

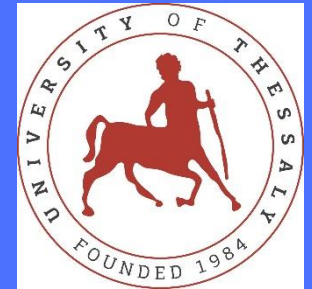
Τα Οστά και η μηχανική συμπεριφορά τους

Δρ. Παναγιώτης Β. Τσακλής

Καθηγητής

Εργαστήριο Εμβιομηχανικής & Εργονομίας

ErgoMechLab - ΤΕΦΑΑ - ΠΘ



*Res. Assoc Department of Molecular Medicine & Surgery
Karolinska Institutet*

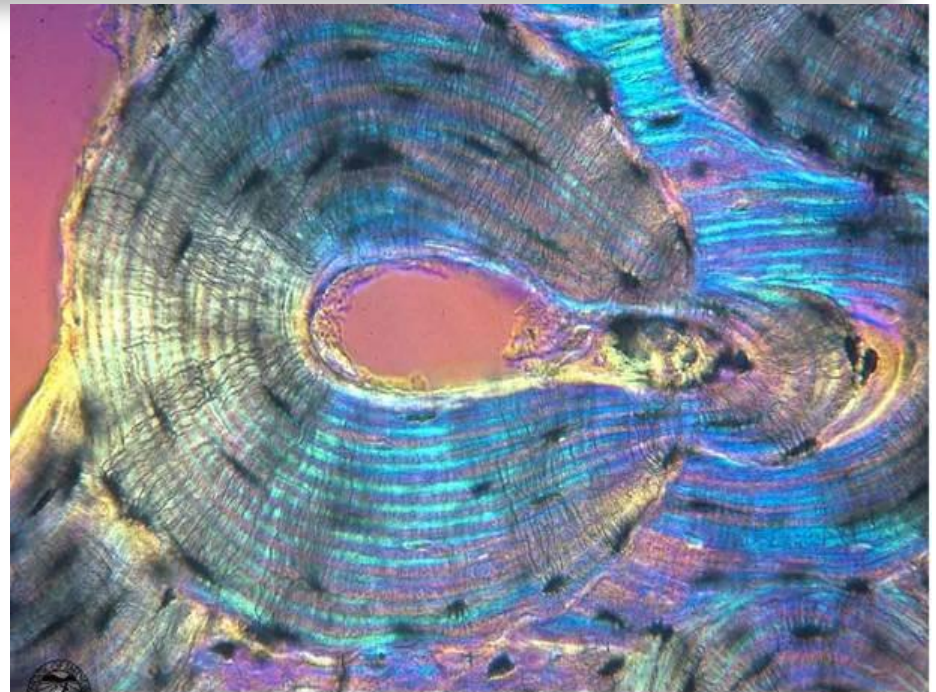
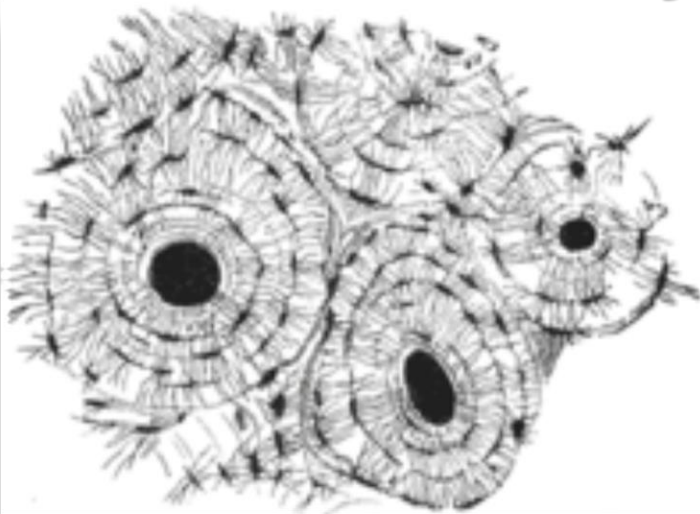


- Τα **οστά** ή αλλιώς **κόκκαλα** είναι υπόλευκοι, σκληροί και ανθεκτικοί ιστοί. Συνδεόμενοι με τις **αρθρώσεις**, σχηματίζουν τον **σκελετό** του σώματος στον οποίο ο άνθρωπος οφείλει το σχήμα του . Σε αυτόν στηρίζονται τα μαλακά μέρη και προστατεύονται ευπαθή όργανα, όπως ο **εγκέφαλος** ή τα **σπλάγχνα θώρακα-πυέλου**.
- Επιπλέον, αποτελούν αποθήκη αλάτων **ασβεστίου** και **φωσφόρου** για τις ανάγκες του οργανισμού.
- Ο **ερυθρός μυελός των οστών** που υπάρχει στο σπογγώδη οστίτη ιστό παράγει τα κύτταρα του αίματος. Στα μακρά ή επιμήκη ή αυλοφόρα οστά όπως είναι το βραχιόνιο το μηριαίο και άλλα στον αυλό τους, υπάρχει ο κίτρινος μυελός των οστών που αποτελεί αποθήκη λίπους



- Το οστό αποτελείται από ασβεστοποιημένες πρωτεΐνες που βρίσκονται έξω από τα κύτταρα και αποτελούν το οστεοειδές. Το οστεοειδές αποτελείται από κολλαγόνο τύπου I και γλυκοζαμινογλυκάνες που περιέχουν γλυκοπρωτεΐνες που μπορούν να δεσμεύσουν μεγάλες ποσότητες ασβεστίου, όπως η οστεοκαλσίνη.
- Τα άλατα ασβεστίου δίνουν στο οστό μηχανική ισχύ. Το ασβέστιο μαζί με τα φωσφορικά ιόντα σχηματίζουν τον υδροξυαπατίτη $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$. Αν και το οστό είναι σχεδόν άκαμπτο, οι ίνες του κολλαγόνου του προσδίδουν μικρό βαθμό ελαστικότητας.

Οστεώνες

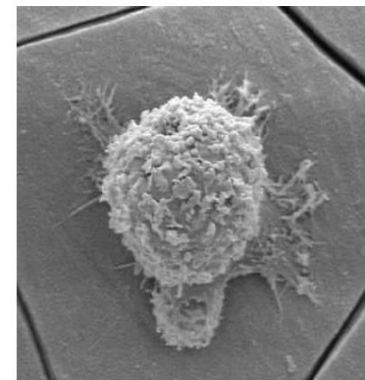


Οστεοβλάστες

- Το οστεοειδές παράγεται από τις οστεοβλάστες, οι οποίοι επικάθονται στην επιφάνεια του οστού. Οι οστεοβλάστες παράγουν κολλαγόνο και γλυκοζαμινογλυκάνες τις οποίες εκκρίνουν σε κυστίδια και σχηματίζουν τις ίνες του κολλαγόνου του οστεοειδούς, οι οποίες βρίσκονται μέσα στις γλυκοαζμινογλυκάνες. Στην συνέχεια ακολουθεί η ασβεστοποίηση του οστεοειδούς.
- Η οστεοκαλσίνη δεσμεύει τα ιόντα ασβεστίου ενώ η αλκαλική φωσφατάση αυξάνει τοπικά συγκέντρωση φωσφορικών ιόντων και ιόντων ασβεστίου. Τα κυστίδια που παράγουν οι οστεοβλάστες περιέχουν αλκαλική φωσφατάση και δημιουργούν γύρω τους πυρήνες εναπόθεσης αλάτων υδροξυαπατίτη, στους οποίους ο υδροξυαπατίτης συσσωρεύεται γρήγορα και επεκτείνεται κυκλικά μέχρι να συναντήσει άλλες εστίες ασβεστοποίησης

Οστεοβλάστες

Λειτουργική τους αποστολή είναι ο σχηματισμός και η επιμετάλλωση του οστού

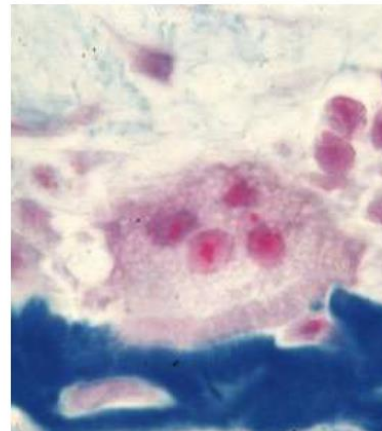


Οστεοκλάστες

- Η αποσύνθεση του οστού ονομάζεται απορρόφηση και πραγματοποιείται από κύτταρα που ονομάζονται **οστεοκλάστες**. Οι οστεοκλάστες παράγουν κυστίδια που περιέχουν **λυσοσωμικά ένζυμα** και τα απελευθερώνουν στην οστική επιφάνεια. Τα ένζυμα αυτά υδρολύουν (καταστρέφουν) το κολλαγόνο και τις γλυκοζαμινογλυκάνες του οστού, με αποτέλεσμα την αποδόμηση των οργανικών αλάτων που συνδέονται με αυτές. Οι οστεοκλάστες δημιουργούν επίσης όξινο περιβάλλον, το οποίο οδηγεί στη διάσπαση του υδροξυ-απατίτη. Στην συνέχεια οι οστεοκλάστες ενδοκυτταρώνουν κάποια από τα προϊόντα της διάσπασης. Στη συνέχεια κινούνται σε άλλη θέση.
- Η **παραθορμόνη** ενεργοποιεί τους οστεοκλάστες έτσι ώστε να αυξήσει τα επίπεδα ασβεστίου στο αίμα όταν αυτά μειωθούν ενώ η **καλσιτονίνη** τους απενεργοποιεί όταν τα επίπεδα ασβεστίου στο αίμα είναι υψηλά.

Οστεοκλάστες

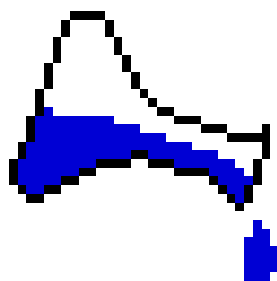
Είναι πλήρως διαμορφωμένα πολυπύρρηνα κύτταρα που προκαλούν οστική απορρόφηση (διαλύουν το ανόργανο τμήμα και απορροφούν την θεμέλια ουσία των οστών).



Εμβιομηχανικά χαρακτηριστικά των οστών – Οστίτη ιστού

Ανόργανα στοιχεία
(e.g., ασβέστιο & φώσφορος)

65-70%
(ξηρό βάρος)

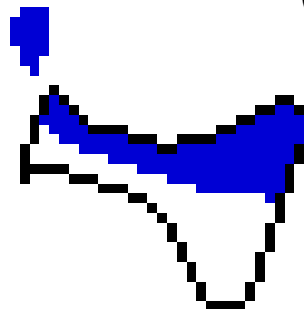


H₂O
(25-30%)



Οργανικά στοιχεία
(e.g. κολλαγόνο)

25-30%
(ξηρό βάρος)



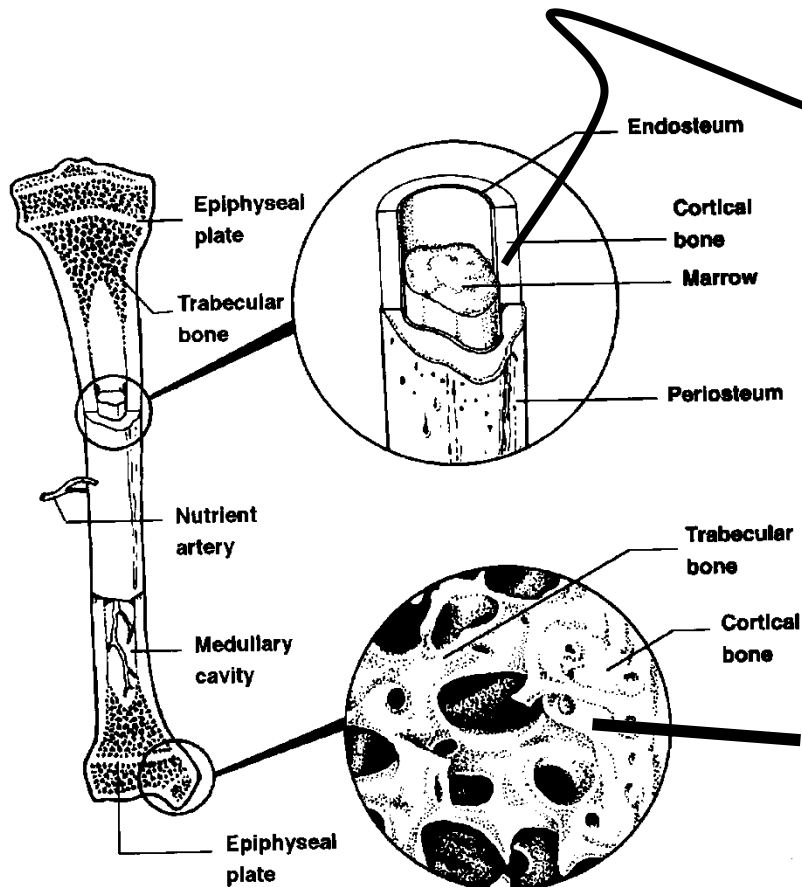
Ένα από τα
σκληρότερα
υλικά στο σώμα

γλοιοελαστικό

εύπλαστο

εύθραυστο

Δομή των μακρών οστών



Φλοιϊκό ή συμπαγές οστό
(πύρωση ~ 15%)

ΠΕΡΙΟΣΤΕΟ

εξωτερική φλοιϊκή μεμβράνη

ΕΝΔΟΣΤΕΟ

εσωτερική φλοιϊκή μεμβράνη

Δοκιδωτό , πορώδες,
ή σπογγώδες οστό
(πύρωση ~70%)

Δομή των Οστών

- Φλοιώδες Οστούν
 - 80% του σκελετού
 - 20% ενεργό σε κύκλο αναδιαμόρφωση
 - Αντιστέκεται σε στρέψη και καμπύλωση
 - Μακριά οστά
- Σπογγώδες Οστούν
 - 20% του σκελετού
 - 80% ενεργό σε κύκλο αναδιαμόρφωση
 - Δυνάμεις συμπίεσης



Δομή των μακρών οστών

Επιφυσιτικός δίσκος

Χόνδρος που χωρίζει τη διάφυση από την επίφυση

μετάφυση

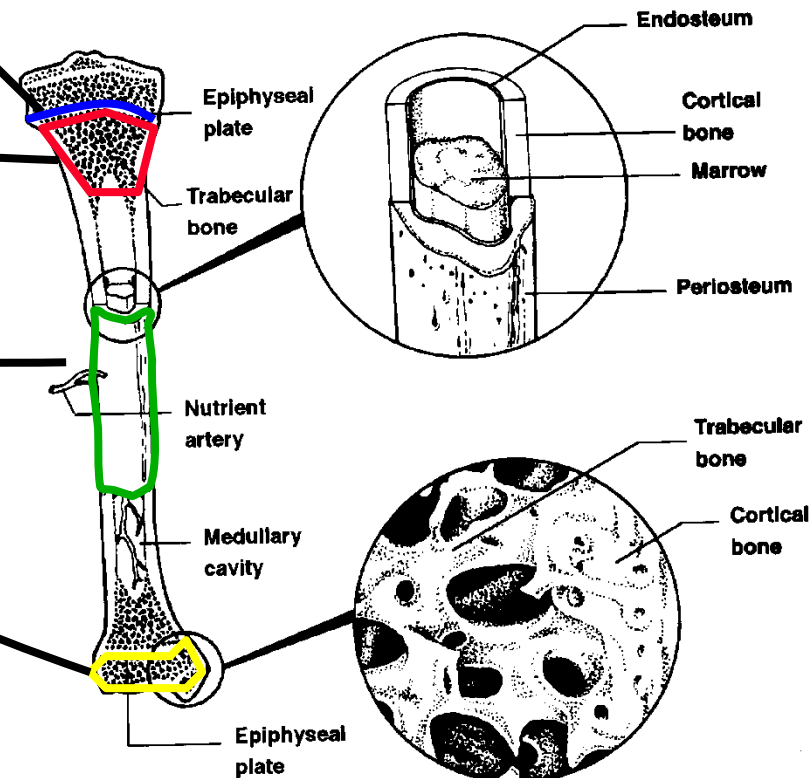
Το άκρο της διάφυσης που περιέχει πορώδες οστό

διάφυση

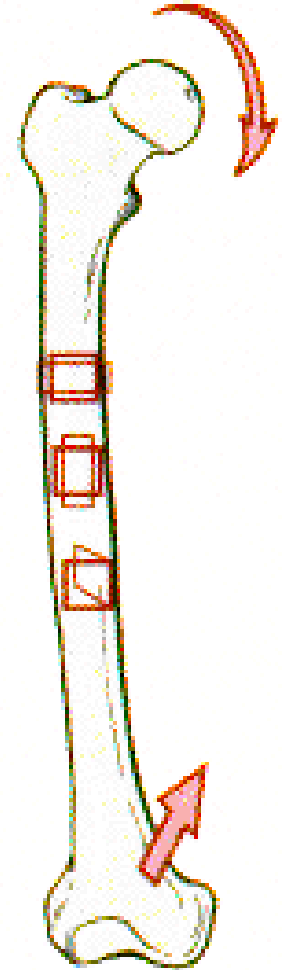
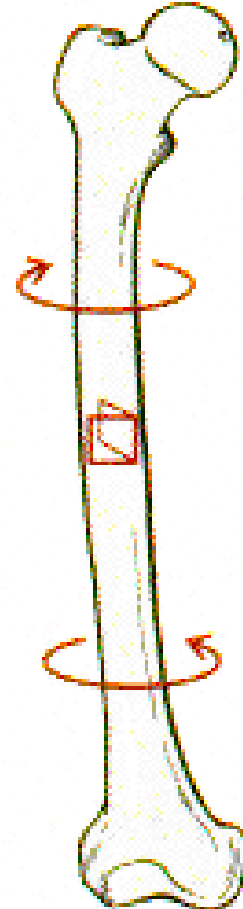
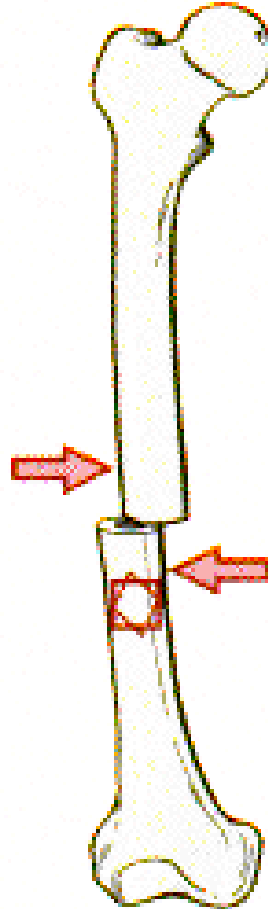
ο άξονας του οστού

επίφυση

Τα άκρα του οστού



Μηχανικές Φορτίσεις



Συμπίεση

Διάταση

Διάτμηση

Συστροφή

Λύγισμα

Συμπιεστική φόρτιση

Κατάγματα σπονδύλων

Αυχενικά κατάγματα

spine loaded through head

e.g., football, diving, gymnastics

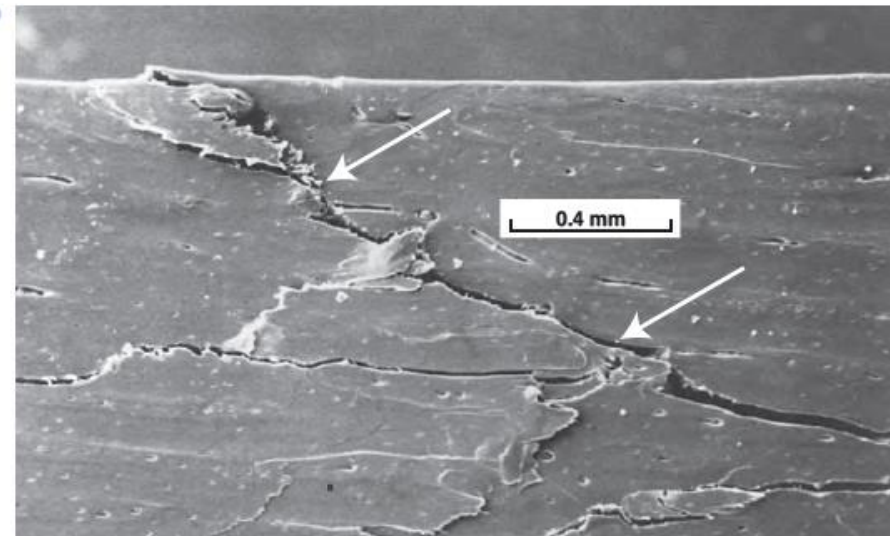
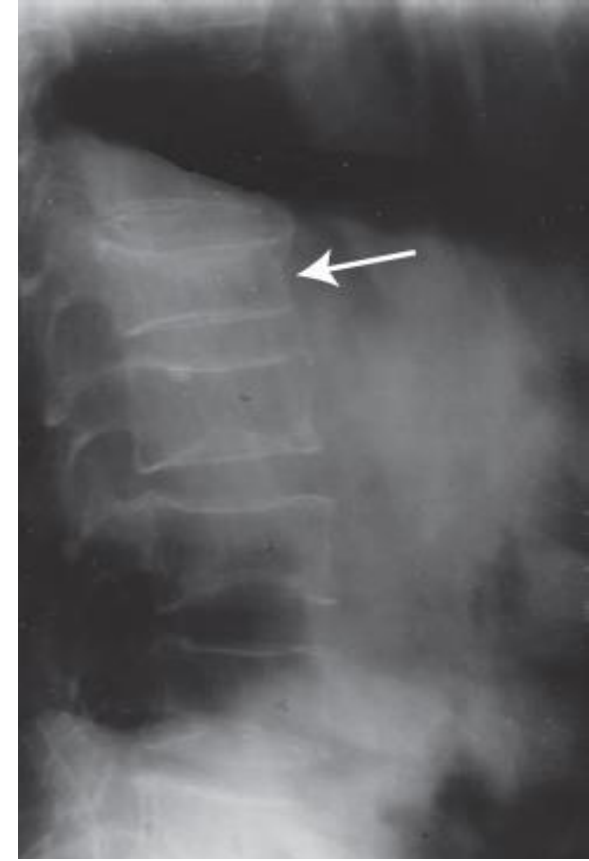
**once “spearing” was outlawed
in football the number of cervical
injuries declined dramatically**

Οσφυϊκά κατάγματα

weight lifters, linemen, or gymnasts

spine is loaded in hyperlordotic

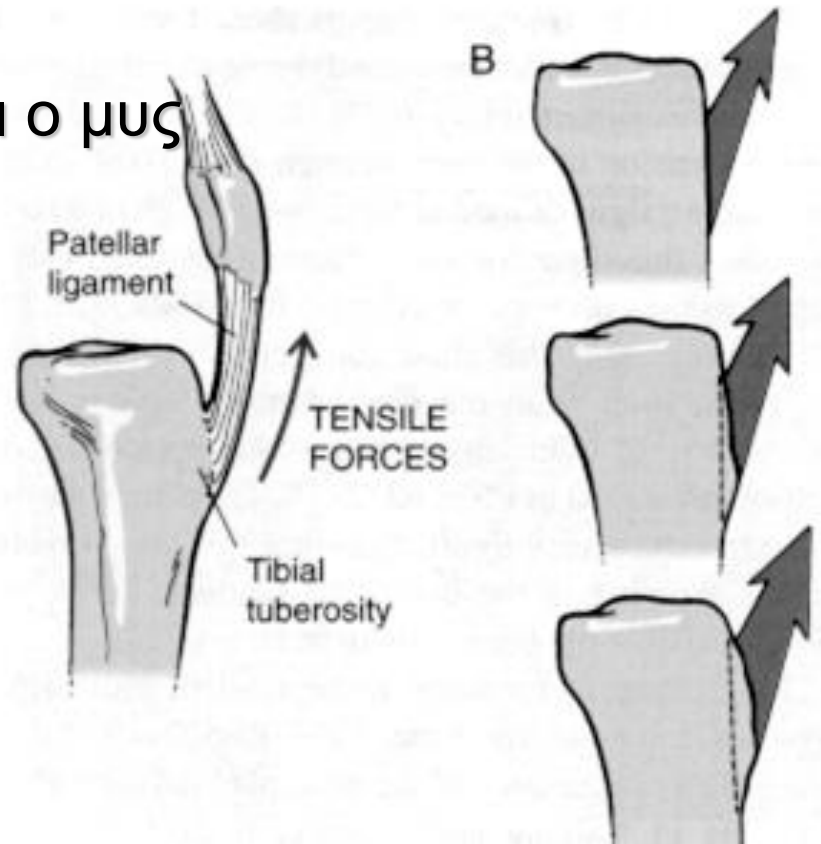
(aka swayback) position



Εκτατικές φορτίσεις

Κύρια πηγή εκτατικής φόρτισης είναι ο μυς

Η τάση μπορεί να διεγείρει την ανάπτυξη A

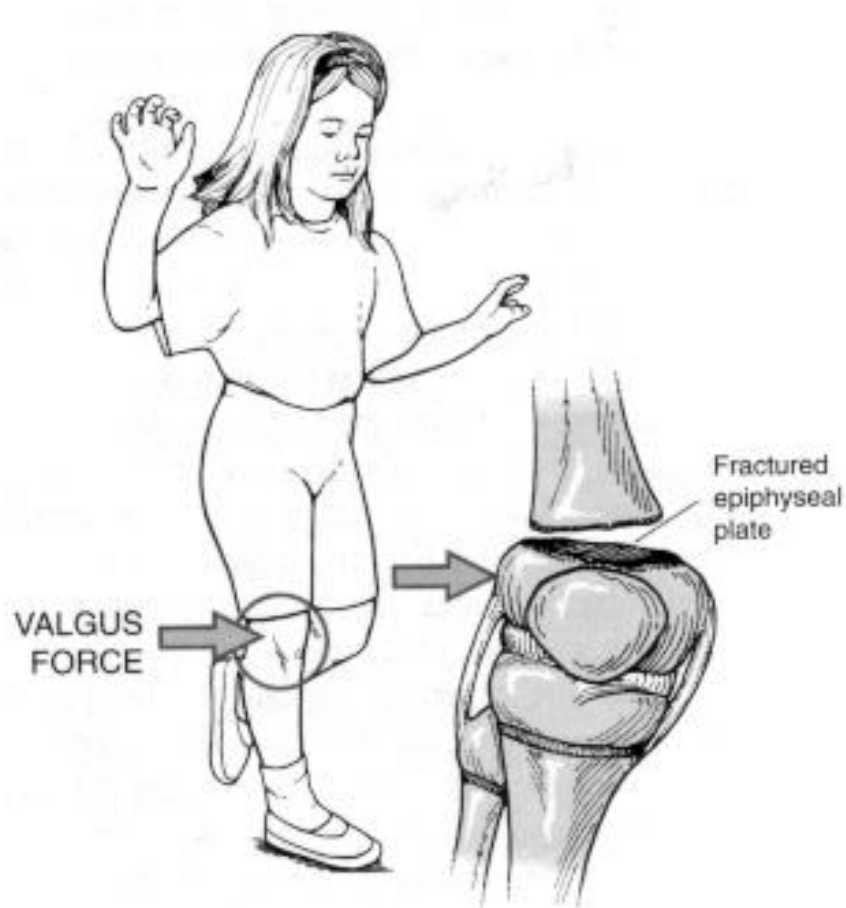
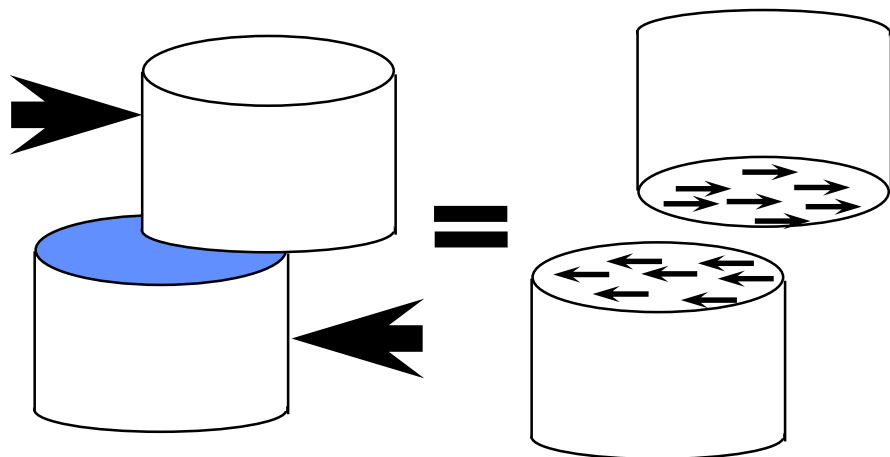


Το κάταγμα που σχετίζεται με εκτατική τάση είναι κυρίως **αποσπαστικό**

Όταν το κνημιαίο όγκωμα δέχεται υψηλές φορτίσεις από τη μυϊκή ομάδα του τετρακεφάλου αναπτύσσει ένα σύνδρομο γνωστό ως **Osgood-Schlatter's**

Διατμητικές δυνάμεις

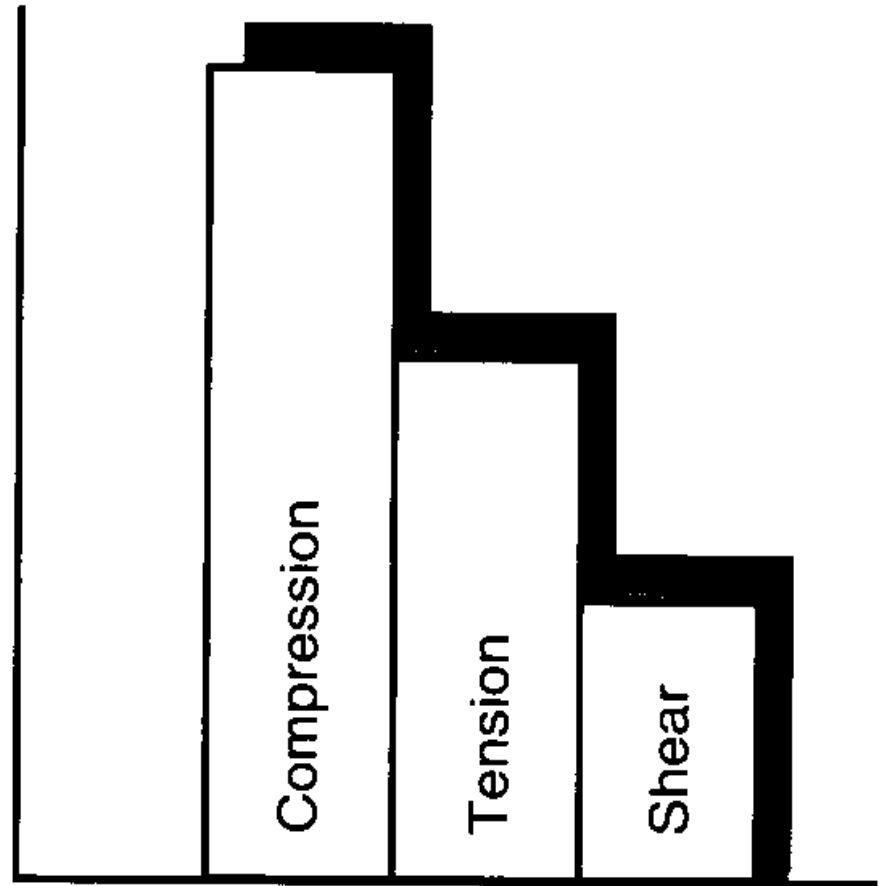
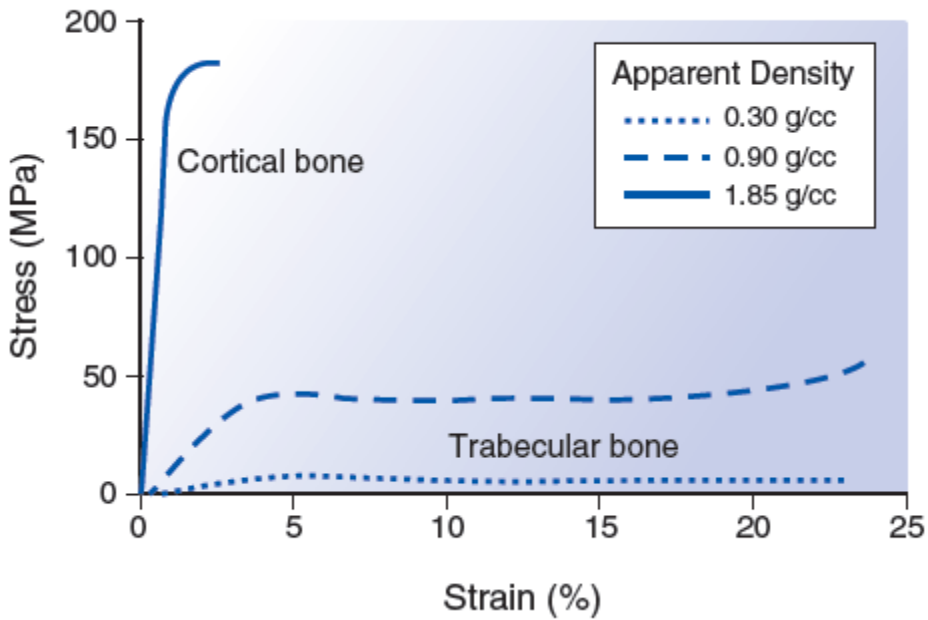
Δημιουργούνται από την δράση συμπιεστικών, εκτατικών και συνδυασμού των δυο δυνάμεων



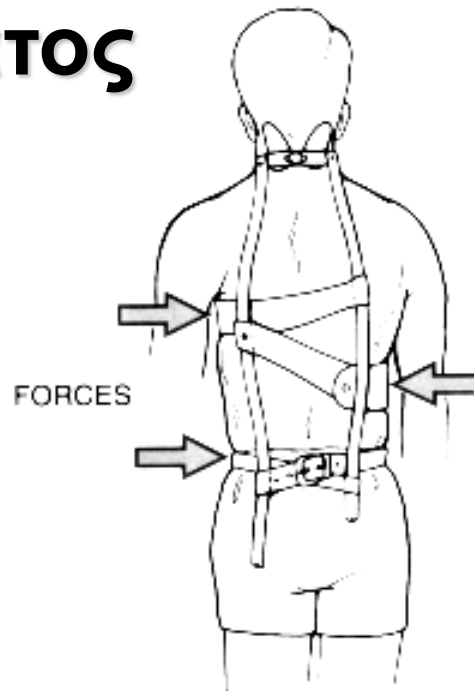
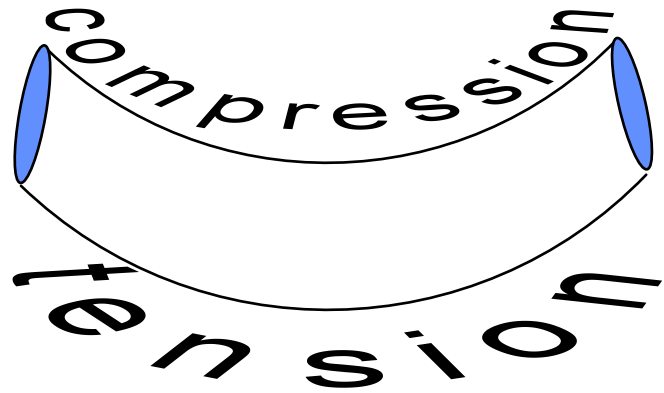
Η ΣΥΜΠΙΕΣΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΤΟΥ ΟΣΤΟΥ

ΥΛΙΚΟ	Συμπιεστική δύναμη (MPa)
Μηρός(φλοιώδης)	131-224
Κνήμη (φλοιώδης)	106-200
Ξύλο (βαλανιδιά)	40-80
Ατσάλι	370

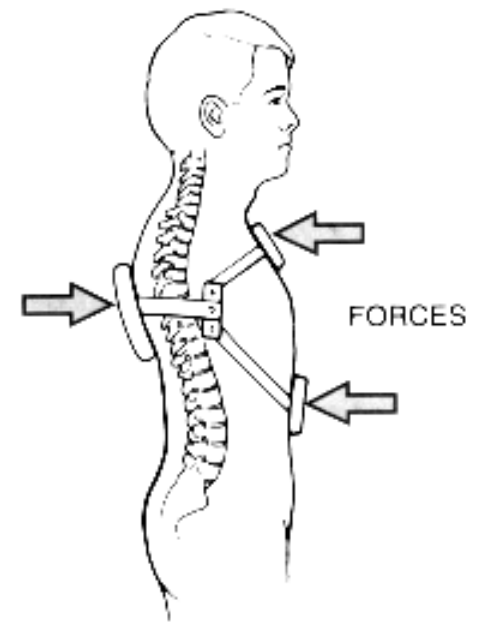
Σχετική δύναμη στο οστό



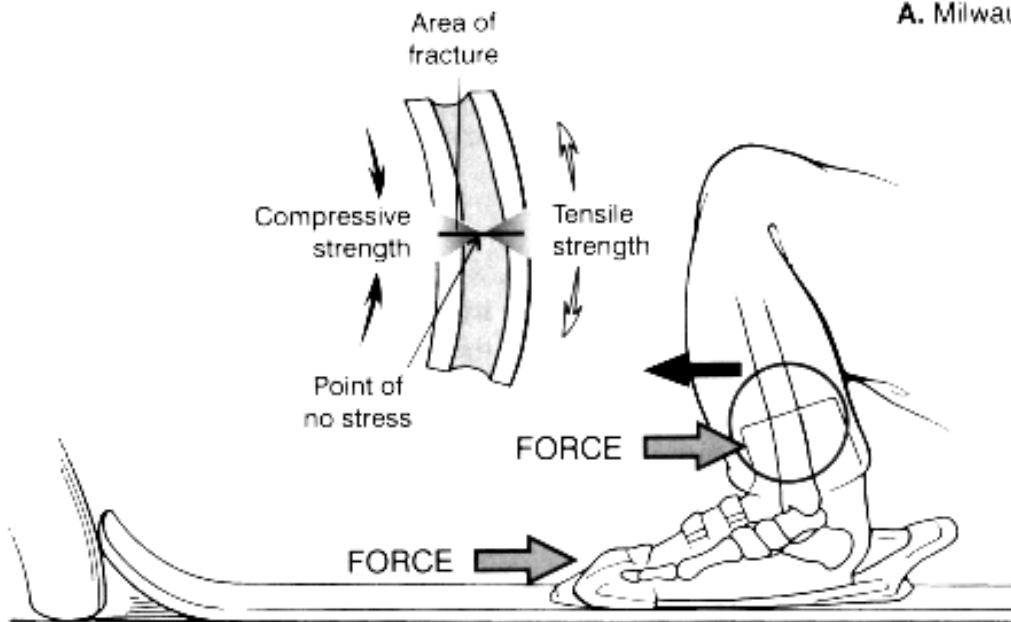
Δυνάμεις λυγίσματος



A. Milwaukee Brace



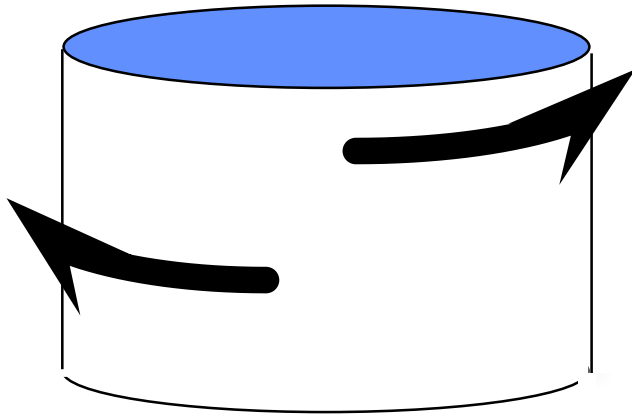
B. Jewett Brace



Συνήθως εφαρμογή
3- 4 σημείων

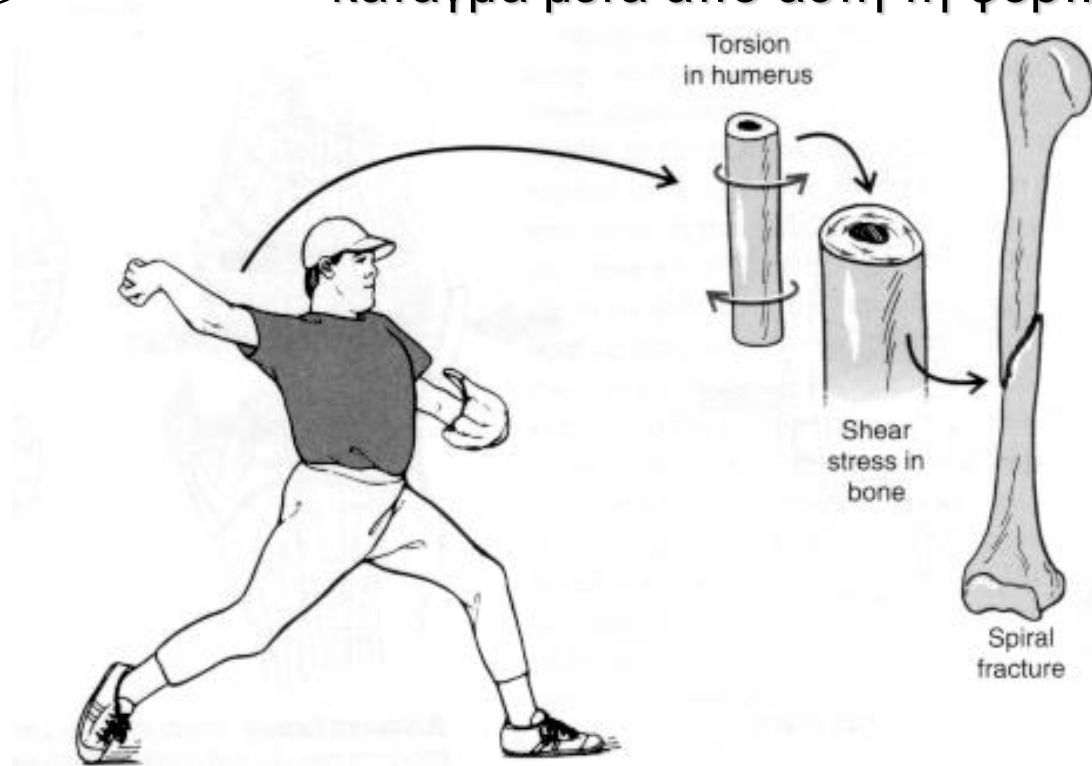
Δυνάμεις συστροφής

Οφείλονται σε μία στροφοική δύναμη η οποία παράγει διατμητικά, εκτατικά και συμπιεστικά φορτία



Τα εκτατικά και συμπιεστικά φορτία είναι υπό γωνία

Συνήθως παρατηρούμε ένα σπειροειδές κάταγμα μετά από αυτή τη φόρτιση



Δύναμη και ανθεκτικότητα του οστίτη ιστού
Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ
του εφαρμοζόμενου φορτίου και
του ποσοστού παραμόρφωσης

ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Χαρακτηριστικά του οστίτη ιστού

ανισοτροπικός

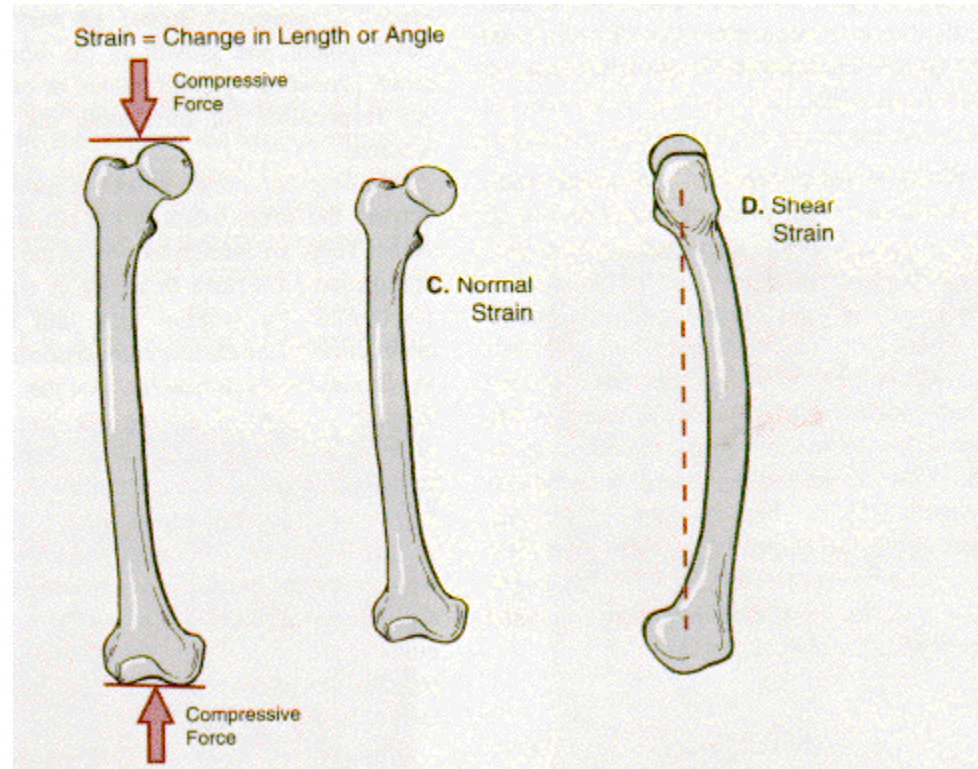
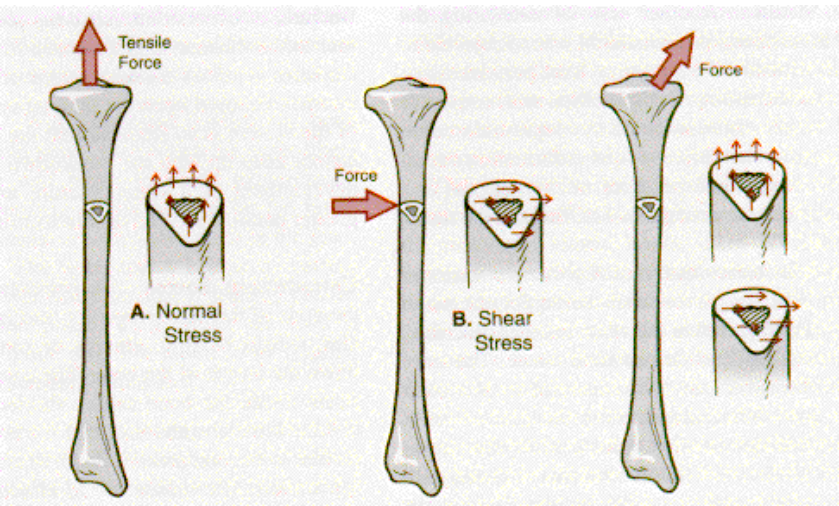
γλοιοελαστικός

ελαστικός

εύπλαστος

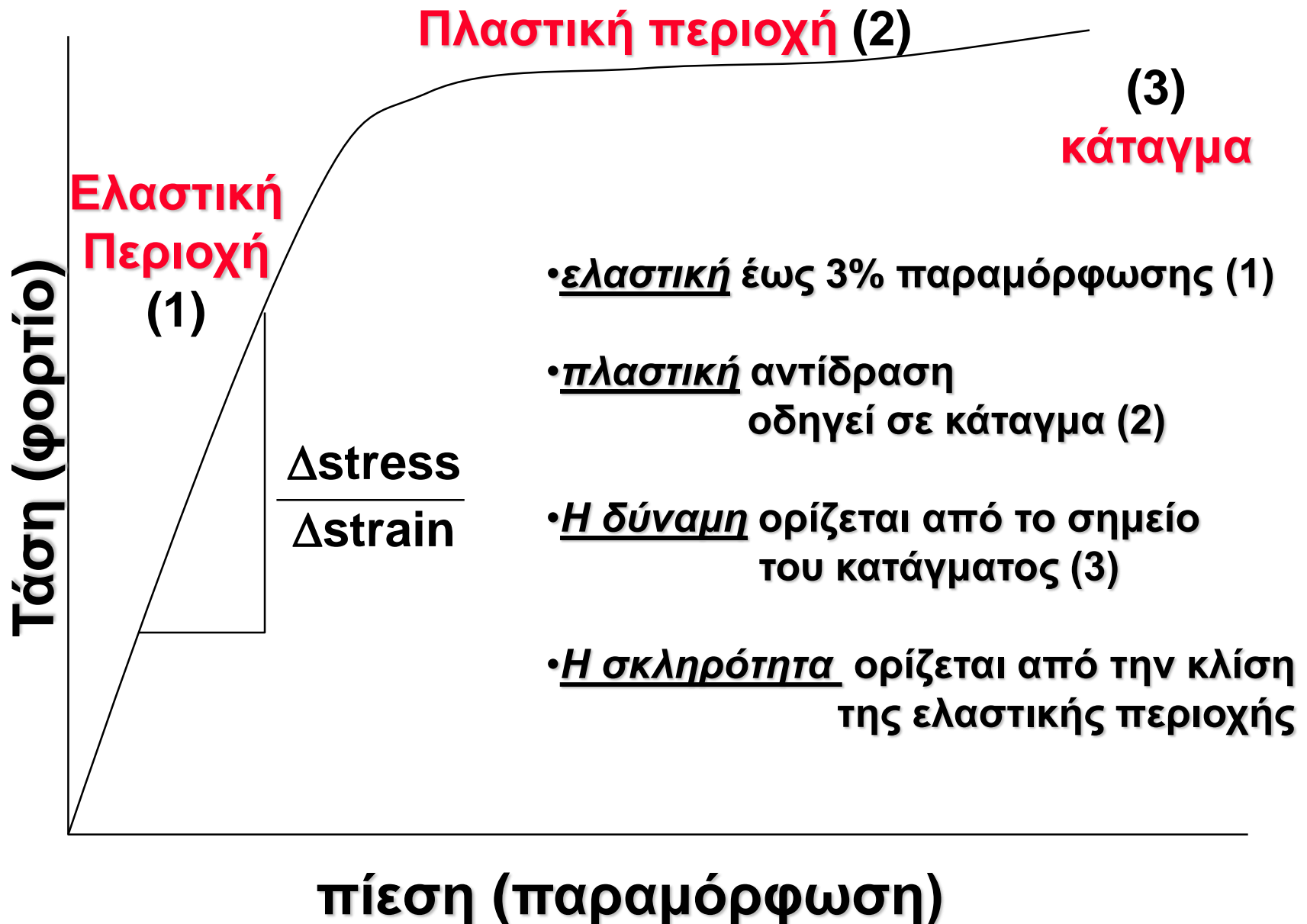
Πίεση = Αλλαγή στο μήκος/γωνία

Τάση = Δύναμη/επιφάνεια



Note: Stress-Strain curve is a normalized Load-Deformation Curve 20

Ελαστικές & Πλαστικές αντιδράσεις



Ελαστικά βιοϋλικά (Οστό)

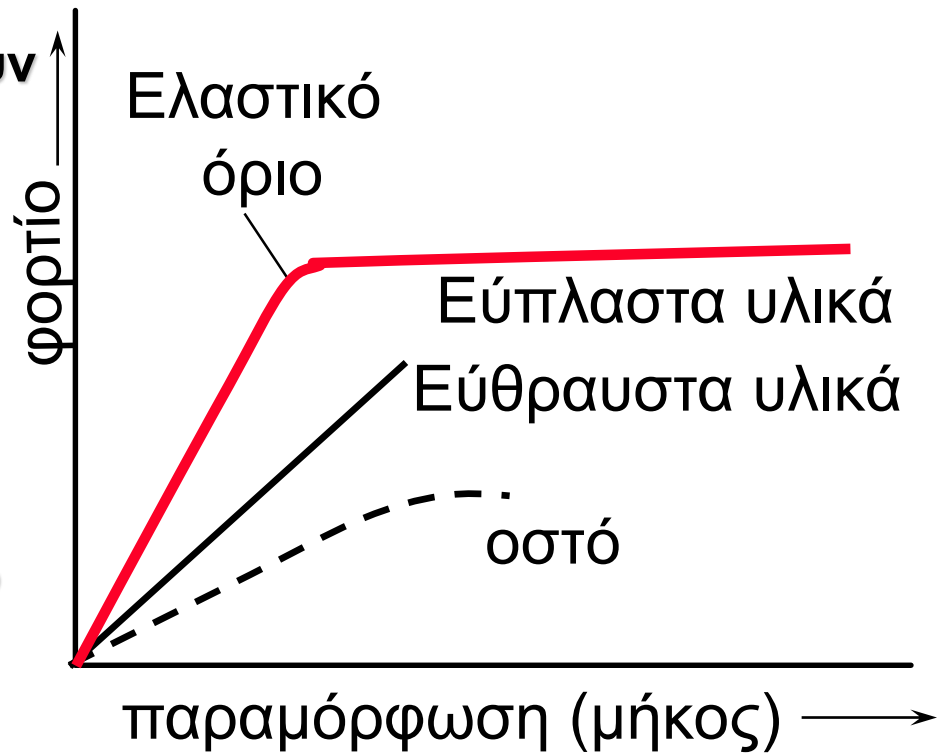
• Ελαστικά/Πλαστικά χαρακτηριστικά

Τα εύθραυστα υλικά καταρρέουν
πριν την ολική παραμόρφωση

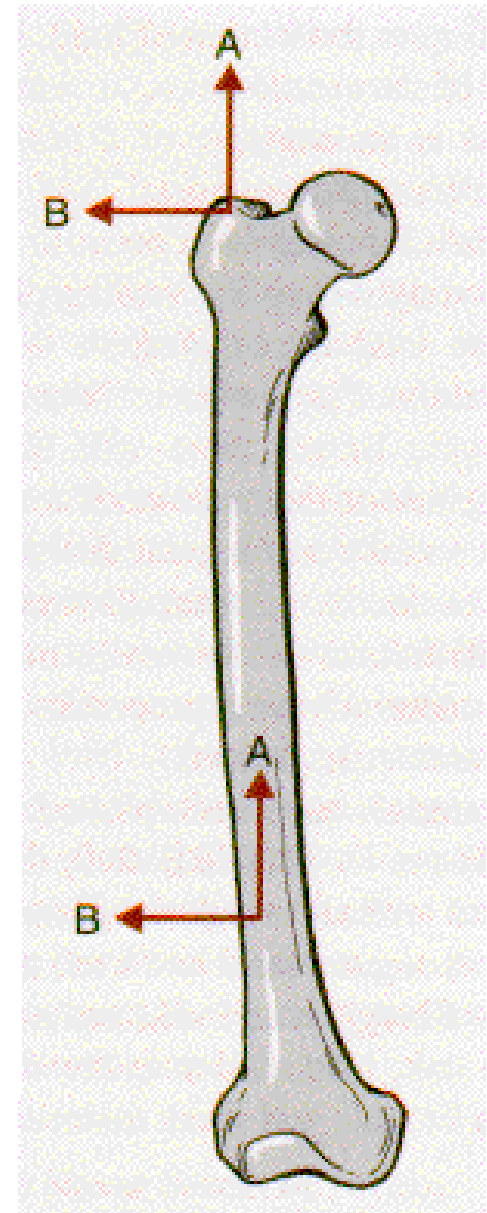
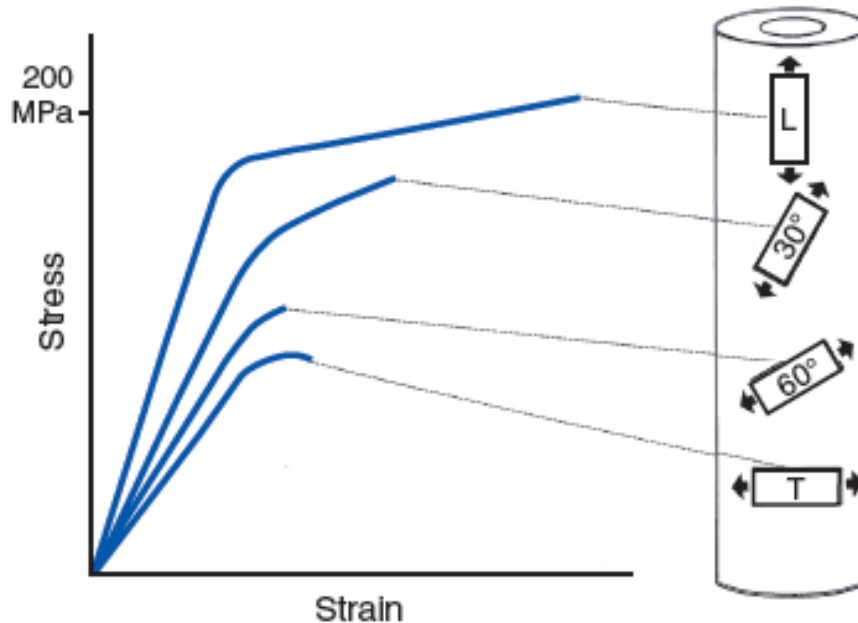
Τα εύπλαστα υλικά
παραμορφώνονται περισσότερο
πριν καταρρεύσουν

Τα οστά παρουσιάζουν και τα δύο

Καμπύλες φόρτισης/παραμόρφωσης

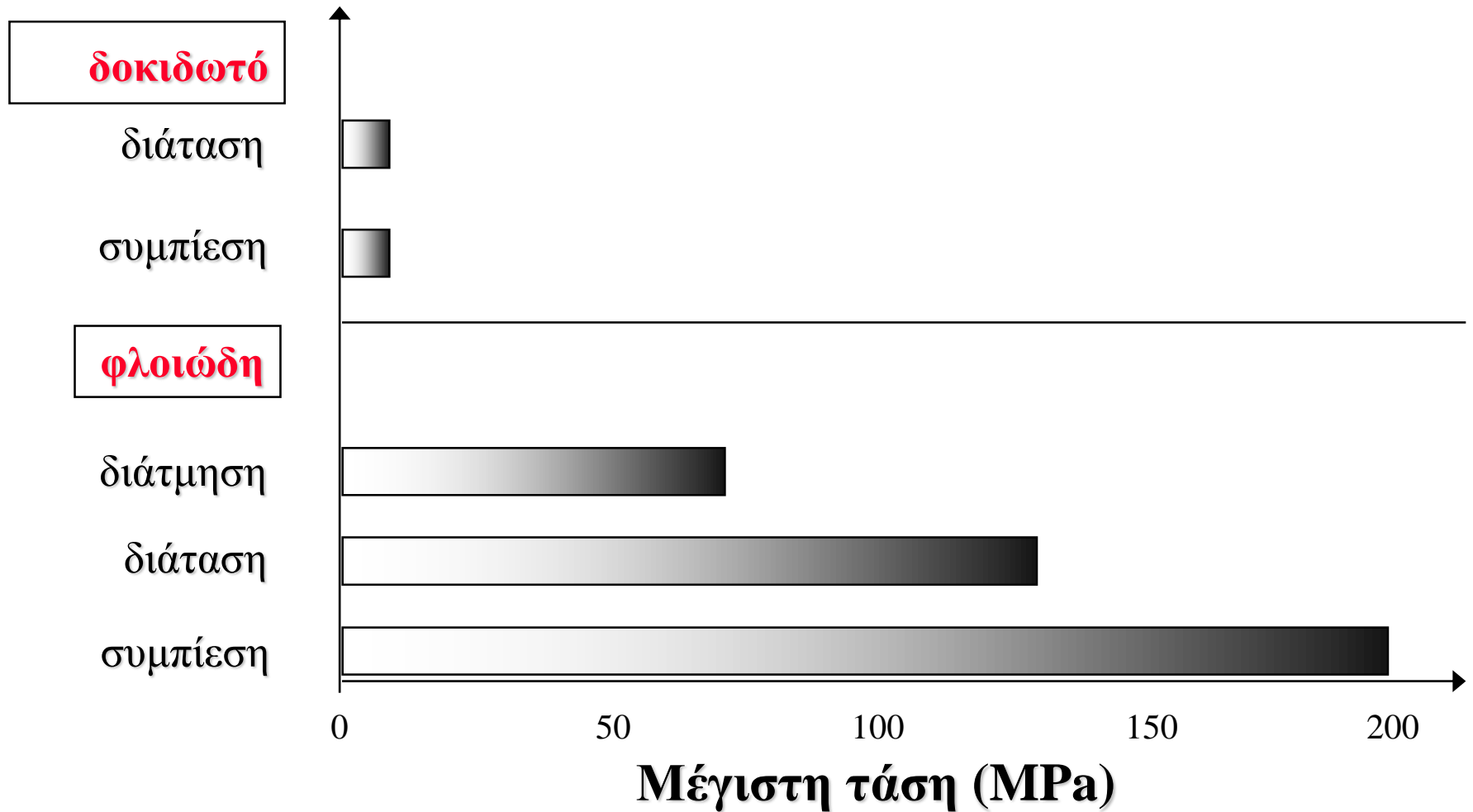


Ανισοτροπική απάντηση στη συμπεριφορά του οστού εξαρτάται από τη φορά της φόρτισης



Το οστό είναι δυνατότερο
κατά τον επιμήκη άξονα - Γιατί?

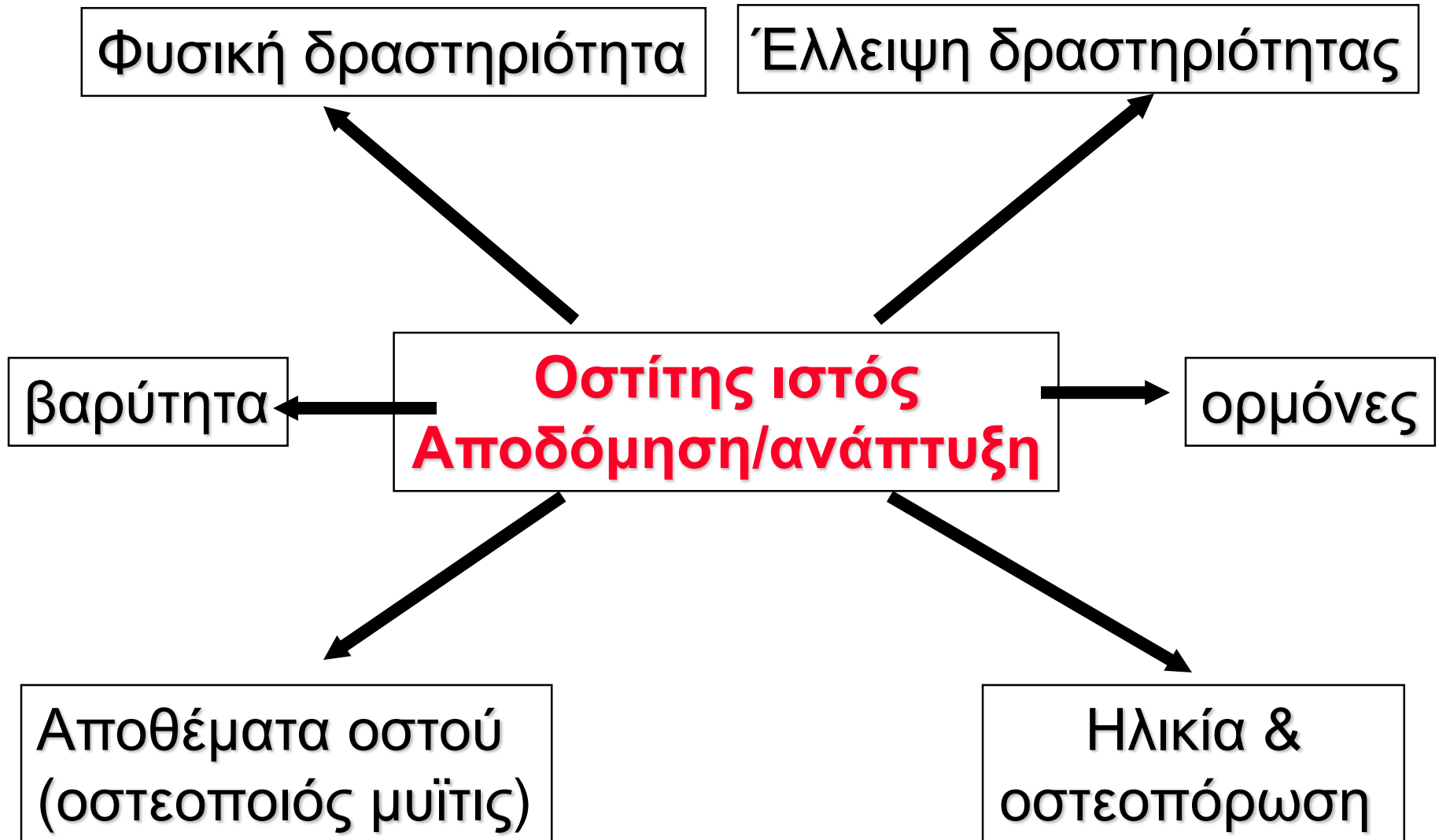
Η Ανισσοτροπία του οστού



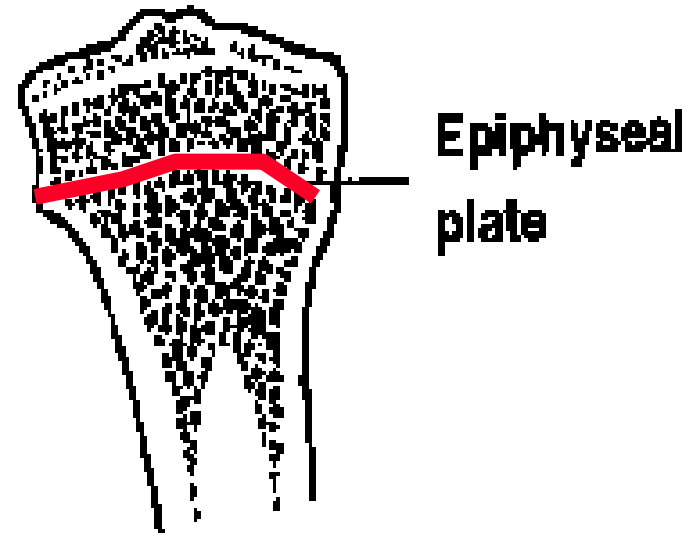
Γλοιοελαστική συμπεριφορά του οστού εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο εφαρμόζεται το φορτίο



Biomechanical Characteristics of Bone

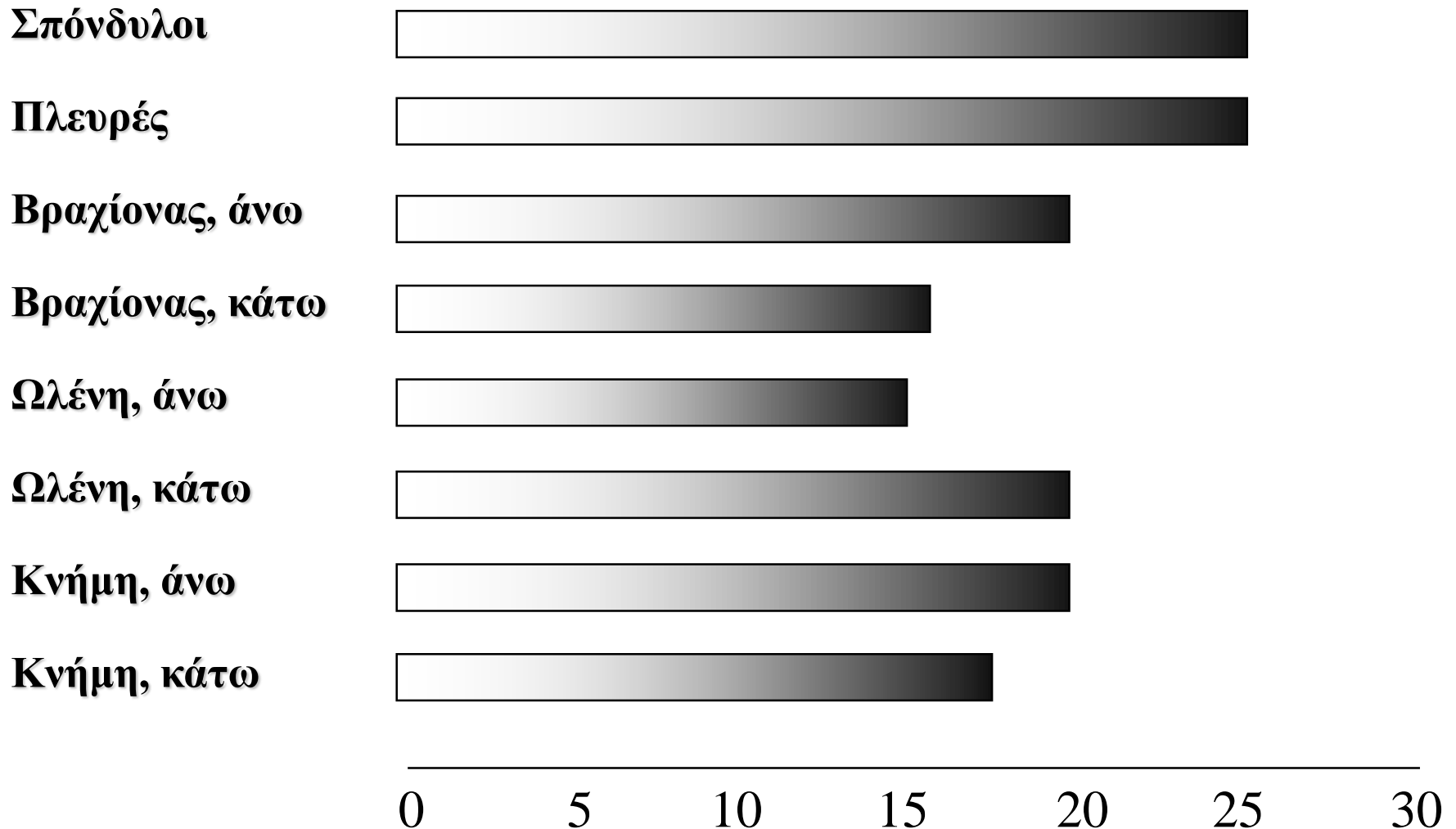


Επιμήκης αύξηση ΤΟΥ ΟΣΤΟΥ



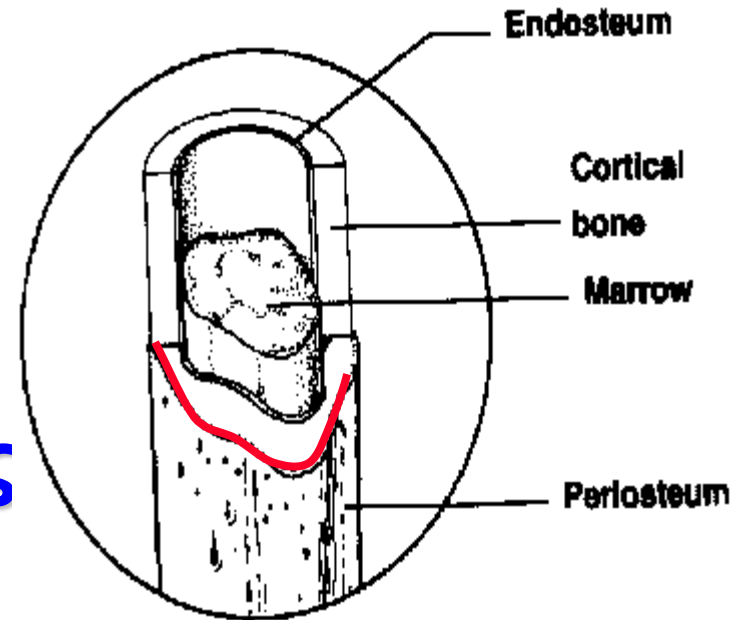
- Συμβαίνει στον
επιφυσιακό ή
“αυξητικό “ δίσκο
- Τα οστικά κύτταρα παράγονται στο
διαφυσιακό άκρο του δίσκου
- Ο δίσκος οστεοποιείται γύρω στα 18-25
και η επιμήκης αύξηση σταματά

Επιφυσιακό κλείσιμο



Περιμετρική αύξηση ΤΟΥ ΟΣΤΟΥ

- Αύξηση κατά περιόδους
- Τα οστικά κύτταρα παράγονται στο εσωτερικό του περιόστεου από οστεοβλάστες
- Παράλληλα το οστό αναρροφάται στην περιφέρεια της έσω κοιλότητας από οστεοκλάστες





Προσαρμογές του οστίτη ιστού στην άσκηση με αντίσταση

...σαν απάντηση στη φόρτιση του οστού, που δημιουργείται από τις μυϊκές συσπάσεις ή άλλου είδους μηχανικές φορτίσεις, το οστό αρχίζει μία διαδικασία δόμησης, η οποία περιλαμβάνει πρωτεϊνοσύνθεση και εναπόθεση μεταξύ των οστικών κυττάρων...

>>>σαν αποτέλεσμα είναι η δημιουργία οστικής μίτρας, η οποία κρυσταλοποιείται με εναπόθεση αλάτων θειϊκού ασβεστίου, αυξάνοντας τη σκληρότητα του οστού και του πάχους του περιόστεου...

Δραστηριότητες που ενεργοποιούν την οστική αύξηση, θα πρέπει να περιλαμβάνουν προοδευτικές φορτίσεις, μεταβλητά φορτία και εξειδίκευση των φορτίων...

Η εξειδίκευση, αναφέρεται σε ασκήσεις που εφαρμόζουν άμεσα τα φορτία σε συγκεκριμένη περιοχή του σκελετού..

*(Κατά την οστεοπόρωση, τα σημεία που είναι πιο επιρρεπή σε κατάγματα, είναι κυρίως στον άξονα του σκελετού (ΣΣ και ισχύο..
...συστήνεται, να δίνεται πιο έντονη φόρτιση της ΣΣ και του ισχύου στην πρώιμη ηλικία, καθώς το σώμα είναι πιο δεκτικό σε αυξήσεις των φορτίων και ταυτόχρονα κορυφώνει την οστική του μάζα...)*



10kV

X50 500µm

12 20 S

Ο νόμος του Wolff

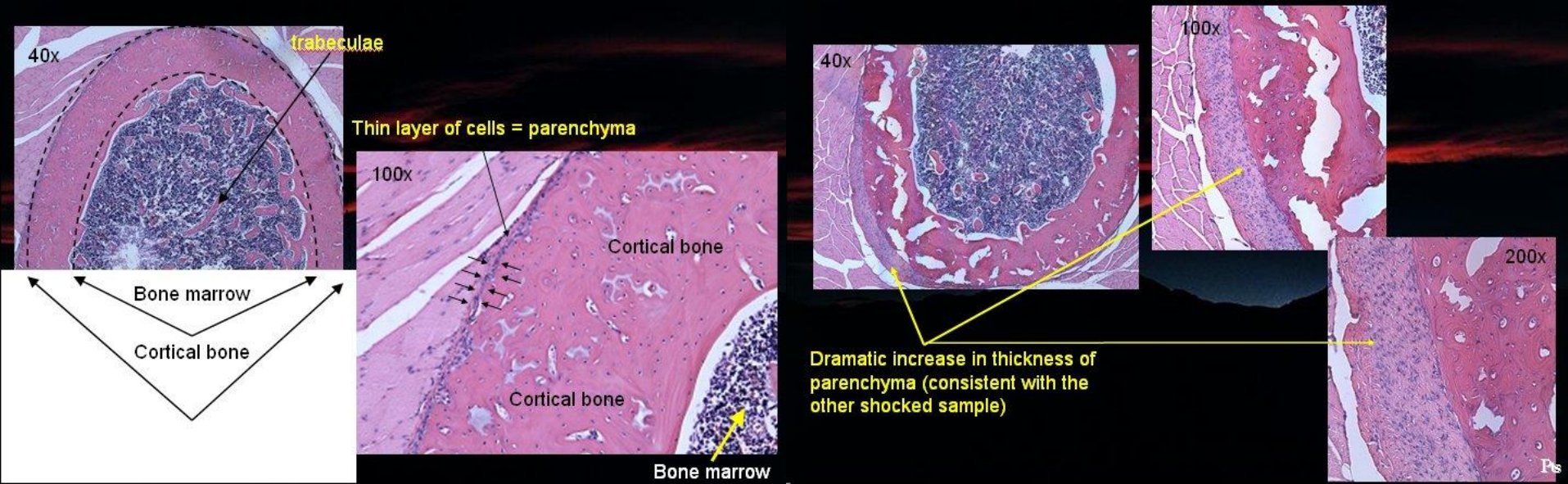
- *Το οστό εναποθέεται όπου χρειάζεται και απορροφάται όπου δεν χρειάζεται*
- *Το σχήμα αντανακλά το ρόλο του*
- *Οι οστεοκλάστες απορροφούν οστό*
- *Οι οστεοβλάστες εναποθέτουν οστό*

Αποθέματα οστού

- Απάντηση στη δραστηριοποίηση
 - **Τακτική άσκηση** διεγείρει την οστεοποίηση στο σώμα
 - **Μείωση μηχανικών φορτίσεων**
 - Μείωση επιπέδων ασβεστίου(Ca)
 - Απώλεια ασβεστίου από τα νεφρά
 - Αυξάνει την πιθανότητα σχηματισμού πέτρας
 - **Επίδραση μη φόρτισης (υποβαρύτητα)**

Normal bone

Shocked cortical bone



Αλλαγές στα οστά με το χρόνο πρώιμη ηλικία

- **Osgood-Schlatter's σύνδρομο**
 - Δημιουργία φλεγμονής, ασβεστοποίησης, ή αποσπαστικού κατάγματος στο κνημιαίο όγκωμα
- **Ανισορροπία στη δύναμη μυ - οστού**
 - “αυξητικός παράγων” μεταξύ του μήκους του οστού και της μυοτενόντιας μονάδας (e.g., απότομη αύξηση στο μηρό και στη κνήμη επιφέρει υψηλή πίεση του επιγονατιδικού τένοντα και του κνημιαίου ογκώματος)
 - Κατά την εφηβία η μυική αύξηση (testosterone) μπορεί να ξεπεράσει τον οστικό ρυθμό ανάπτυξης προκαλώντας αποκόλληση του μυ

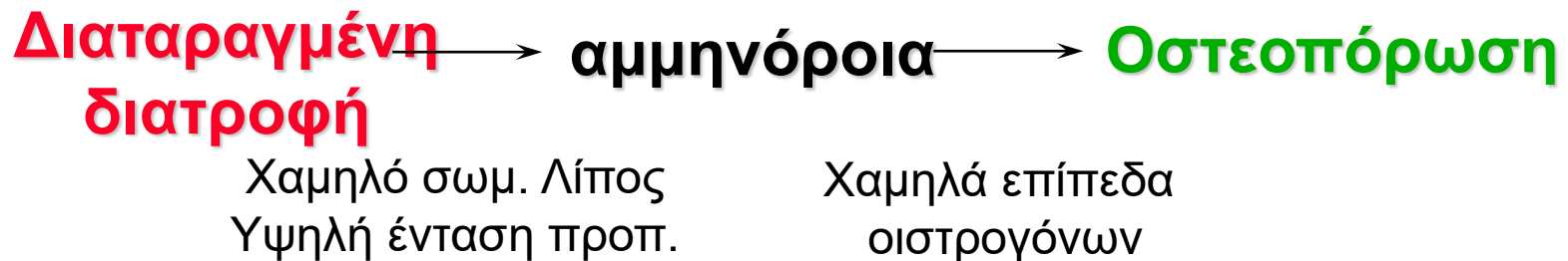
Αλλαγές στα οστά με το χρόνο νεαρή ηλικία

- Τραυματισμοί από υπέρχρηση
 - Επαναλαμβανόμενες φορτίσεις επιδρούν στις σκελετικές δομές
 - Leaguer's Elbow
 - Πρώϊμο κλείσιμο του επιφυσιακού δίσκου
 - γυμνάστριες
 - 4X μεγαλύτερη εμφάνιση παθολογίας στη μέση στις γυμνάστριες από το γενικό πληθυσμό (Jackson, 1976)

Αλλαγές στα οστά με το χρόνο ενήλικες

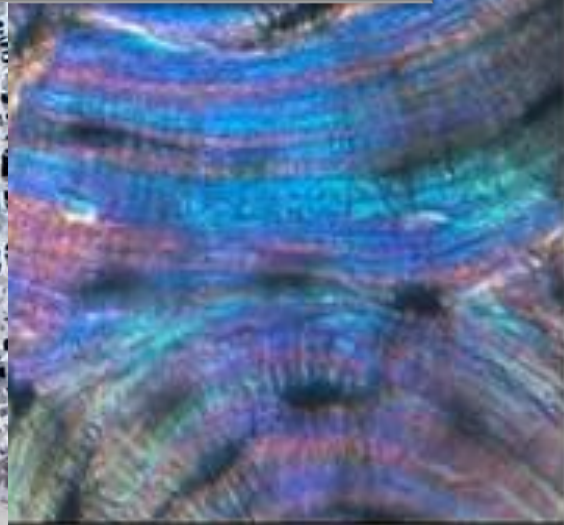
- **Ορμονική επίδραση**

- Οιστρογόνα για διατήρηση των μετάλλων
- Πάντα μετά την εμμηνόπαυση
- Η σχέση μεταξύ αμμηνόροιας και μείωσης των οιστρογόνων σε αθλήτριες:



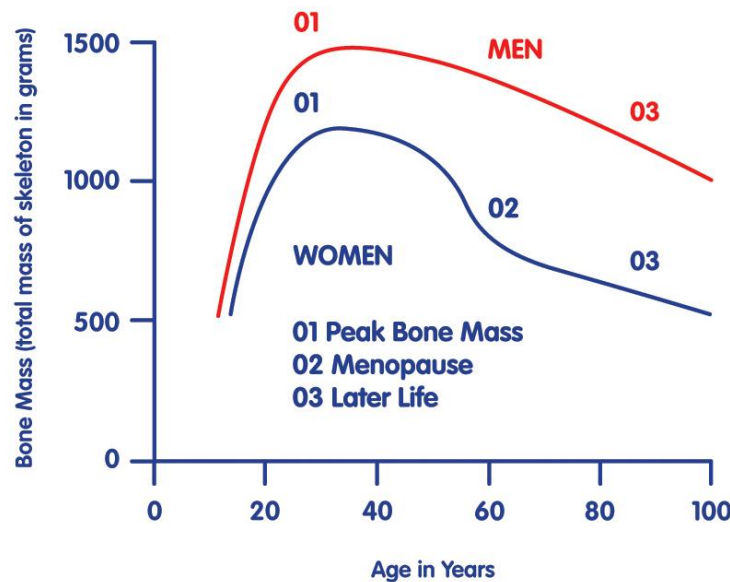
Αλλαγές στα οστά με το χρόνο ενήλικες

- Μικρή αλλαγή στο μήκος
- Μεγαλύτερη αλλαγή στη σύσταση
 - Μείωση της χρήσης ελαττώνει τη σύσταση
 - ΜΕΙΩΝΕΙ ΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΤΟΥ ΟΣΤΟΥ
- **δραστηριότητα**
 - Αυξημένη δραστηριότητα οδηγεί σε αύξηση της διαμέτρου, σύστασης, εύρους του φλοιού και του ασβεστίου



Αλλαγές στα οστά με το χρόνο ενήλικες

- 30 χρόνων άνδρες και 40 γυναίκες
 - BMD κορύφωση (Frost, 1985; Oyster *et al.*, 1984)
 - Ακολουθεί μείωση BMD, διαμέτρου και των μετάλλων μετά από αυτό
- Η δραστηριότητες επιβραδύνουν τη γήρανση.....



Graph shows typical changes in bone mass with age.
Source: National Osteoporosis Society



Οστεοπενία

Μειωμένη BMD
Παράγων
κατάγματος

Οστεοπόρωση

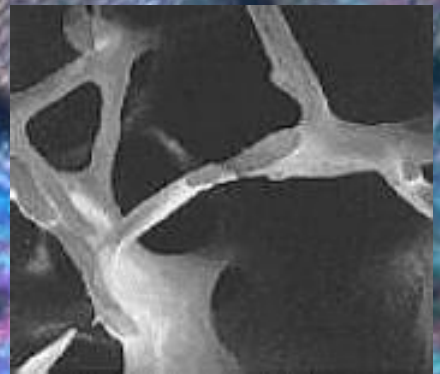
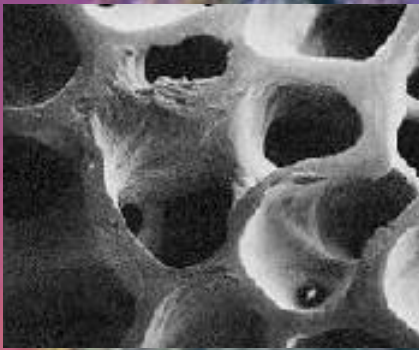
Πολύ μειωμένη BMD
Υψηλός παράγων
κατάγματος

Ορμονικοί
παράγοντες

Διαιτητικοί
παράγοντες

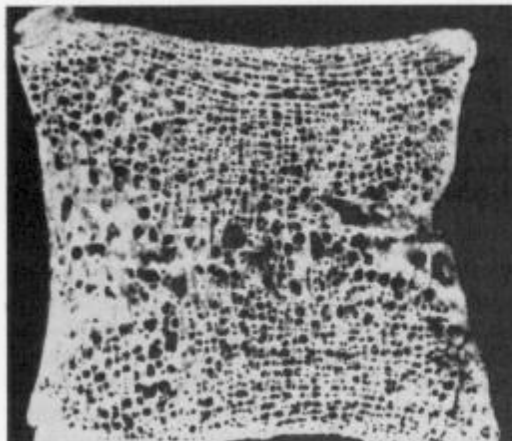
Φυσική
δραστηριότητα

Οστεοπόρωση

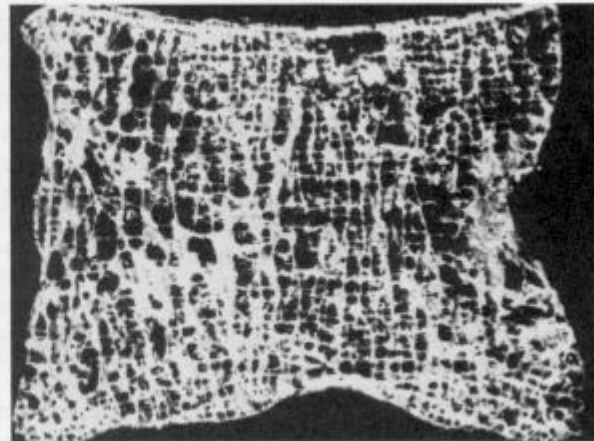


Οι γυναίκες χάνουν 0.5-1% της οστικής μάζας κάθε χρόνο έως τα 50 ή την εμμηνόπαυση

Μετά την εμμηνόπαυση ο ρυθμός απώλειας αυξάνει (έως και 6.5%)



A



B

Κονταίνουμε με τα χρόνια?

- Η οστεοπόρωση επηρεάζει τη δομική ακεραιότητα των σπονδύλων
 - Αδυνατίζει το δοκιδωτό του οστού
 - Οι σπόνδυλοι “καταρρέουν”
 - Μειώνεται το ύψος του σπονδυλικού σώματος
 - Η πρόσθια επιφάνεια της ΣΣ φορτίζεται περισσότερο και η συμπίεση σχηματίζει σφηνοειδής σπονδύλους
 - Δημιουργείται κυφωτική καμπύλη γνωστή ως *Dowager’s Hump*
 - Για κάποιο λόγο οι σπόνδυλοι στους άνδρες αυξάνουν σε διάμετρο και έτσι περιορίζονται οι αρνητικές επιδράσεις

@ErgoMechLab

