσεις σημείων** (E, N, U) → **ταχύτητες** (mm/yr)
- Πολύ καλή για **μακροχρόνια** (interseismic) παραμόρφωση & σεισμικά άλματα

InSAR (Δορυφορική Ραντάρ Συμβολομετρία)

- Μετρά μεταβολή απόστασης **κατά μήκος της γραμμής θέασης (LOS)** → “χάρτης” παραμόρφωσης
- Υψηλή χωρική ανάλυση, ιδανική για **co-seismic / post-seismic**, καθιζήσεις, ηφαιστειακή παρακολούθηση

Optical image correlation (δορυφορικές/αερο φωτογραφίες)

- Μετρά **οριζόντιες μετατοπίσεις** από συσχέτιση εικόνων (feature tracking)
- Χρήσιμο σε μεγάλες μετατοπίσεις (π.χ. σεισμοί)

Leveling / Tide gauges / Gravimetry (συμπληρωματικά)

- Πολύ ακριβή για **κατακόρυφες** μεταβολές σε τοπικές γραμμές/σταθμούς
- Συνδυάζονται για ερμηνεία καθίζησης/ισοστασίας/υδροφόρων

GNSS/GPS: από χρονοσειρές θέσης σε strain-rate

Δεδομένα

Συνεχή GNSS (cGNSS) ή καμπάνιες → χρονοσειρές θέσης (E,N,U)

Επεξεργασία

Εκτίμηση ταχυτήτων VE, VN, VU + αβεβαιότητες

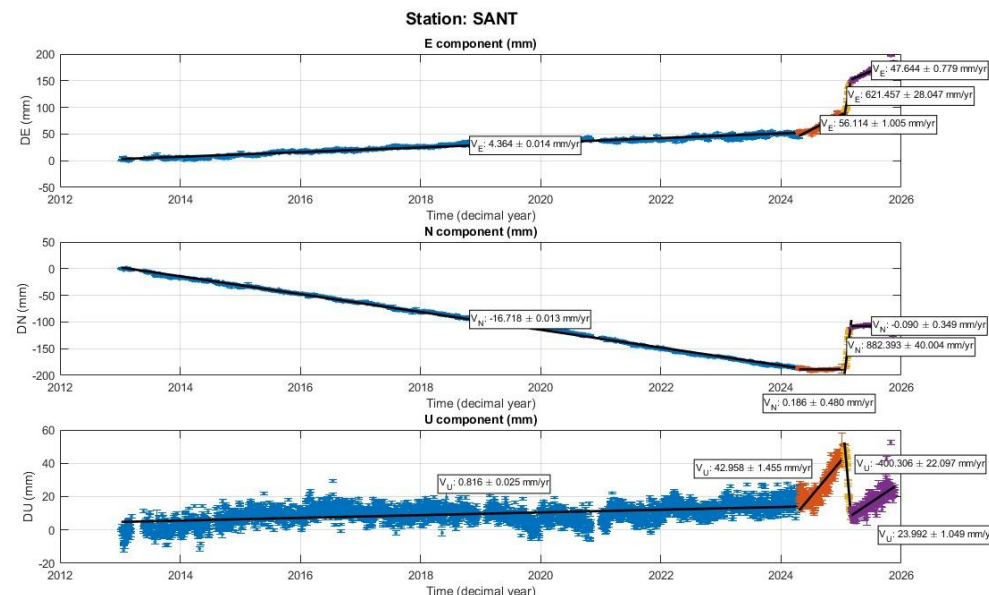
Ορισμός πλαισίου αναφοράς (π.χ. “σταθερή πλάκα”) → υπολειπόμενες τεκτονικές ταχύτητες

Από πεδίο ταχυτήτων σε παραμόρφωση

- Υπολογισμός βαθμίδων: $\partial VE/\partial x$, $\partial VE/\partial y$, $\partial VN/\partial x$, $\partial VN/\partial y$
- Ανάλυση σε:
 - Τανυστής παραμόρφωσης (συμμετρικό μέρος) → κύριες επιμηκύνσεις/βραχύνσεις + διευθύνσεις (έλειψη παραμόρφωσης)
 - Περιστροφή (αντισυμμετρικό μέρος) → περιστροφή τεκτονικών μονάδων (blocks)

Παράγωγα προϊόντα (για χάρτες)

- Κύριοι άξονες παραμόρφωσης + προσανατολισμός
- Maximum shear ($\approx e_1 - e_2$) και area strain ($\approx e_1 + e_2$)



Πλεονεκτήματα:

- Σύγκλιση/διάτμηση σε κλίμακες ετών–δεκαετιών ανάμεσα σε μεγάλους σεισμούς,
- Συν-σεισμική μετακίνηση σε μεγάλους σεισμούς

InSAR: LOS μετατοπίσεις, time series

Μεταβολή απόστασης δορυφόρου–εδάφους κατά **γραμμή θέασης (LOS)** → πολύ πυκνή χωρική πληροφορία

Τι παράγουμε:

Interferograms → “χάρτες” μετατόπισης (co-seismic / post-seismic / καθιζήσεις)

Time series (PSI/SBAS) → ρυθμοί παραμόρφωσης στο χρόνο

Γεωμετρία/ευαισθησία

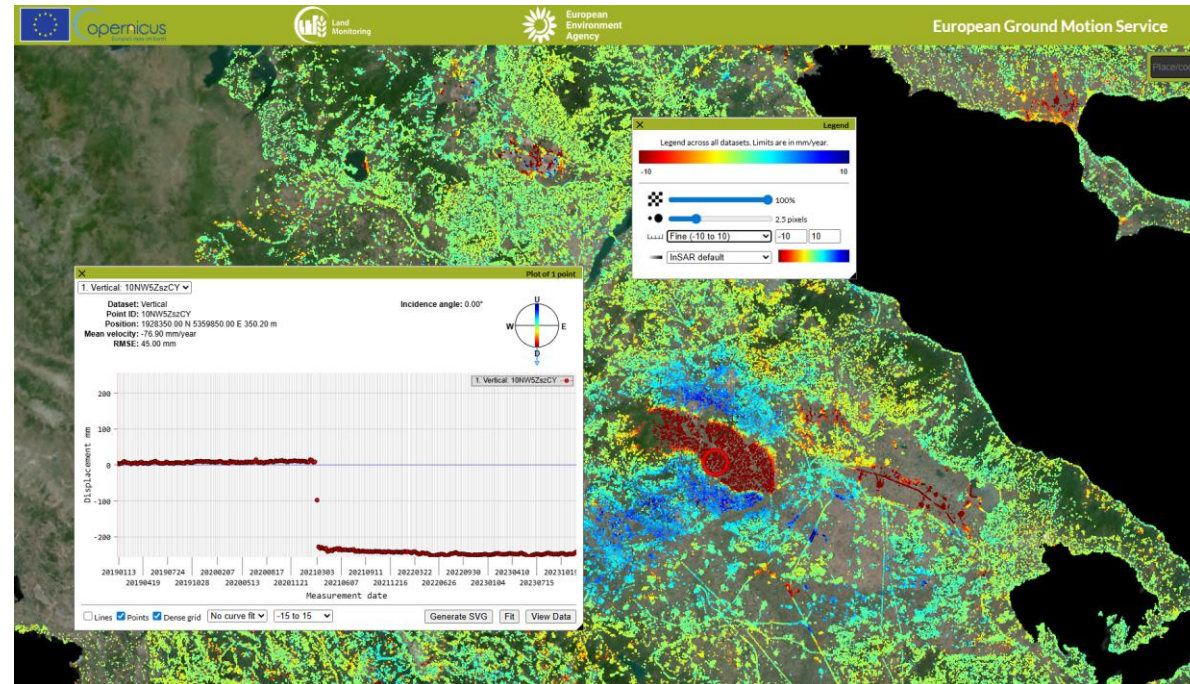
- LOS “βλέπει” συνδυασμό κατακόρυφης + οριζόντιας συνιστώσας κατά τη διεύθυνση θέασης
- Ascending + descending → καλύτερη διάσπαση (συνήθως U και E πιο αξιόπιστα από N)

Περιορισμοί/θόρυβοι:

Ατμόσφαιρα, decorrelation (βλάστηση/χιόνι), orbital ramps

Πού είναι πρακτικό:

Χαρτογράφηση παραμόρφωσης σε μεγάλη έκταση: ρήγματα, ηφαίστεια, καθιζήσεις από ρευστά/εξόρυξη



Ο Τανυστής Παραμόρφωσης (ϵ_{ij})

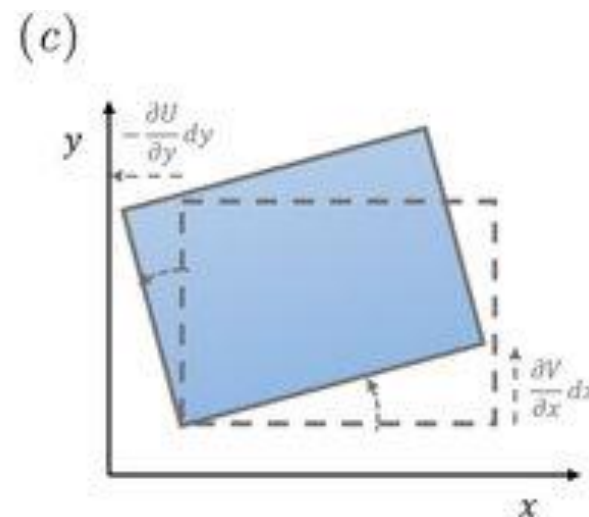
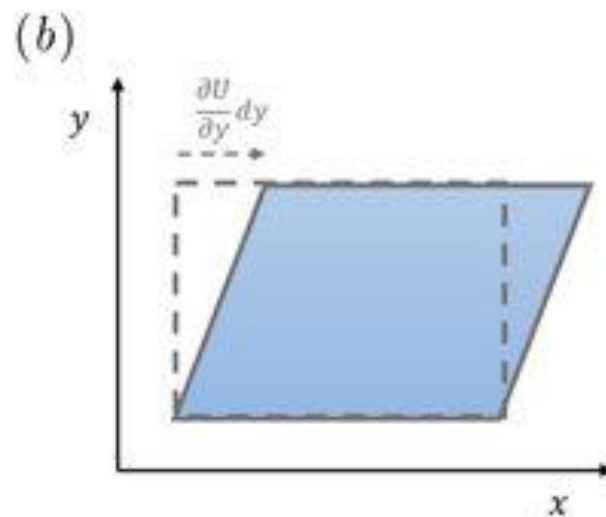
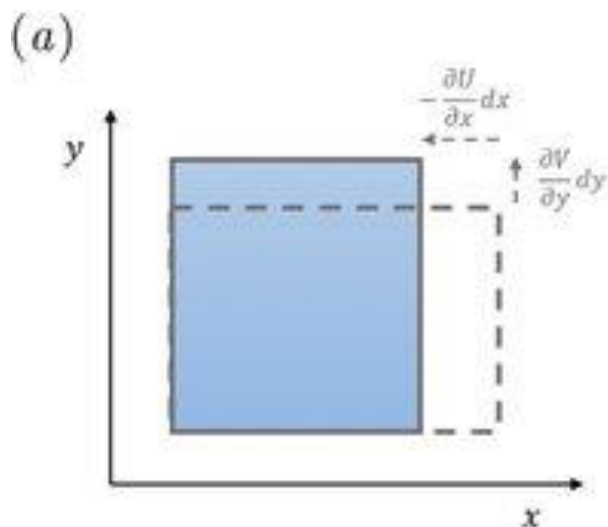
Επειδή η Γη παραμορφώνεται στις τρεις διαστάσεις, χρησιμοποιούμε έναν τανυστή 2^{ης} τάξης για να περιγράψουμε την κατάσταση σε ένα σημείο.

Στο επίπεδο (2D), ο τανυστής είναι ένας πίνακας 2x2

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{pmatrix}$$

$\epsilon_{xx}\epsilon_{yy}$ (Ορθές παραμορφώσεις): Περιγράφουν την επιμήκυνση ή συστολή κατά μήκος των αξόνων X (Ανατολή) και Y (Βορράς).

ϵ_{xy} (Διατμητική παραμόρφωση): Περιγράφει τη μεταβολή των γωνιών (αλλαγή σχήματος). Λόγω ισορροπίας ροπών, ισχύει $\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}$



Ανάλυση των Συνιστωσών του Τανυστή

Φυσική Σημασία των ϵ_{ij}

- Ορθές Παραμορφώσεις (Normal Strains): $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$

Περιγράφουν τη σχετική μεταβολή μήκους κατά μήκος των κύριων αξόνων (X: Ανατολή, Y: Βορράς).

$$\epsilon_{xx} = \frac{\Delta dx}{dx} \quad \epsilon_{yy} = \frac{\Delta dy}{dy}$$

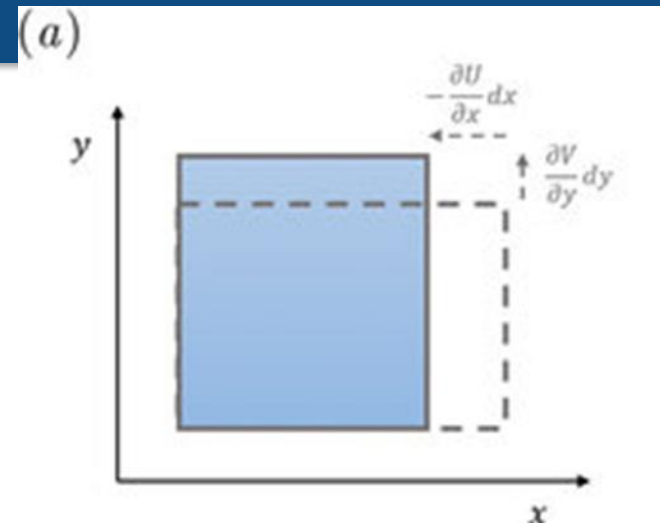
Πρόσημο: (+) Εφελκυσμός (Επιμήκυνση), (-) Συμπίεση (Συστολή).

- Διατμητικές Παραμορφώσεις (Shear Strains): ϵ_{xy}

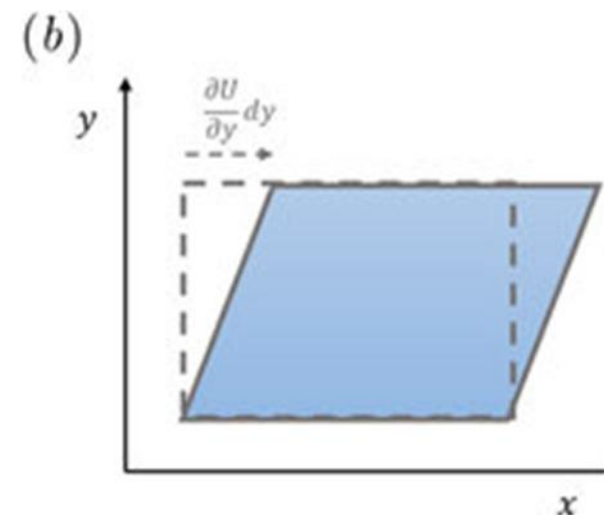
Περιγράφουν τη μεταβολή των γωνιών (αλλαγή σχήματος).

Μέτρο της "παραμόρφωσης γωνίας" μεταξύ δύο αρχικά κάθετων ευθειών.

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta dx}{dy} + \frac{\Delta dy}{dx} \right)$$



$\epsilon_{xx} > 0$ (το τετράγωνο γίνεται ορθογώνιο, τεντωμένο στον άξονα X).



$\epsilon_{xy} > 0$ (το τετράγωνο γίνεται ρόμβος, "γέρνει")

Σύνδεση με Μετρήσεις GPS/GNSS

Οι σταθμοί GPS μας δίνουν ταχύτητες (v_x, v_y) ή μετατοπίσεις (u, v) .

Για να βρούμε την παραμόρφωση, εξετάζουμε πώς μεταβάλλεται η μετατόπιση στον χώρο (βαθμίδα μετατόπισης).

Αν έχουμε ένα δίκτυο σταθμών, η παραμόρφωση υπολογίζεται από τις μερικές παραγώγους:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

	Φυσική Σημασία	GPS Δεδομένα
Μετατόπιση	Πόσο μετακινήθηκε ο σταθμός	Διαφορά θέσης $(x_2 - x_1)$
Παραμόρφωση	Πόσο άλλαξε η απόσταση μεταξύ σταθμών	Κλίση του πεδίου ταχυτήτων
Κύριες Τάσεις	Διευθύνσεις μέγιστης πίεσης/εφελκυσμού	Ιδιοτιμές του τανυστή

Πώς Ερμηνεύουμε τον Τανυστή:

Οι τιμές ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy} εξαρτώνται από το πώς ορίσαμε τους άξονές μας (π.χ. αν ο X είναι Ανατολή ή Βορειοανατολή).

Κύριοι Άξονες: Υπάρχει πάντα ένα σύστημα συντεταγμένων όπου η διάτμηση μηδενίζεται $\epsilon'_{xy} = 0$

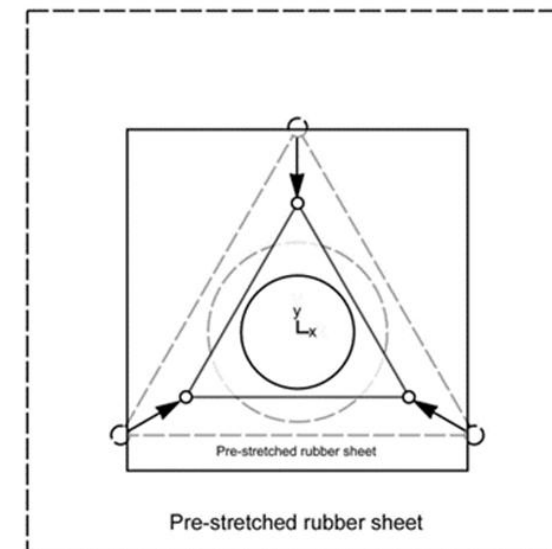
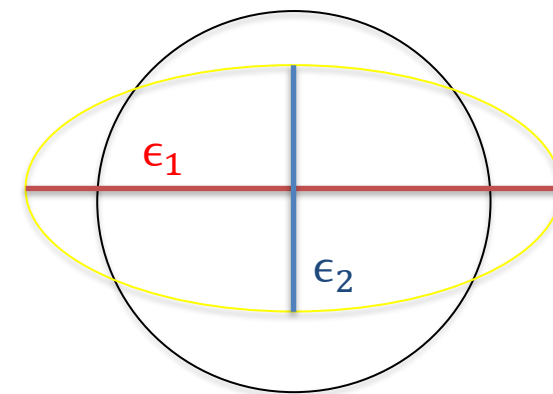
Οι ορθές παραμορφώσεις σε αυτό το σύστημα ονομάζονται
Κύριες Παραμορφώσεις: (ϵ_1, ϵ_2)

ϵ_1 : Μέγιστη επιμήκυνση.

ϵ_2 : Ελάχιστη επιμήκυνση (ή μέγιστη συμπίεση).

Αναλλοίωτες (Invariants): Μεγέθη που δεν αλλάζουν με την περιστροφή των αξόνων:

- Διαστολή (Dilatation): $\Delta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} = \epsilon_1 + \epsilon_2$ (Σχετική μεταβολή εμβαδού/όγκου).
- Αν $\Delta > 0$ η περιοχή «ανοίγει»
- Αν $\Delta < 0$ η περιοχή «κλείνει»



Παράδειγμα:

Τρεις σταθμοί GPS που σχηματίζουν ένα τρίγωνο (GPS Triangle Strain)

1. Ομοιόμορφη Επέκταση (Rifting)

Αν ο σταθμός A είναι σταθερός και ο σταθμός B (στα ανατολικά του) κινείται προς τα ανατολικά με 10 mm/yr, τότε έχουμε θετική ορθή παραμόρφωση ϵ_{xx} (εφελκυσμός).

Αυτό συμβαίνει σε περιοχές όπως ο Κορινθιακός Κόλπος.

2. Πλάγια Ολίσθηση (Strike-slip)

Αν έχουμε ένα ρήγμα σαν τον Άγιο Ανδρέα ή το Ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας: Οι σταθμοί στη μία πλευρά κινούνται δυτικά και στην άλλη ανατολικά.

Οι ορθές παραμορφώσεις ϵ_{xx} , ϵ_{yy} μπορεί να είναι μηδενικές, αλλά η διατμητική παραμόρφωση ϵ_{xy} θα είναι μέγιστη.

Το Μαθηματικό Μοντέλο

Έστω τρεις σταθμοί GPS με συντεταγμένες (x_i, y_i) και ταχύτητες (v_{xi}, v_{yi})

Η ταχύτητα σε οποιοδήποτε σημείο (x, y) μέσα στο τρίγωνο περιγράφεται από τη γραμμική σχέση:

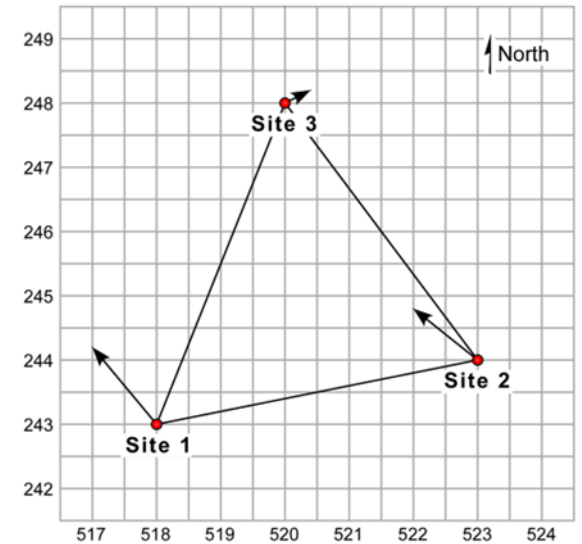
$$v_x = v_{x0} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v_x}{\partial y} \Delta y$$

$$v_y = v_{y0} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y$$

v_{x0}, v_{y0} : Η ταχύτητα ενός κεντρικού σημείου αναφοράς (π.χ. το κέντρο βάρους του τριγώνου).

$\Delta x, \Delta y$: Η απόσταση από το σημείο αναφοράς.

Οι μερικές παράγωγοι είναι τα στοιχεία του τανυστή βαθμίδας ταχύτητας $\mathbf{L}$.



Τανυστής βαθμίδας ταχύτητας L

Στη Γεωφυσική, όταν κοιτάμε ένα δίκτυο GPS, η κίνηση ενός σημείου είναι ένας συνδυασμός από παραμόρφωση (αλλαγή σχήματος) και περιστροφή.

Ο τανυστής L περιέχει τις χωρικές μεταβολές της ταχύτητας.

$$L = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} \end{pmatrix}$$

Μπορούμε να τον γράψουμε ως άθροισμα δύο άλλων πινάκων:

$$L = \epsilon + \omega$$

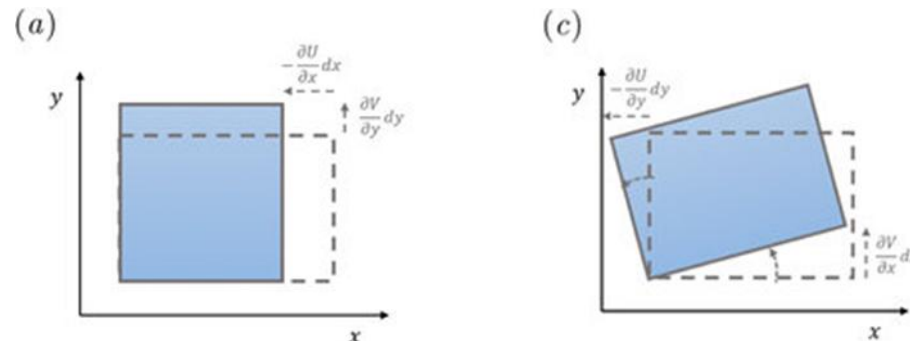
ϵ (Συμμετρικός Τανυστής): Περιγράφει την καθαρή παραμόρφωση (Strain Rate).

ω (Αντισυμμετρικός Τανυστής): Περιγράφει την περιστροφή ως στερεό σώμα (Vorticity).

Έστω ένα τετράγωνο στο έδαφος.

- Αν το τετράγωνο γίνει παραλληλόγραμμο αλλά οι διαγώνιοί του παραμείνουν στην ίδια μέση κατεύθυνση, έχουμε μόνο ϵ .
- Αν το τετράγωνο παραμείνει τετράγωνο αλλά στρίψει σαν δίσκος, έχουμε μόνο ω

Στη φύση (π.χ. σε ένα ρήγμα), έχουμε και τα δύο.



Τανυστής βαθμίδας ταχύτητας L

Ο Τανυστής Ρυθμού Παραμόρφωσης (ϵ_{ij})

Είναι το συμμετρικό μέρος: $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(L_{ij} + L_{ji})$

Σε 2 διαστάσεις (X: Ανατολή, Y: Βορράς):

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial v_y}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ Μας λένε αν η Γη "τεντώνεται" ή "συμπιέζεται" στους άξονες A-Δ και B-N.

ϵ_{xy} Μας λέει πόσο "γέρνει" το τετράγωνό μας. Είναι η διάτμηση.

Τανυστής βαθμίδας ταχύτητας L

Ο Τανυστής Περιστροφής (ω_{ij})

Είναι το αντισυμμετρικό μέρος: $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(L_{ij} - L_{ji})$

Σε 2 διαστάσεις (X: Ανατολή, Y: Βορράς):

$$\omega = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x}\right) \\ -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x}\right) & 0 \end{pmatrix}$$

Αν το GPS δείχνει μεγάλη περιστροφή (ω) αλλά μικρή παραμόρφωση (ϵ), τότε ένα τεκτονικό μπλοκ (π.χ. το μικρο-πλακίδιο της Πελοποννήσου) απλώς στρίβει χωρίς να συσσωρεύει εσωτερικές τάσεις που οδηγούν σε μεγάλους σεισμούς μέσα στο μπλοκ.

Παράδειγμα

Σε μια ζώνη ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης (π.χ. Ρήγμα Βόρειας Ανατολίας).

Αν υπολογισθεί τον L εκεί έχουμε:

- 1. ϵ_{xy} είναι μεγάλο: Αυτό σημαίνει ότι το πέτρωμα παραμορφώνεται και αποθηκεύει ενέργεια (σαν να προσπαθούμε να λυγίσουμε μια γόμα).
- 2. ω_{xy} είναι επίσης μεγάλο: Αυτό σημαίνει ότι ολόκληρη η περιοχή "στροβιλίζεται" λόγω της κίνησης των πλακών.

Η Σημασία της "Καθαρής" σε σχέση με την "Απλή" Διάτμηση

- Καθαρή Διάτμηση: $\omega = 0$. Το σώμα συμπιέζεται από τη μία και τεντώνεται από την άλλη χωρίς να στρίβει.
- Απλή Διάτμηση: $\epsilon = \omega$ Αυτό συμβαίνει ακριβώς πάνω στα μεγάλα ρήγματα.

$L = \epsilon + \omega$	Φαινόμενο	Σχέση με Σεισμούς
Συμμετρικό (ϵ)	Παραμόρφωση σχήματος/όγκου	Άμεση: Δημιουργεί τάσεις (Stress)
Αντισυμμετρικό (ω)	Περιστροφή στερεού σώματος	Έμμεση: Δείχνει την κινηματική των πλακών

Παραμόρφωση και Σεισμικά Ρήγματα

Αν ξέρουμε το πάχος του ελαστικού φλοιού H και τις ελαστικές σταθερές του πετρώματος (μέτρο Young E), μπορούμε να υπολογίσουμε πόση τάση (σ) συσσωρεύεται κάθε χρόνο:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

η Τάση (Stress) είναι η "αιτία" (η δύναμη που ασκείται) και η Παραμόρφωση (Strain) είναι το "αποτέλεσμα" (η αλλαγή στο σχήμα).

Παραμόρφωση - Strain (GPS): Μας δείχνει πόσο κοντά είμαστε στο όριο θραύσης.

Τάση - Stress (Φυσική): Μας δείχνει την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη και περιμένει να απελευθερωθεί.

Παράδειγμα: Από τις μετρήσεις GPS, παρατηρούμε ότι δύο σταθμοί που απέχουν 50km απομακρύνονται κατά 5mm κάθε χρόνο.

Να προσδιορισθεί η παραμόρφωση και η τάση στην περιοχή, αν θεωρηθεί ότι το πέτρωμα είναι γρανίτης με μέτρο ελαστικότητας $E = 50 \text{ GPa} (50 \times 10^9 \text{ Pa})$

Πεδίο Τάσεων – Πεδίο Παραμόρφωσης

- **Πεδίο τάσεων (σεισμολογία):** εκτιμά τη **διεύθυνση και σχετικές αναλογίες** των κύριων τάσεων $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (συχνά από μηχανισμούς γένεσης/αναστροφές τάσεων). Είναι πιο “δυναμικό”: αφορά το τι φορτίζει τα ρήγματα (πότε και σε ποιο επίπεδο είναι ευνοϊκή η ολίσθηση).
- **Πεδίο Παραμόρφωσης (GPS/GNSS):** μετρά το αποτέλεσμα, χωρικές μεταβολές ταχυτήτων, ρυθμούς παραμόρφωσης (διαστολή, διάτμηση) στο άνω μέρος του φλοιού.

Πώς γίνεται η συσχέτιση

To stress “φορτίζει”, το strain είναι το “αποτύπωμα” της παραμόρφωσης

1. Από stress σε “αναμενόμενη” παραμόρφωση
Σε απλή (ισότροπη) ελαστικότητα/ιξώδη ροή, η παραμόρφωση τείνει να ευθυγραμμίζεται με τις κύριες τάσεις:
 - Διεύθυνση μέγιστης οριζόντιας τάσης σ_{max} (ή σ_1 αν είναι οριζόντια) $\leftrightarrow$ περίπου *διεύθυνση συμπίεσης* (αρνητική κύρια επιμήκυνση).
 - Διεύθυνση ελάχιστης οριζόντιας τάσης σ_{min} (ή σ_3 αν είναι οριζόντια) $\leftrightarrow$ περίπου *διεύθυνση εφελκυσμού* (θετική κύρια επιμήκυνση).
2. Καθεστώς Ρηγμάτων: Στα περισσότερα τεκτονικά περιβάλλοντα, μία κύρια τάση είναι κοντά στην κατακόρυφη. Τότε:
 - Κανονικά Ρήγματα: σ_1 κατακόρυφη $\rightarrow$ οριζόντια σ_3 δείχνει *διεύθυνση εφελκυσμού*.
GPS: ο μεγάλος άξονας διάτασης ($e_1 > 0$) τείνει να είναι *παράλληλος* στη σ_3 .
 - Ανάστροφα ρήγματα: σ_3 κατακόρυφη $\rightarrow$ οριζόντια σ_1 δείχνει *διεύθυνση συμπίεσης*.
GPS: ο άξονας βράχυνσης ($e_2 < 0$) τείνει να είναι *παράλληλος* στη σ_1 .
 - Οριζόντια ολίσθηση: σ_2 κατακόρυφη $\rightarrow$ οι οριζόντιες σ_1, σ_3 δίνουν *συμπίεση/εφελκυσμό* στο οριζόντιο επίπεδο.
GNSS/GPS: κύριοι άξονες της παραμόρφωσης (strain, έλλειψη παραμόρφωσης) τείνουν να ευθυγραμμίζονται με σ_1 (βράχυνση) και σ_3 (διάταση), ενώ η μέγιστη διάτμηση εμφανίζεται $\sim 45^\circ$ από αυτούς.

Παράδειγμα

3 GPS σταθμοί

Συντεταγμένες (km):

$$A = (0,0)$$

$$B = (10,0)$$

$$C = (0,8)$$

Ταχύτητες σταθμών:

$$v_A = (-2, 0) \text{ mm/yr}$$

$$v_B = (2, 0) \text{ mm/yr}$$

$$v_C = (-1, 0.5) \text{ mm/yr}$$

Οι σταθμοί GPS μας δίνουν ταχύτητες (v_x, v_y) ή μετατοπίσεις (u, v) . Για να βρούμε την παραμόρφωση, εξετάζουμε πώς μεταβάλλεται η μετατόπιση στον χώρο (βαθμίδα μετατόπισης).

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

Θεωρούμε ότι το πεδίο ταχυτήτων περιγράφεται από:

$$u(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y \quad v(x, y) = b_0 + b_1 x + b_2 y$$

όπου: u : ταχύτητα κατά x v : ταχύτητα κατά y

$$\dot{L} = \vec{v} \cdot \hat{e}$$

$$L = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} \end{pmatrix} \quad \epsilon = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial v_y}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ Μας λένε αν η Γη "τεντώνεται" ή "συμπιέζεται" στους άξονες A-Δ και B-N.

ϵ_{xy} Μας λέει πόσο "γέρνει" το τετράγωνό μας. Είναι η διάτμηση.

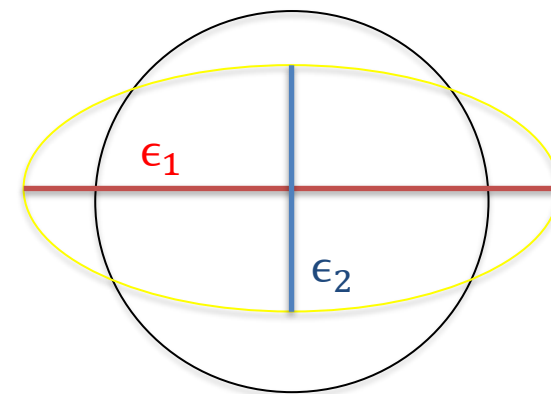
Πώς Ερμηνεύουμε τον Τανυστή:

Οι τιμές ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy} εξαρτώνται από το πώς ορίσαμε τους άξονές μας (π.χ. αν ο X είναι Ανατολή ή Βορειοανατολή).

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{pmatrix}$$

Κύριοι Άξονες: Υπάρχει πάντα ένα σύστημα συντεταγμένων όπου η διάτμηση μηδενίζεται $\epsilon'_{xy} = 0$

Οι ορθές παραμορφώσεις σε αυτό το σύστημα ονομάζονται
Κύριες Παραμορφώσεις: (ϵ_1, ϵ_2)



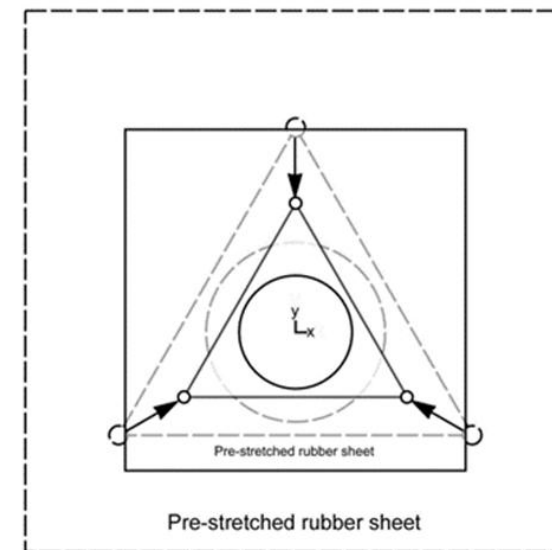
ϵ_1 : Μέγιστη επιμήκυνση.

ϵ_2 : Ελάχιστη επιμήκυνση (ή μέγιστη συμπίεση).

Αναλλοίωτες (Invariants): Μεγέθη που δεν αλλάζουν με την περιστροφή των αξόνων:

- Διαστολή (Dilatation): $\Delta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} = \epsilon_1 + \epsilon_2$ (Σχετική μεταβολή εμβαδού/όγκου).

- Αν $\Delta > 0$ η περιοχή «ανοίγει»
- Αν $\Delta < 0$ η περιοχή «κλείνει»



Πώς Ερμηνεύουμε τον Τανυστή:

Οι κύριες παραμορφώσεις ε_1 και ε_2 , δηλαδή οι ιδιοτιμές του τανυστή παραμόρφωσης.

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \varepsilon_{xy}^2}$$

Ο προσανατολισμός των κύριων αξόνων παραμόρφωσης :

- Ως γωνία από τον άξονα X (ανατολή-Δύση)

$$\tan(2\theta) = \frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}$$

Τα ιδιοδιανύσματα είναι οι *προνομιακές* διευθύνσεις της παραμόρφωσης.

Έστω έναν κύκλος που μετατρέπεται σε έλλειψη.

Υπάρχουν δύο άξονες (ο μεγάλος και ο μικρός της έλλειψης) που, παρόλο που το σχήμα άλλαξε, αυτοί δεν άλλαξαν κατεύθυνση, παρά μόνο μήκος.

Στη Γεωφυσική, αυτά μας δείχνουν τις Κύριες Διευθύνσεις: Προς τα πού "κοιτάζει" ο μέγιστος εφελκυσμός και προς τα πού η μέγιστη συμπίεση στον χάρτη.

Πώς Ερμηνεύουμε τον Τανυστή:

Οι ιδιοτιμές (ε_1 και ε_2) είναι οι αριθμοί που μας λένε πόσο επιμηκύνθηκε ή συρρικνώθηκε το σώμα κατά μήκος των ιδιοδιανυσμάτων.

- Αν η ιδιοτιμή είναι θετική (>0), σημαίνει ότι στη διεύθυνση του αντίστοιχου ιδιοδιανύσματος έχουμε εφελκυσμό αυτού του μεγέθους.
- Αν είναι αρνητική (<0), έχουμε συμπίεση.

Όταν έχουμε έναν τανυστή με τιμές ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} , η πληροφορία είναι "μπερδεμένη" γιατί εξαρτάται από το πώς ορίσαμε τους άξονες Βορρά-Νότου.

Οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα μας δίνουν την αντικειμενική αλήθεια της παραμόρφωσης:

1. Ανεξαρτησία: Οι ιδιοτιμές παραμένουν ίδιες όποιο σύστημα συντεταγμένων και αν διαλέξουμε (είναι αναλλοίωτα μεγέθη).
2. Τεκτονικό Καθεστώς: Αν $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0$: Rifting (άνοιγμα προς όλες τις κατευθύνσεις).
 - Αν $\varepsilon_1 > 0$ και $\varepsilon_2 < 0$: Strike-slip (διάτμηση, όπως σε ένα ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης).
 - Αν $\varepsilon_1, \varepsilon_2 < 0$: Ορογένεση (συμπίεση/δημιουργία βουνών).

Τανυστής: ιδιοτιμές – ιδιοδιανύσματα

Αν ένας πίνακας A δρα πάνω σε ένα διάνυσμα x , συνήθως:

- αλλάζει το μήκος του
- αλλάζει και τη διεύθυνσή του

Υπάρχουν όμως ορισμένες ειδικές διευθύνσεις για τις οποίες ο πίνακας δεν αλλάζει τη διεύθυνση του διανύσματος, αλλά μόνο το πολλαπλασιάζει με έναν αριθμό.

Αυτό γράφεται:

$$Ax = \lambda x$$

όπου A : ο πίνακας, x : το ιδιοδιάνυσμα, λ : η ιδιοτιμή

Ένας αριθμός λ λέγεται ιδιοτιμή του πίνακα A , αν υπάρχει μη μηδενικό διάνυσμα x ($\neq 0$) τέτοιο ώστε: $Ax = \lambda x$

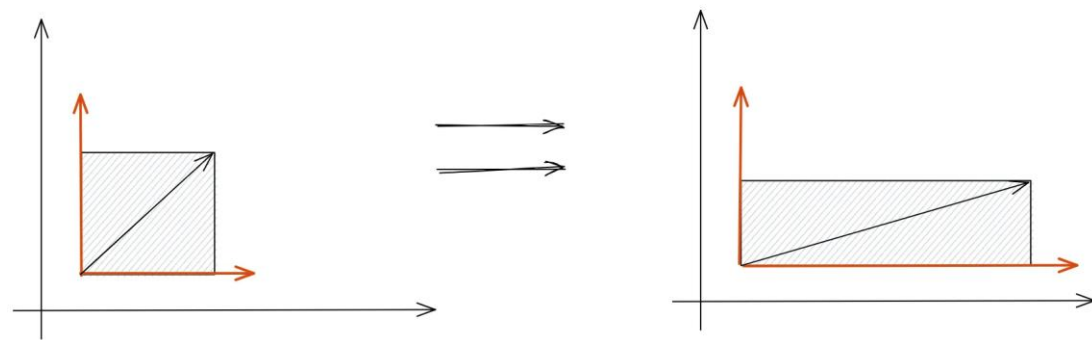
Οπότε

$$Ax - \lambda x = 0$$

$$(A - \lambda I)x = 0$$

$$\det(A - \lambda I) = 0$$

Αυτή είναι η χαρακτηριστική εξίσωση του πίνακα. Οι λύσεις της ως προς λ είναι οι ιδιοτιμές.



Τανυστής: ιδιοτιμές – ιδιοδιανύσματα

όπου A : ο πίνακας, x : το ιδιοδιάνυσμα, λ : η ιδιοτιμή

$$Ax = \lambda x$$

$$A = \begin{bmatrix} 7 & 6 \\ 6 & -2 \end{bmatrix}$$

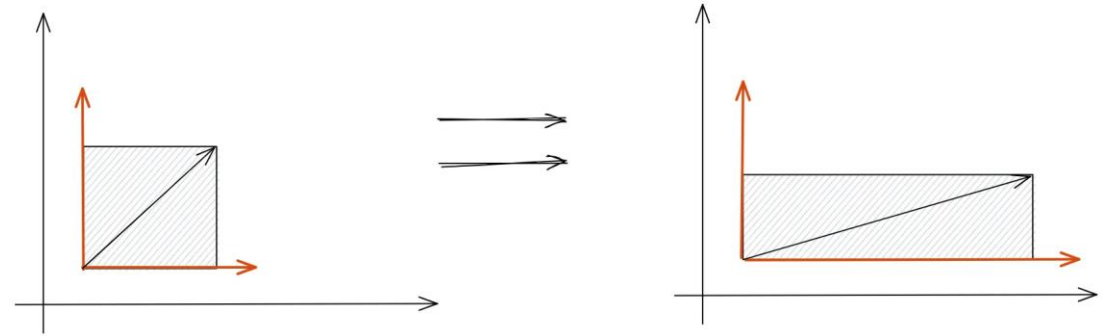
$$X = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$A \cdot X = \begin{bmatrix} 7 & 6 \\ 6 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20 \\ 10 \end{bmatrix} = 10 \cdot \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$A \cdot X = 10 \cdot X$$

X : ιδιοδιάνυσμα του πίνακα A

$\lambda = 10$ ιδιοτιμή



Τανυστής: ιδιοτιμές – ιδιοδιανύσματα

Στη φυσική ερμηνεία της παραμόρφωσης

Στον τανυστή παραμόρφωσης, οι ιδιοτιμές είναι οι κύριες παραμορφώσεις:

- ε_1 : μέγιστη κύρια παραμόρφωση
- ε_2 : ελάχιστη κύρια παραμόρφωση

Και τα ιδιοδιανύσματα δίνουν τις κύριες διευθύνσεις.

Δηλαδή:

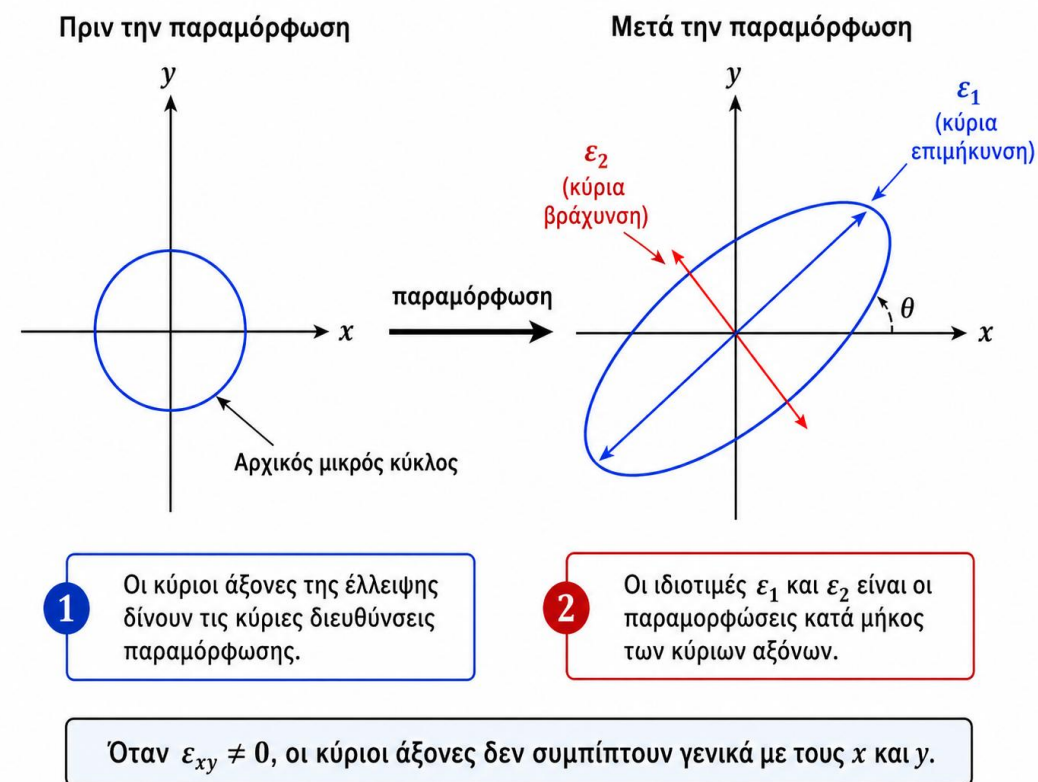
- στις κύριες διευθύνσεις δεν υπάρχει διατμητική παραμόρφωση
- υπάρχει μόνο καθαρή επιμήκυνση ή βράχυνση

Οι ιδιοτιμές λένε:

«Πόσο αλλάζει ένα μέγεθος κατά τις ειδικές φυσικές διευθύνσεις του συστήματος»

και τα ιδιοδιανύσματα λένε:

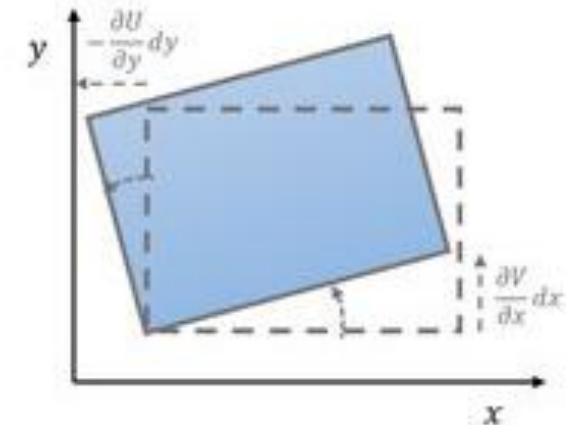
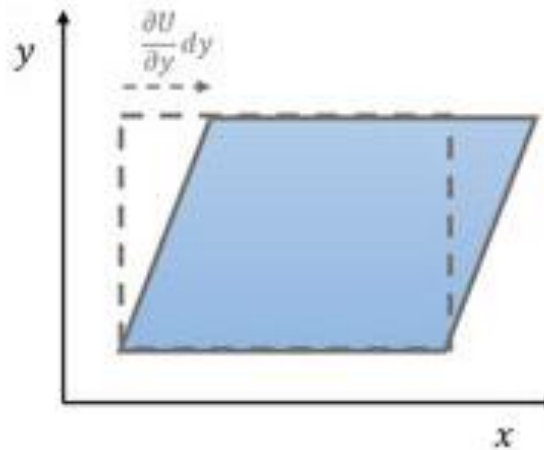
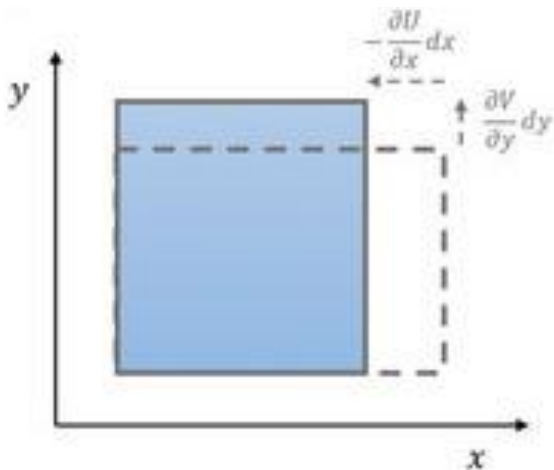
«Ποιες είναι αυτές οι ειδικές διευθύνσεις»



Παραμόρφωση και Σεισμικά Ρήγματα

Κινήσεις GPS/GNSS	Είδος παραμόρφωσης	Πιθανός τύπος ρήγματος / διεργασίας
Σταθμοί απομακρύνονται	Εφελκυσμός	Κανονικό ρήγμα
Σταθμοί συγκλίνουν	Συμπίεση	Ανάστροφο ρήγμα
Αντίθετες παράλληλες κινήσεις	Διάτμηση	Οριζόντια Ολίσθηση
Ακτινική απομάκρυνση + ανύψωση	Διαστολή	Μαγματική/υδροθερμική πηγή, όχι απαραίτητα ρήγμα
Σχεδόν σταθερές γραμμικές ταχύτητες	Σταθερό κινηματικό πεδίο	Δεν προσδιορίζεται εύκολα ο τύπος του ρήγματος

Υπολογισμός Τανυστή Παραμόρφωσης,
Περιστροφής και Κύριων Παραμορφώσεων από 3 σταθμούς GPS/GNSS

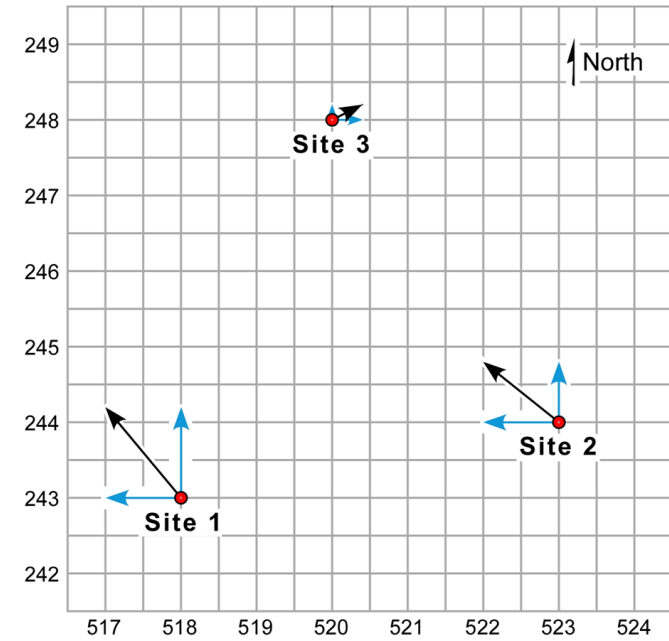
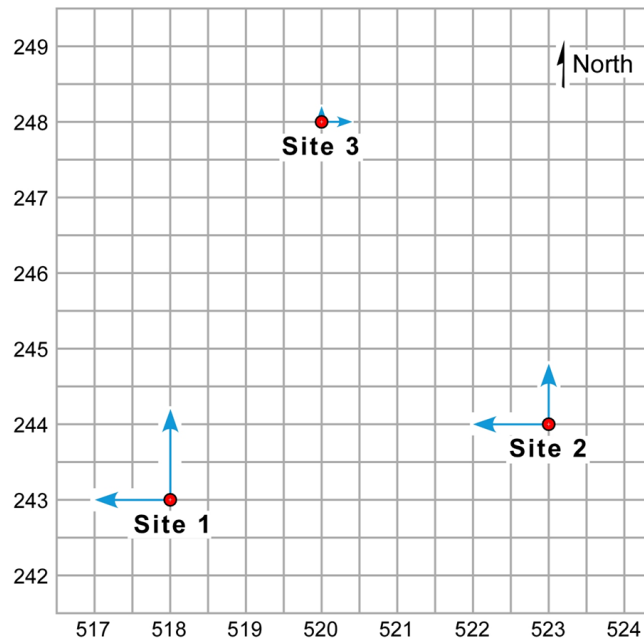
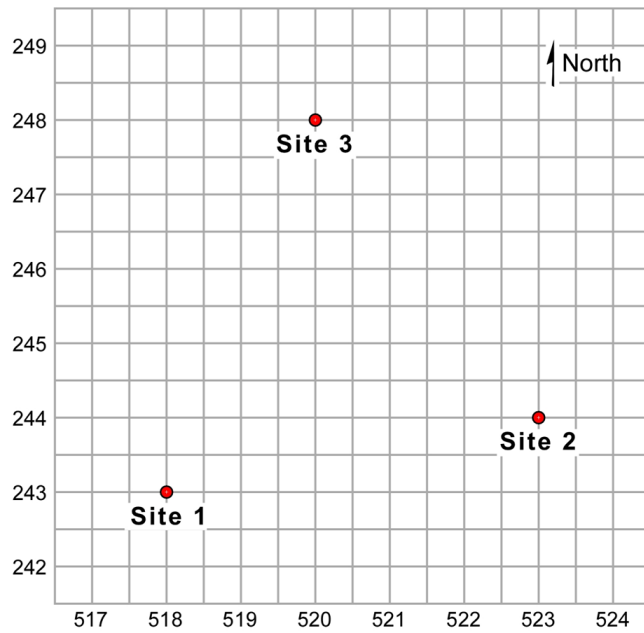


Ανάλυση Παραμόρφωσης με Δεδομένα GPS

Πεδίο Παραμόρφωσης πώς μια ομάδα τριών σταθμών GPS μπορεί να μας δείξει αν η περιοχή ανάμεσά τους μετακινείται ολόκληρη (μεταφορά) ή αν αλλάζει σχήμα (παραμόρφωση)

3 σταθμοί GPS που δεν βρίσκονται στην ίδια ευθεία (μη-συνευθειακοί).

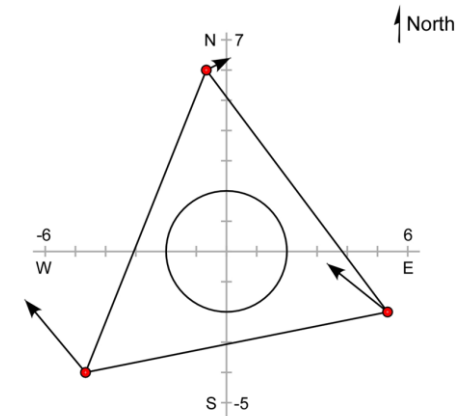
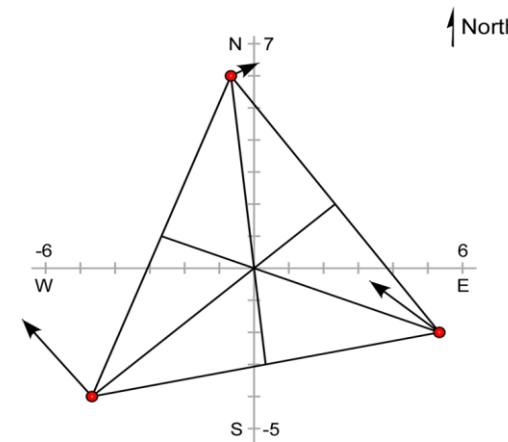
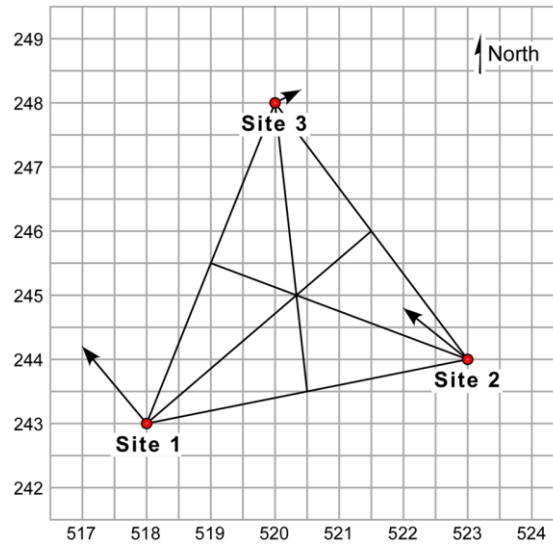
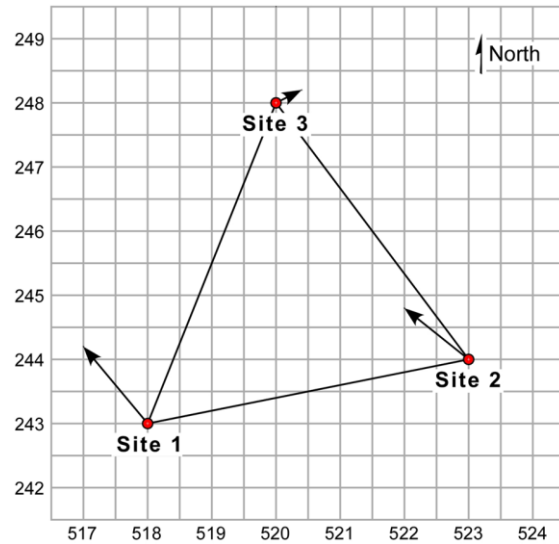
- Για κάθε σταθμό, έχουμε μετρήσεις ταχύτητας σε δύο άξονες: Ανατολή-Δύση (E-W) και Βορράς-Νότος (N-S).
- Το άθροισμα αυτών των συνιστωσών μας δίνει το συνολικό διάνυσμα ταχύτητας κάθε σταθμού.



Ανάλυση Παραμόρφωσης με Δεδομένα GPS

Σχεδιάζουμε το τρίγωνο που ορίζεται από τους τρεις σταθμούς.

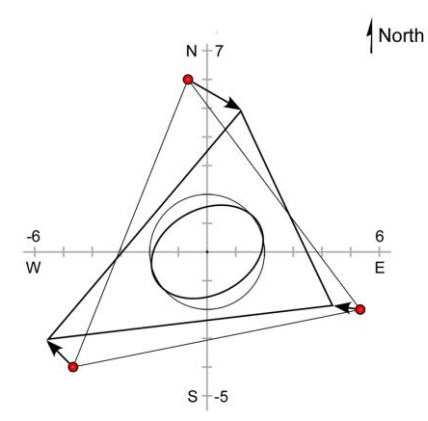
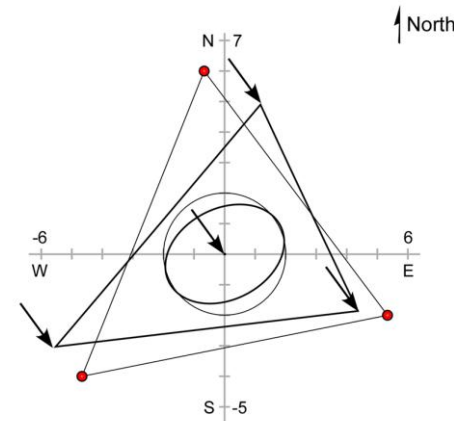
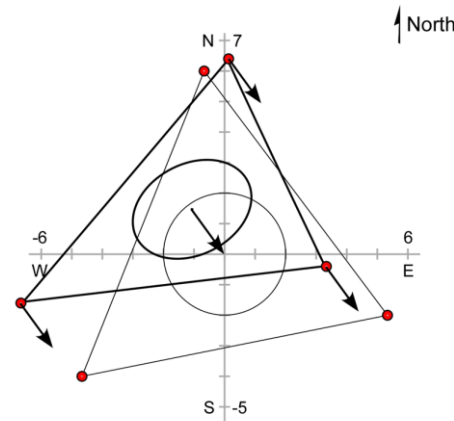
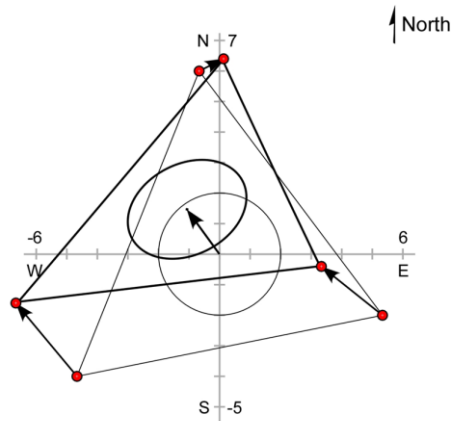
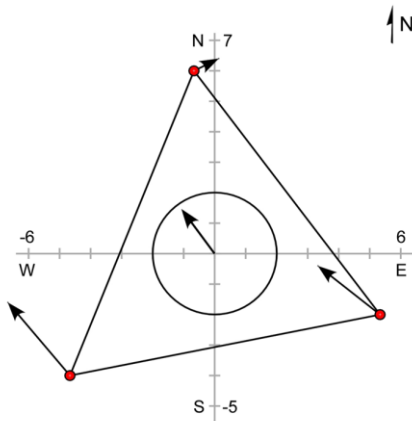
- Ορίζουμε το κέντρο βάρους (centroid) του τριγώνου.
- Μεταφέρουμε το σύστημα συντεταγμένων μας έτσι ώστε η αρχή των αξόνων (0,0) να είναι το κέντρο βάρους.
- Για να μελετήσουμε την παραμόρφωση, εγγράφουμε νοητά έναν κύκλο στο κέντρο του μη παραμορφωμένου τριγώνου.



Ανάλυση Παραμόρφωσης με Δεδομένα GPS

Εδώ διαχωρίζουμε τη "στερεή" κίνηση από την αλλαγή σχήματος:

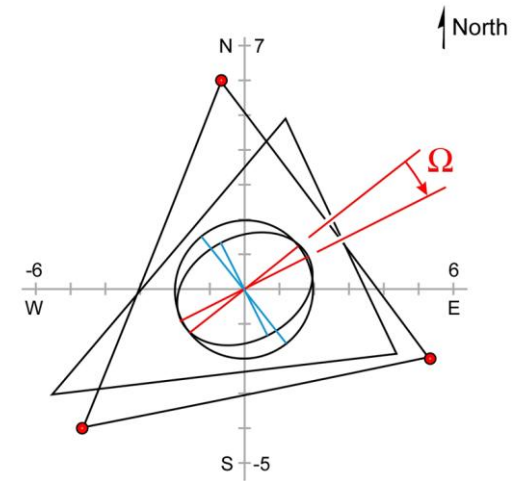
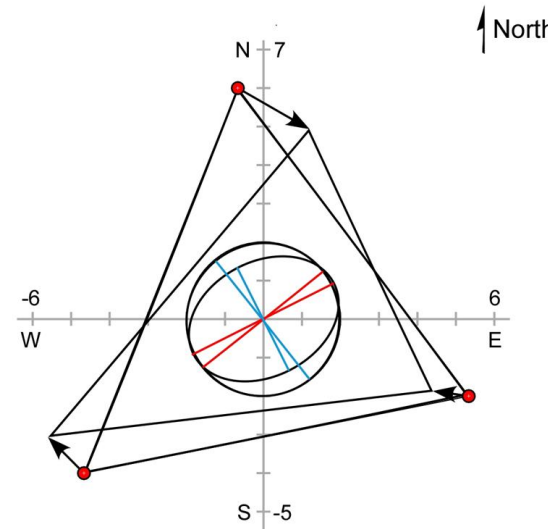
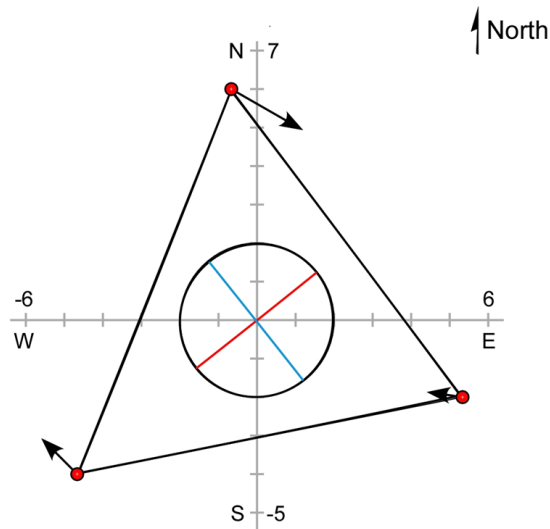
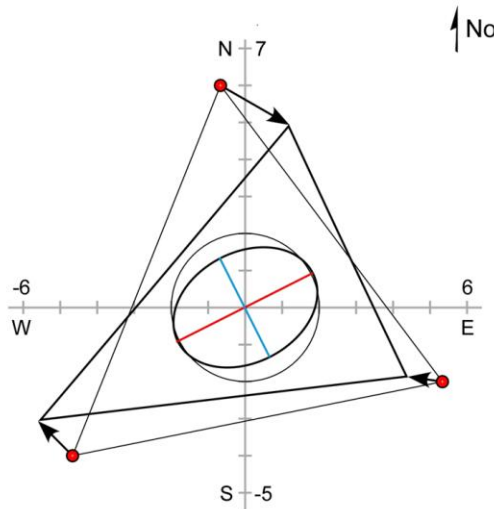
- Ο μέσος όρος των ταχυτήτων των τριών σταθμών ονομάζεται *Διάνυσμα Μεταφοράς* (Translation Vector). Αν το τρίγωνο κινούνταν ως στερεό σώμα, όλοι οι σταθμοί θα είχαν αυτό το διάνυσμα.
- Αφαιρούμε το διάνυσμα μεταφοράς από την ταχύτητα κάθε σταθμού. Με αυτόν τον τρόπο "ακινητοποιούμε" το κέντρο βάρους του τριγώνου.
- Τα διανύσματα που απομένουν μετά την αφαίρεση της μεταφοράς είναι αυτά που προκαλούν την αλλαγή σχήματος του τριγώνου.



Ανάλυση Παραμόρφωσης με Δεδομένα GPS

Η Έλλειψη Παραμόρφωσης

- Λόγω των διαφορετικών ταχυτήτων των σταθμών, ο αρχικός κύκλος παραμορφώνεται σε μια Έλλειψη Παραμόρφωσης (Strain Ellipse).
- Η έλλειψη έχει δύο κύριους άξονες: τον μεγάλο άξονα (**κόκκινη γραμμή - μέγιστη επιμήκυνση - εφελκυσμός**) και τον μικρό άξονα (**μπλε γραμμή - μέγιστη βράχυνση - συμπίεση**). Αυτοί οι άξονες παραμένουν κάθετοι μεταξύ τους.
- Το τελικό αποτέλεσμα: το τρίγωνο έχει μετακινηθεί και ταυτόχρονα έχει επιμηκυνθεί ή συμπιεστεί. Επιπλέον της παραμόρφωσης, το τρίγωνο μπορεί να έχει υποστεί και περιστροφή (Rotation), η οποία υπολογίζεται επίσης από τις διαφορές των ταχυτήτων.



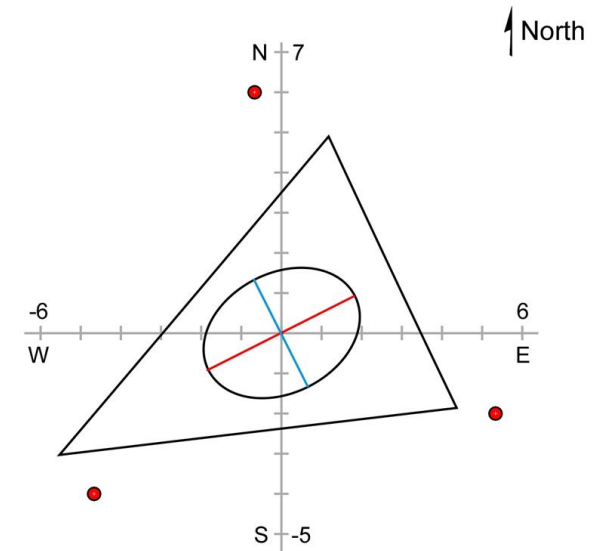
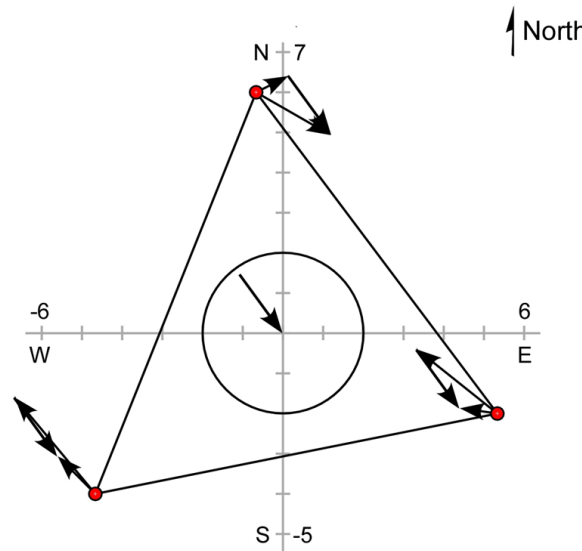
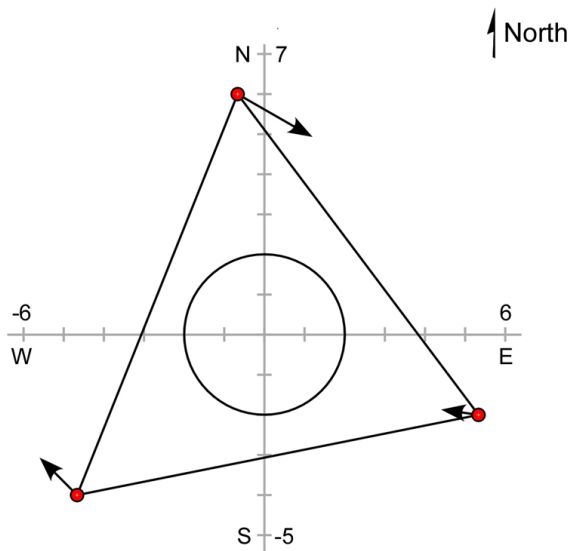
Ανάλυση Παραμόρφωσης με Δεδομένα GPS

Σύνοψη

Η ανάλυση τριγώνων GPS μας επιτρέπει να υπολογίσουμε:

- Τη Μεταφορά (πού πάει η πλάκα).
- Την Περιστροφή (πώς στρίβει).
- Την Παραμόρφωση (πώς τεντώνεται ή συμπιέζεται ο φλοιός).

Αυτά τα δεδομένα είναι κρίσιμα για να καταλάβουμε πού συσσωρεύεται τεκτονική τάση που μπορεί να οδηγήσει σε σεισμό.



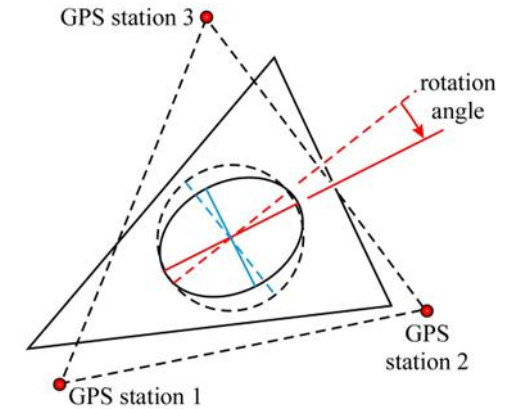
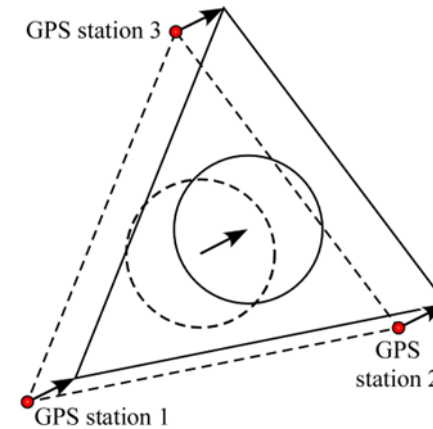
Ανάλυση Παραμόρφωσης με Δεδομένα GPS

Η Έλλειψη Παραμόρφωσης (Strain Ellipse)

- **Η Έννοια:** Φανταστείτε έναν κύκλο με ακτίνα 1 ζωγραφισμένο πάνω στον φλοιό. Μετά από έναν χρόνο, λόγω της κίνησης, ο κύκλος παραμορφώνεται σε έλλειψη.
- **Μέγιστη & Ελάχιστη Έκταση e_1 e_2 :** Μετρώνται κατά μήκος του μεγάλου και του μικρού άξονα της έλλειψης αντίστοιχα.
- **Μονάδες:** Η παραμόρφωση είναι αδιάστατο μέγεθος (λόγος μήκους/μήκος). Στο GPS μετράμε σε δισεκατομμυριοστά της παραμόρφωσης (nano-strain).

$$(l_f - l_o) / l_o,$$

$$l_o / l_o = 1 \text{ strain}$$

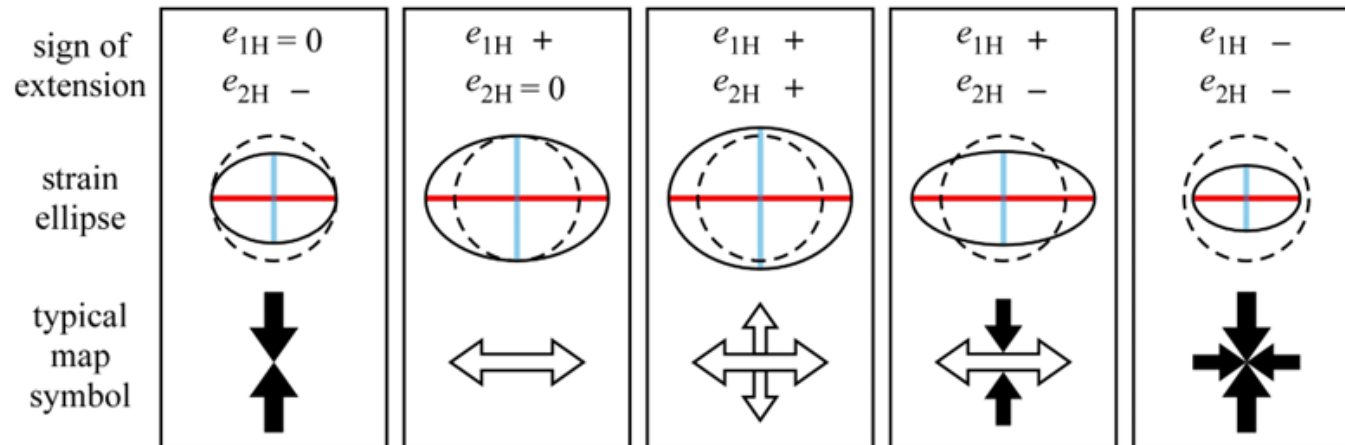


Ανάλυση Παραμόρφωσης με Δεδομένα GPS

- Αν η απόσταση από το κέντρο είναι > 1 , έχουμε θετικό αριθμό (επιμήκυνση/extension).
- Αν η απόσταση είναι < 1 , έχουμε αρνητικό αριθμό (βράχυνση/shortening).

Σύμβολα Χάρτη:

- Μαύρα βέλη: Δηλώνουν συστολή/συμπίεση.
- Λευκά βέλη: Δηλώνουν εφελκυσμό/τέντωμα.



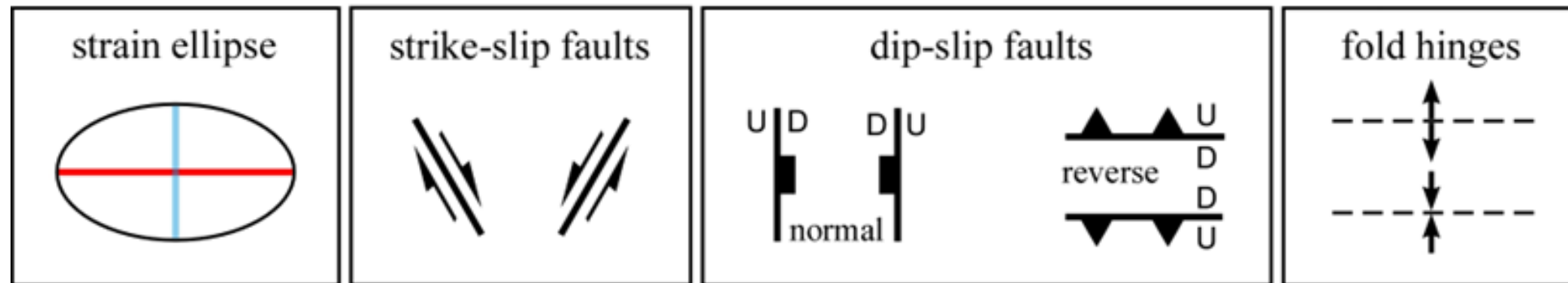
5 πιθανά σενάρια παραμόρφωσης της έλλειψης και τα αντίστοιχα σύμβολα χάρτη

Ανάλυση Παραμόρφωσης με Δεδομένα GPS

Σύνδεση με Γεωλογικές Δομές (Ρήγματα & Πτυχές)

Η έλλειψη παραμόρφωσης μας δείχνει τι είδους ρήγματα μπορεί να είναι ενεργά στην περιοχή:

- **Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης (Strike-slip):** Προσανατολισμένα σε γωνία $\leq 45^\circ$ ως προς τον μικρό άξονα (μπλε) της έλλειψης.
- **Κανονικά Ρήγματα (Normal faults):** Παράλληλα προς τον μικρό άξονα.
- **Ανάστροφα Ρήγματα (Reverse faults) & Πτυχές:** Κάθετα προς τον μικρό άξονα¹³.



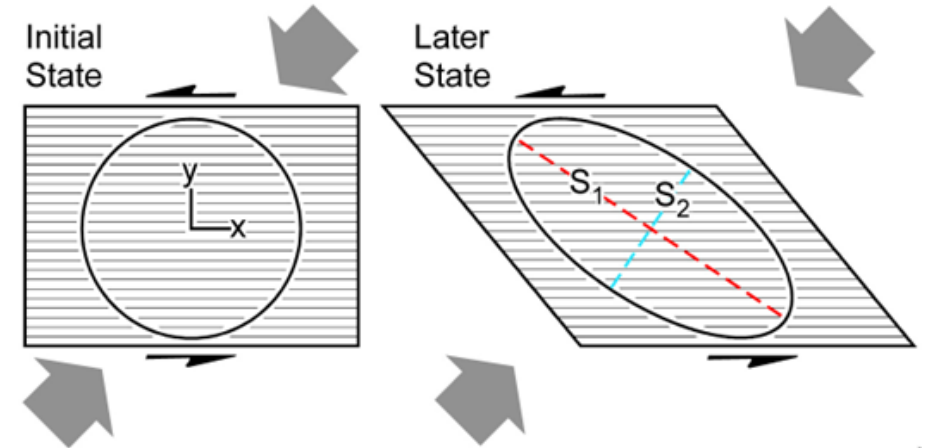
Ποιος συγκεκριμένος τύπος δομής είναι πιθανότερο να είναι ενεργός εξαρτάται από παράγοντες όπως τα σχετικά μεγέθη και τα πρόσημα των κύριων επιμηκύνσεων, τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των υλικών του ανώτερου φλοιού που υπάρχουν στην περιοχή, καθώς και η ύπαρξη και τα χαρακτηριστικά προϋπαρχουσών δομών (αν υπάρχουν).

Ανάλυση Παραμόρφωσης με Δεδομένα GPS

Άλλοι Τύποι Παραμόρφωσης

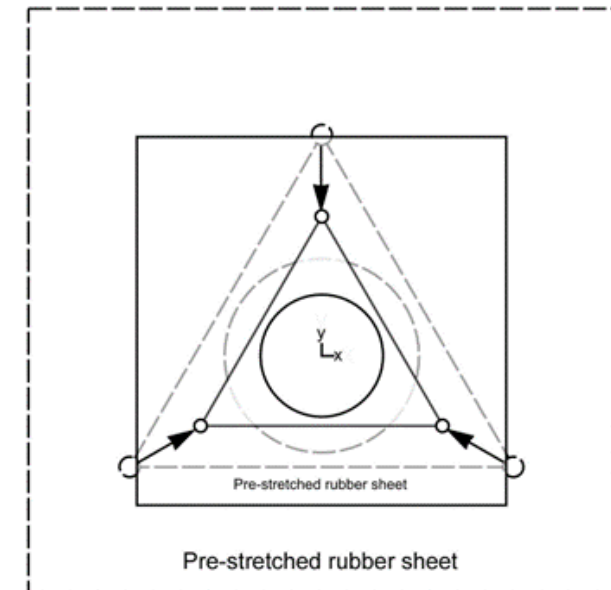
- Διατμητική Παραμόρφωση (Shear Strain): Αλλαγή στο σχήμα λόγω γωνιακής παραμόρφωσης.

$$e_1 - e_2$$



- Διαστολή (Εμβαδική) Παραμόρφωση (Area Strain): Αλλαγή στο εμβαδόν του τριγώνου (διόγκωση ή συρρίκνωση).

$$e_1 + e_2$$



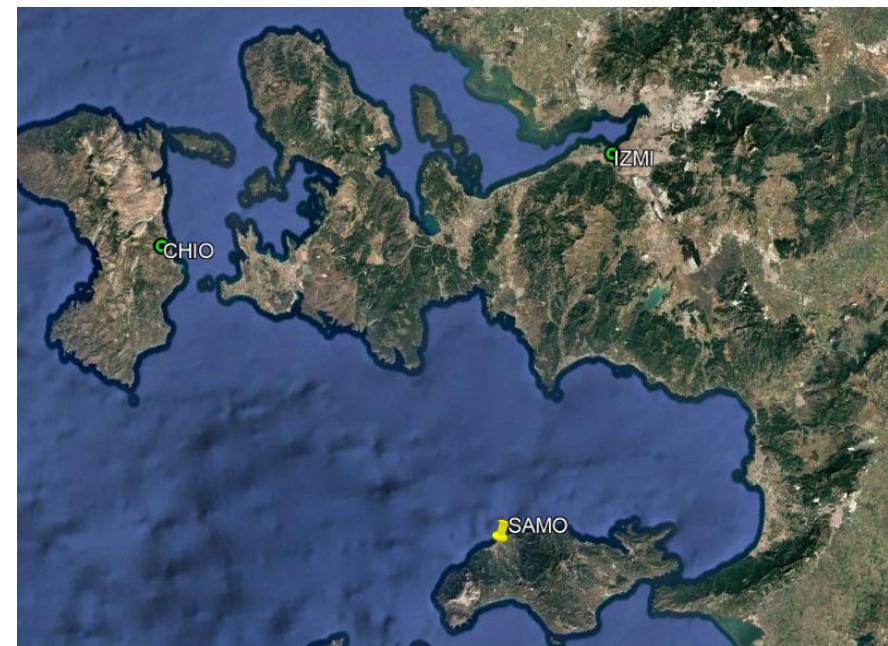
ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σταθμός	Μήκος (°)	Πλάτος (°)	Ανατολική (m)	Βόρεια (m)	Ταχ. A-Δ u (mm/yr)	Ταχ. Β-Ν v (mm/yr)
A - SAMO	26.7053	37.7928	474053.470	4182867.047	54.4	-93.3
B - CHIO	26.1272	38.3679	423754.215	4246996.054	56.9	-99
C - IZMI	27.0818	38.3948	507143.149	4249623.543	32	-33.4

$$u(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y$$

$$v(x, y) = b_0 + b_1 x + b_2 y$$

όπου: u : ταχύτητα κατά x v : ταχύτητα κατά y

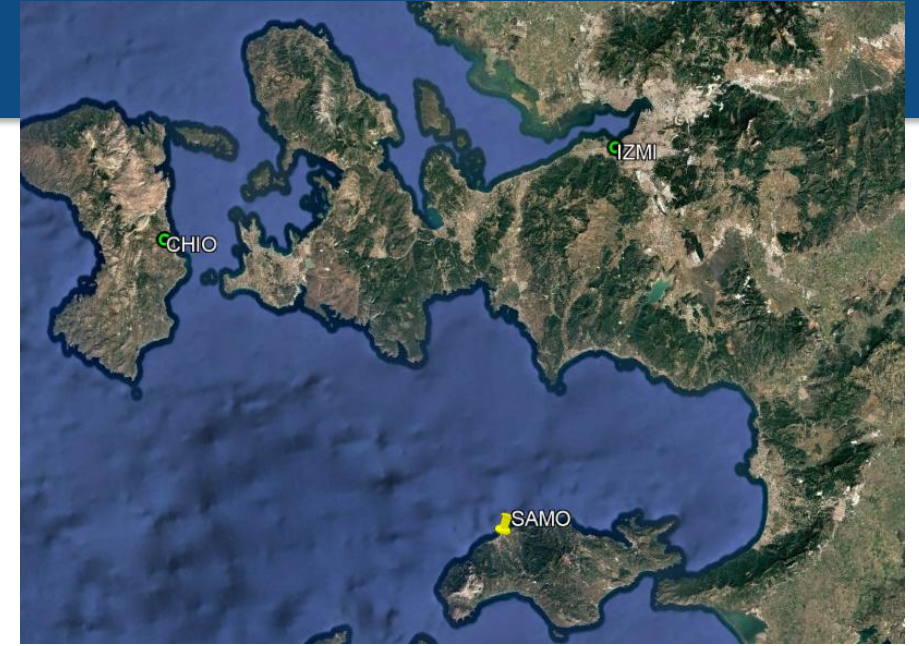


1. Να προσδιορισθεί το κέντρο βάρους του τριγώνου που σχηματίζουν οι 3 σταθμοί, και να προσδιορισθούν οι συντεταγμένες του κάθε σταθμού (σε m) ως προς αυτό.
2. Να προσδιοριστούν οι παράμετροι του γραμμικού πεδίου ταχυτήτων, δηλαδή οι συντελεστές $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, b_0, b_1, b_2$ με χρήση των τριών διαθέσιμων σταθμών.
3. Να υπολογιστούν οι χωρικές παράγωγοι του πεδίου ταχυτήτων:

$$\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$$

ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σταθμός	Μήκος (°)	Πλάτος (°)	Ανατολική (m)	Βόρεια (m)	Ταχ. Α-Δ u (mm/yr)	Ταχ. Β-Ν v (mm/yr)
A - SAMO	26.7053	37.7928	474053.470	4182867.047	54.4	-93.3
B – CHIO	26.1272	38.3679	423754.215	4246996.054	56.9	-99
C - IZMI	27.0818	38.3948	507143.149	4249623.543	32	-33.4



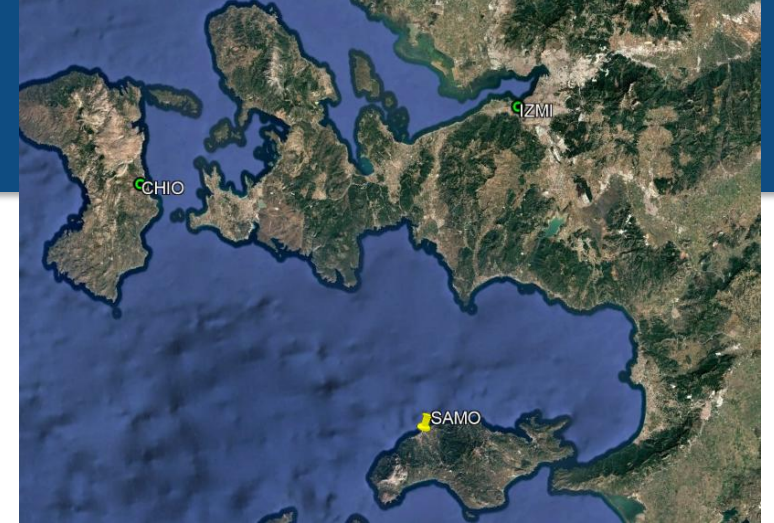
4. Να υπολογιστούν οι συνιστώσες του συμμετρικού τανυστή παραμόρφωσης, και να γραφεί ο τανυστής παραμόρφωσης σε μορφή πίνακα:

$$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy} \quad \epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{pmatrix} \quad \epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

5. Να υπολογιστεί η τοπική περιστροφή ω του μικρού δικτύου και να προσδιοριστεί αν αυτή είναι δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη
- $$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σταθμός	Μήκος (°)	Πλάτος (°)	Ανατολική (m)	Βόρεια (m)	Ταχ. Α-Δ u (mm/yr)	Ταχ. Β-Ν v (mm/yr)
A - SAMO	26.7053	37.7928	474053.470	4182867.047	54.4	-93.3
B - CHIO	26.1272	38.3679	423754.215	4246996.054	56.9	-99
C - IZMI	27.0818	38.3948	507143.149	4249623.543	32	-33.4



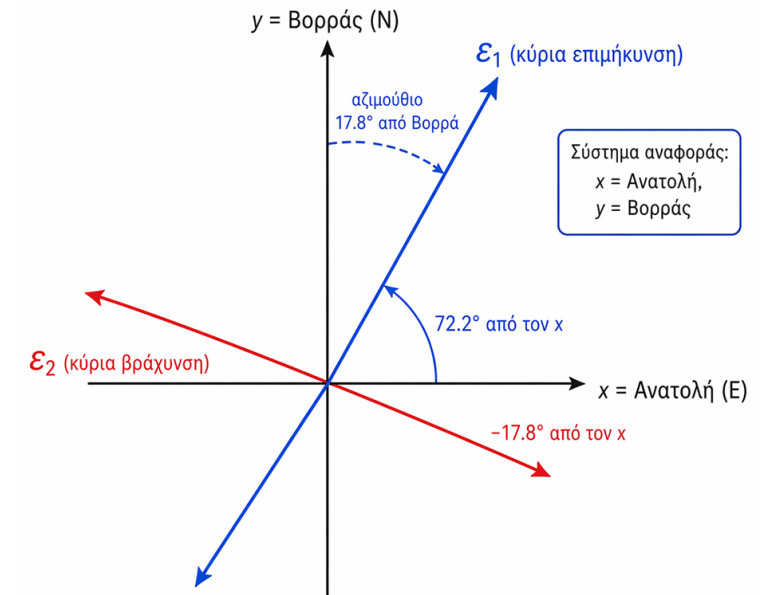
6. Να προσδιοριστούν οι κύριες παραμορφώσεις ε_1 και ε_2 , δηλαδή οι ιδιοτιμές του τανυστή παραμόρφωσης.

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \varepsilon_{xy}^2}$$

7. Να υπολογιστεί ο προσανατολισμός των κύριων αξόνων παραμόρφωσης και να εκφραστεί:

- Ως γωνία από τον άξονα X (ανατολή-Δύση)
- Ως αζιμούθιο από τον Βορρά.

$$\tan(2\theta) = \frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}$$



ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σταθμός	Μήκος (°)	Πλάτος (°)	Ανατολική (m)	Βόρεια (m)	Ταχ. A-Δ u (mm/yr)	Ταχ. Β-N v (mm/yr)
A - SAMO	26.7053	37.7928	474053.470	4182867.047	54.4	-93.3
B – CHIO	26.1272	38.3679	423754.215	4246996.054	56.9	-99
C - IZMI	27.0818	38.3948	507143.149	4249623.543	32	-33.4

8. Να γίνει σύντομη φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων, δηλαδή να σχολιαστεί:
- Αν στην περιοχή κυριαρχεί επιμήκυνση ή βράχυνση,
 - Αν υπάρχει σημαντική διατμητική παραμόρφωση,
 - Ποια είναι η διεύθυνση της κύριας επιμήκυνσης,
 - Ποια είναι η φορά της τοπικής περιστροφής.
 - Τί τύπου ρήγμα και με τι προσανατολισμό επηρεάζει την περιοχή
9. Χρησιμοποιώντας το αρχείο “[gps_strain_calculator_results.xls](#)” επαληθεύσατε/συγκρίνετε τα αποτελέσματα σας

