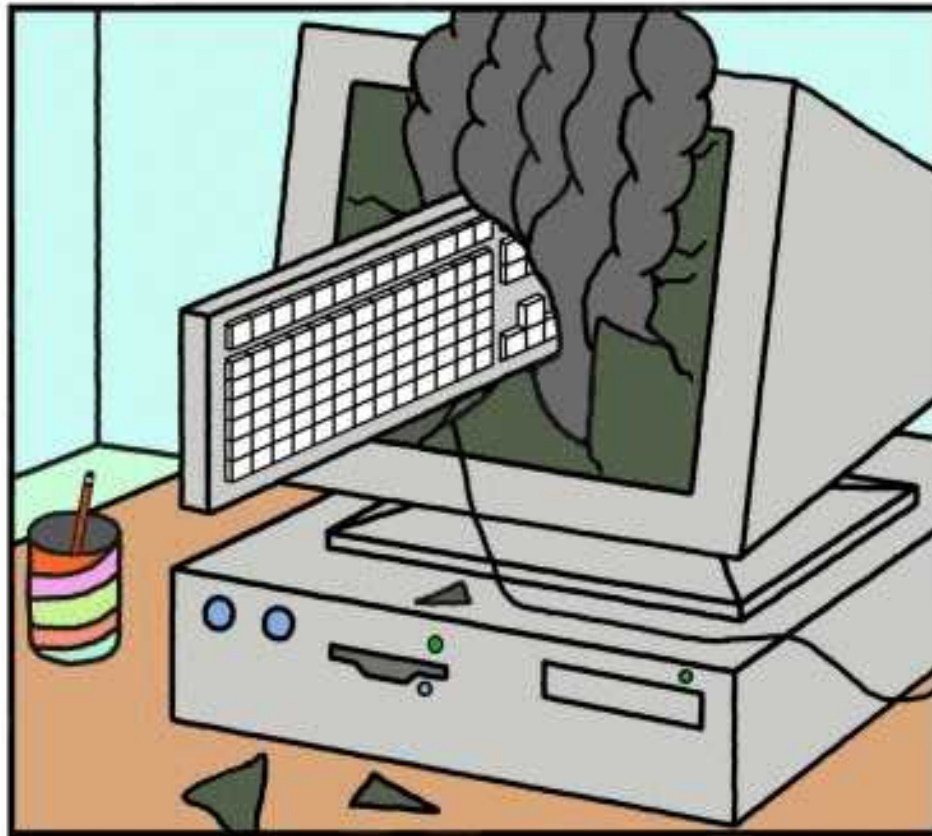




# Κατάγματα Κόπωσης

---

Χ. Γιαννακόπουλος



**Stress Fracture**



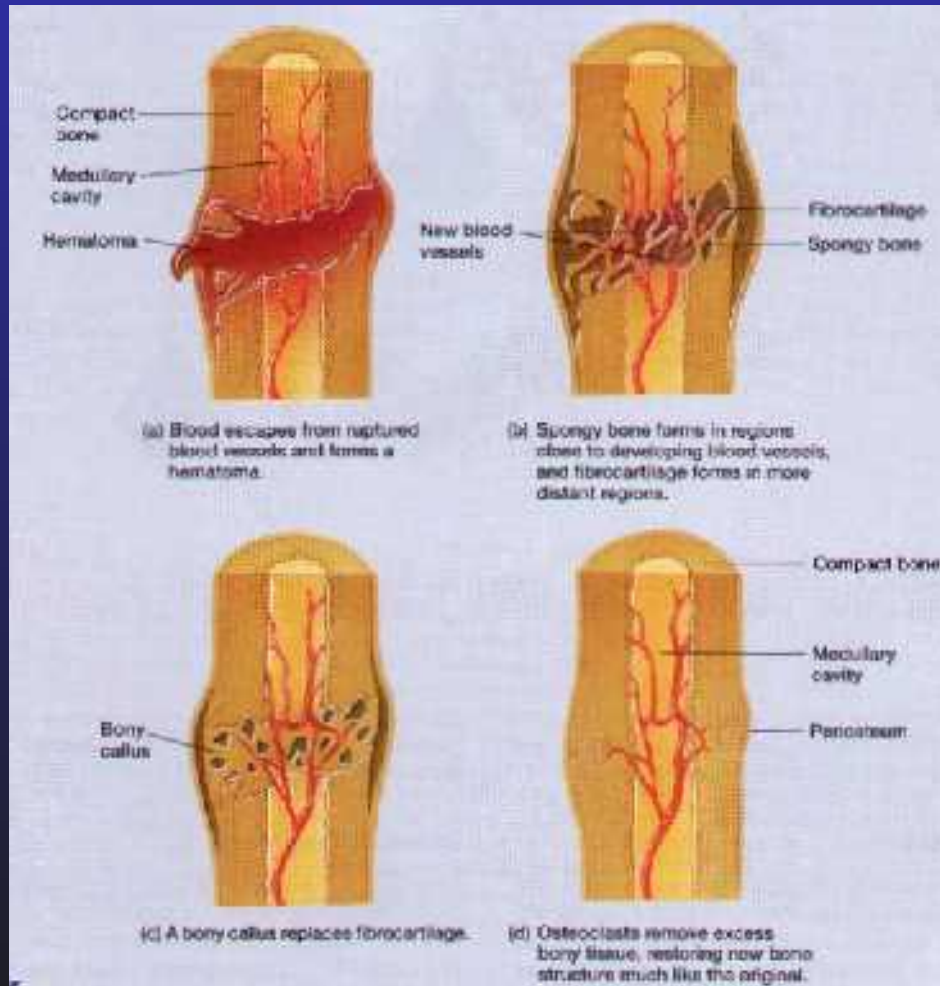
---

Ο οστίτης ιστός αποτελεί το 17% του σώματος  
και δέχεται σημαντικά φορτία.

**Ground Reaction Force (άλμα)**

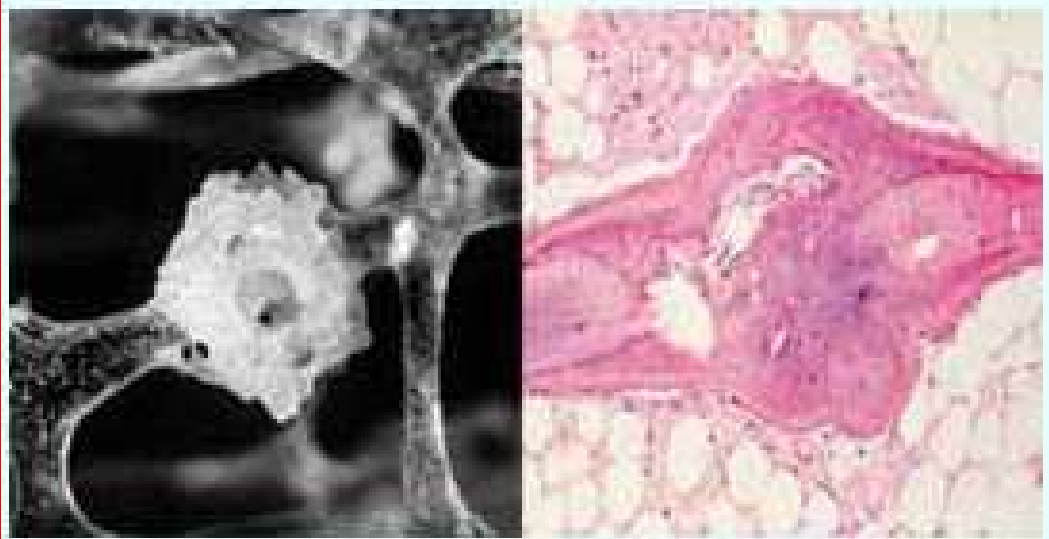
12x το βάρος του σώματος

Ο οστίτης ιστός έχει την ικανότητα σχεδόν πλήρους αποκατάστασης των βλαβών που οφείλονται στη συνεχή χρήση του χωρίς την παραμονή «ουλής».



## Παθοφυσιολογία # Κόπωσης

- ✓ Το οστό αντιδρά στη φόρτιση με αύξηση της οστεοβλαστικής δραστηριότητας.
- ✓ Η επάρκεια αυτού του μηχανισμού είναι πεπερασμένη.
- ✓ Σε υπέρμετρη φόρτιση υπερτερεί η οστεοκλαστική δράση.
- ✓ Σε επιμονή δημιουργία μικροκαταγμάτων.



Trabecular Microfracture



# Κατάγματα Χωρίς Σημαντικό Τραυματισμό

---

Παθολογικό Οστό

(παθολογικό #)

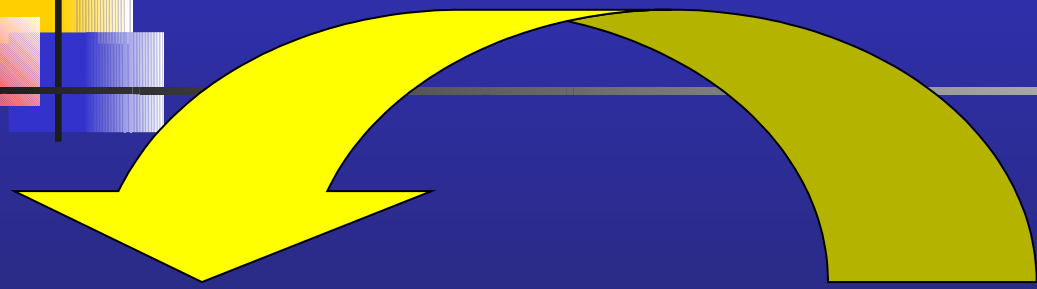
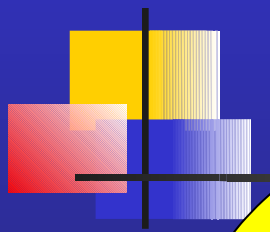
Φυσιολογικό Οστό

Υγιές

Ανεπαρκές

(κάταγμα κόπωσης)

(Ο.Π)

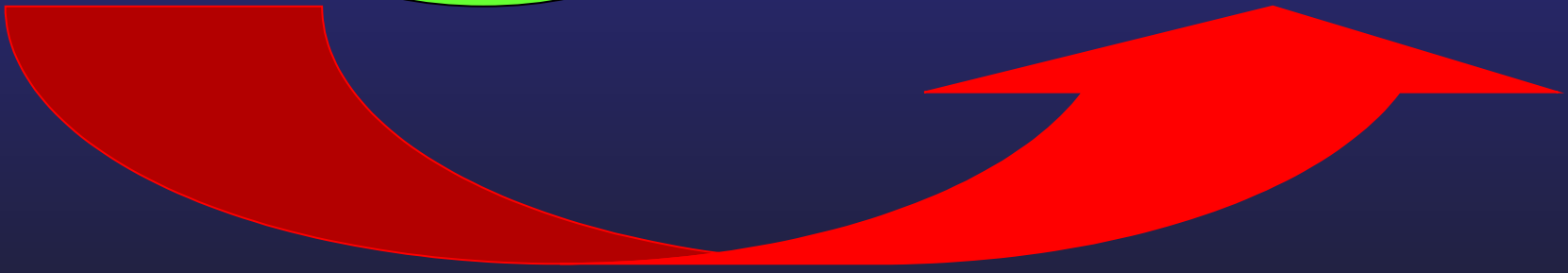


**strain**

**ανακατασκευή**

**βλάβη**

**Κάταγμα Κόπωσης**



Θετικός ανατροφοδοτικός μηχανισμός, ο οποίος είναι δυνατό να καταστεί ασταθής και να προκαλέσει κάταγμα κόπωσης

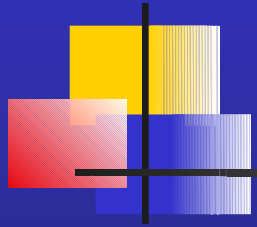




---

✓ Ο οστίτης ιστός διαθέτει ισορροπία μεταξύ ανακατασκευής και φόρτισης.

✓ Εάν η βλάβες υπερτερούν της επιδιόρθωσης παρουσιάζονται σημεία μηχανικής αποτυχίας.

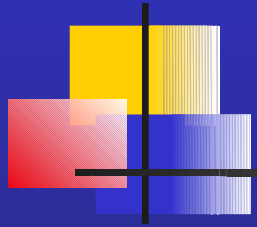


Οι κακώσεις από καταπόνηση αποτελούν ένα φάσμα εκτεινόμενο από οίδημα του μυελού ως πλήρες κάταγμα.

ΟΙΔΗΜΑ

ΚΑΤΑΓΜΑ

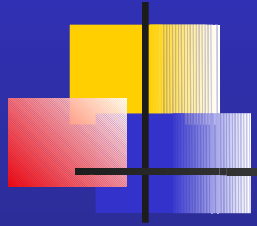




- Bone loading
- Bone health
- Gait mechanics
- Training
- Impact attenuation

## Bone Response

- Normal remodeling
- Accelerated remodeling
- Stress reaction
- Stress injury
- Stress fracture
- Complete fracture



Συμβαίνουν όταν μικροκατάγματα αθροίζονται στο μυελό και στο φλοιό εξαιτίας της αδυναμίας προσαρμογής σε ρυθμικές, επαναλαμβανόμενες φορτίσεις που ασκούνται σε υποφυσιολογικό ρυθμό.



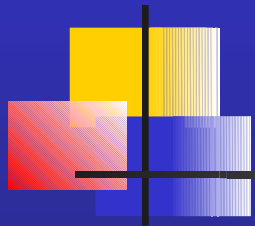
## Bone Microdamage Accumulation

Έχει ενοχοποιηθεί σε περιπτώσεις σκελετικής ευθρυψίας (skeletal fragility) και στην παθομηχανική των οστεοπορωτικών καταγμάτων και # κόπωσης

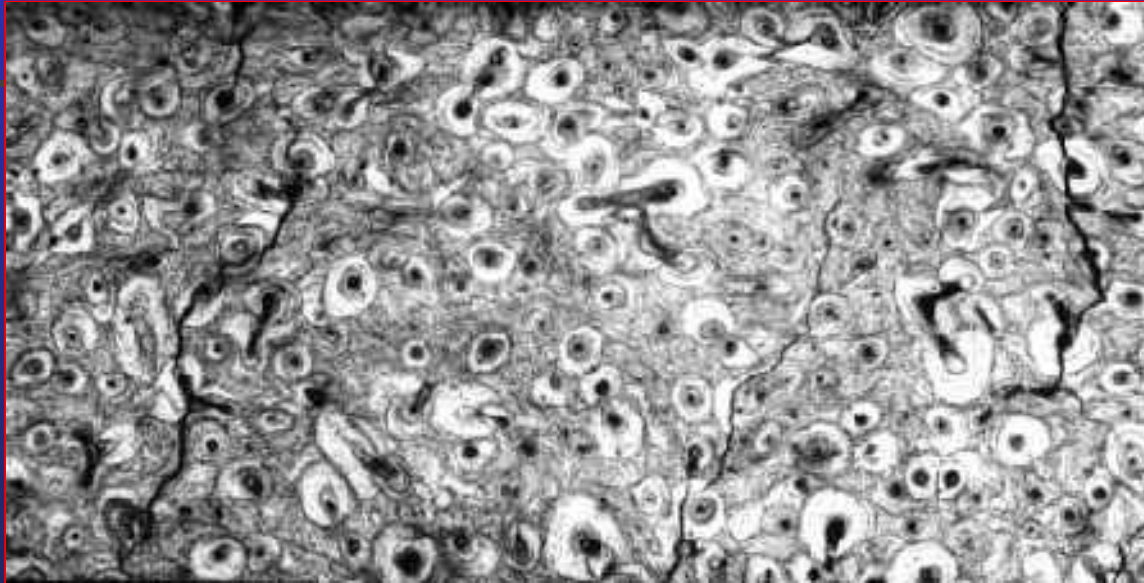
(Burr et al., 1997)



Microdamage in human bone

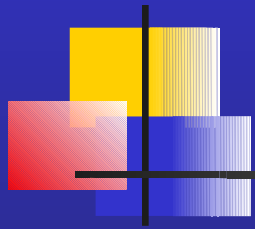


- Περιοχές με κόπωση παρουσιάζουν σημαντική δραστηριότητα ανακατασκευής
- Εάν οι μικροβλάβες ακολουθούν ή έπονται της ανακατασκευής είναι ασαφές.
- Υπάρχουν 3x περισσότερα διαστήματα απορρόφησης από microcracks
- Microdamage συμβαίνει σε εστίες αυξημένης ανακατασκευής, όπου η οστεοκλαστική δράση αδυνατίζει το οστό αυξάνοντας τις δυνάμεις που ασκούνται τοπικά προ της εναπόθεσης νέου οστού.



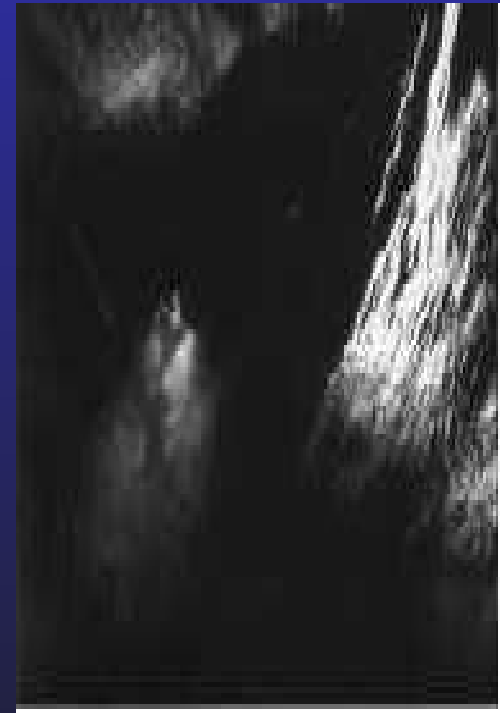
Coalescence cracks 0.8mm από το επίπεδο της ρωγμής.  
Η κατεύθυνση διάδοσης της κύριας ρωγμής είναι ΑΡ--ΔΕ

# Photo sequence Laser Scanning Confocal microscope focusing in and out in depth



3D visualization of cracks next to a man-made hole to create a sharp stress gradient in its vicinity in a specimen of human femoral bone subjected to tension

The microcracking cloud is resolved into countless small microcracks.

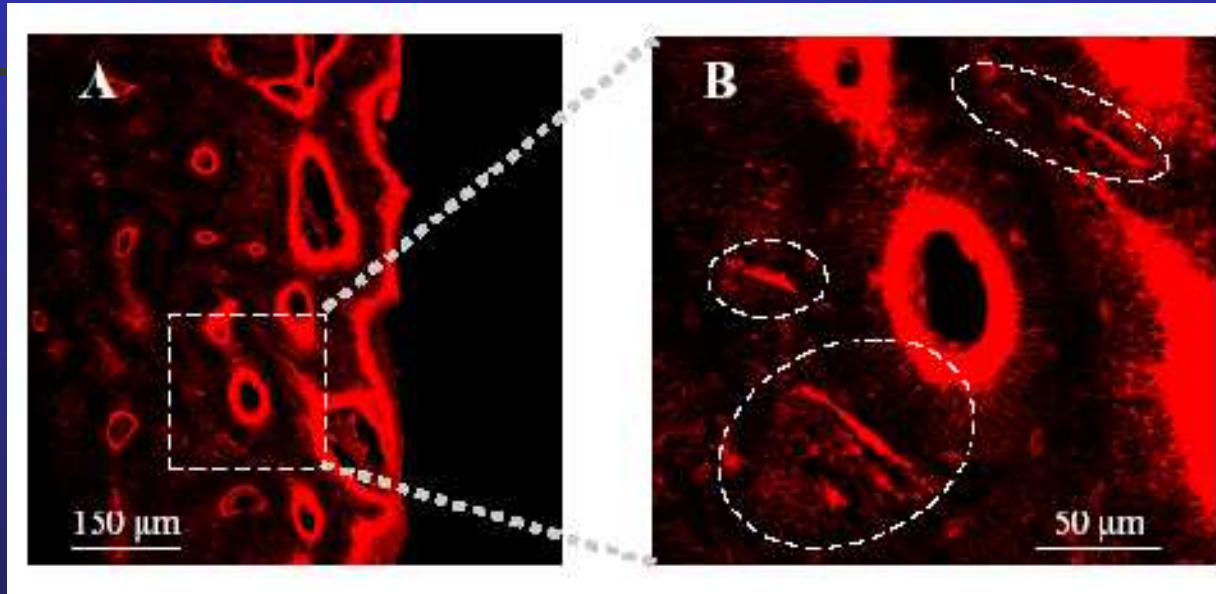


Bone failure is due to microcracking of the bone material structure

Microcracks vs microcracking

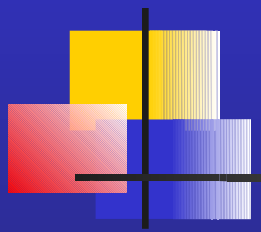


## Periosteal edge sheep metacarpal



Overt microdamage

- Sheep metatarsal subjected to acoustic loading
- Procion Red stain
- Acoustic energy induces remodeling through creation of microcracks and disruption of fluid flow

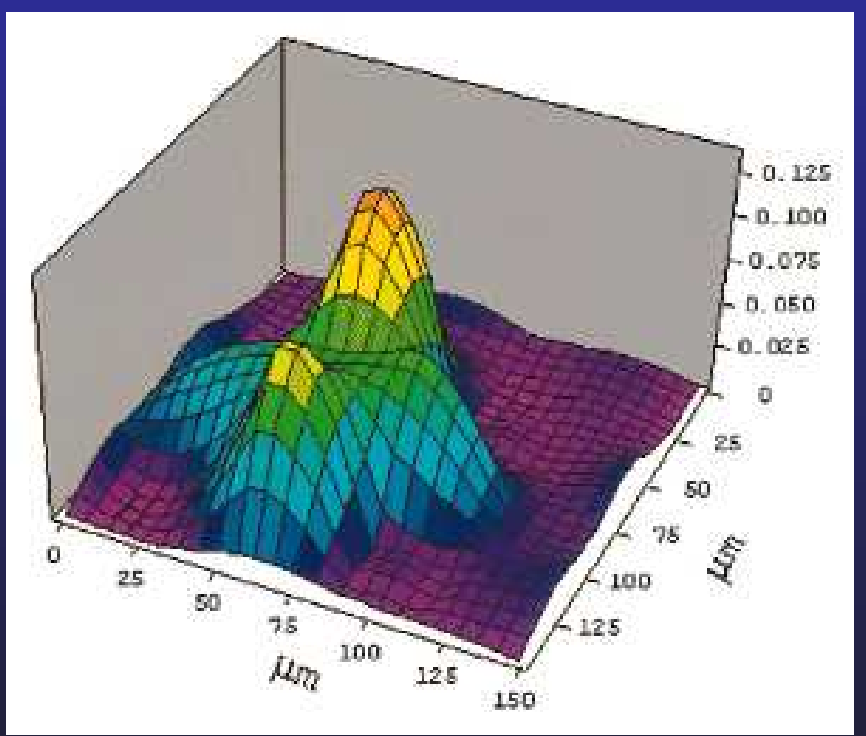
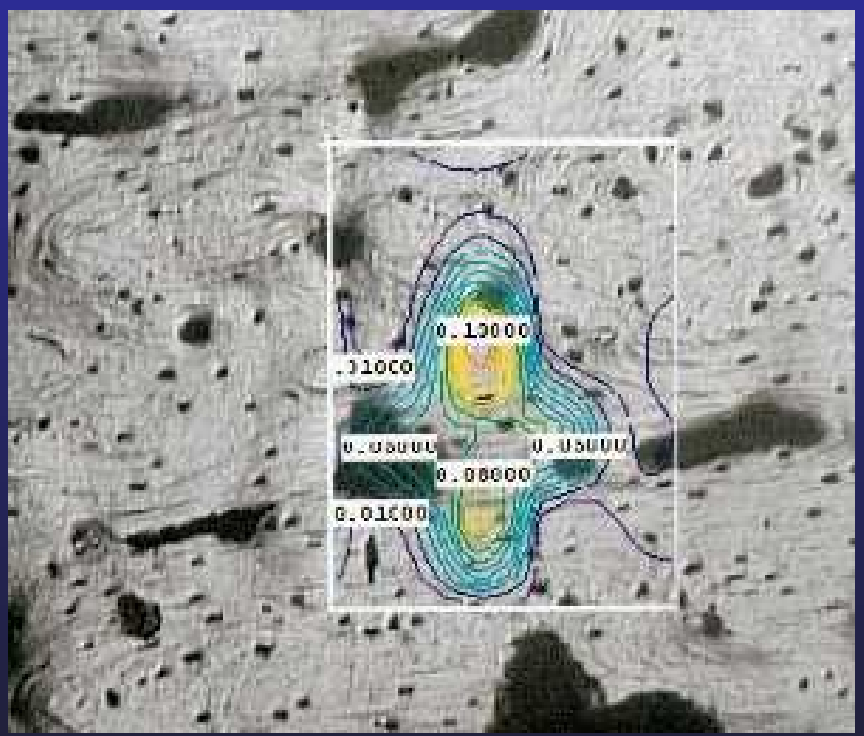
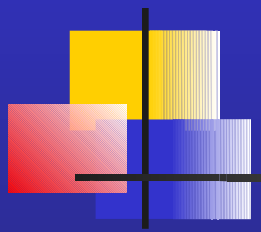




## Πως τα οστεοκύτταρα αντιλαμβάνονται τις οστικές μεταβολές

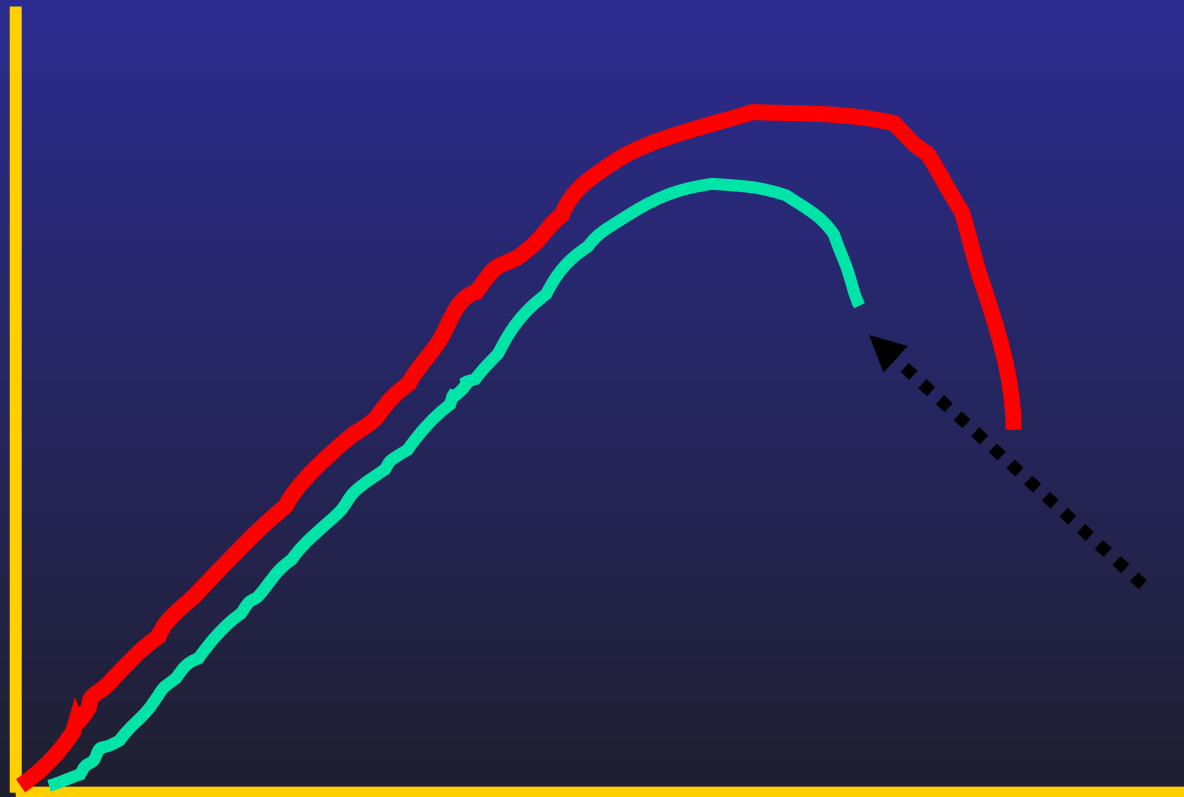
---

- ✓ Παραμόρφωση ιστού (strain)
- ✓ Ροή διάμεσου υγρού
- ✓ Ηλεκτρικά δυναμικά



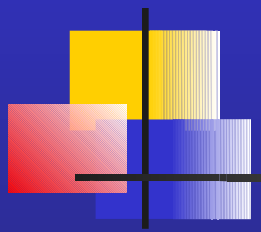
# Εμβιομηχανική των Οστών

Τάση,  $\sigma$

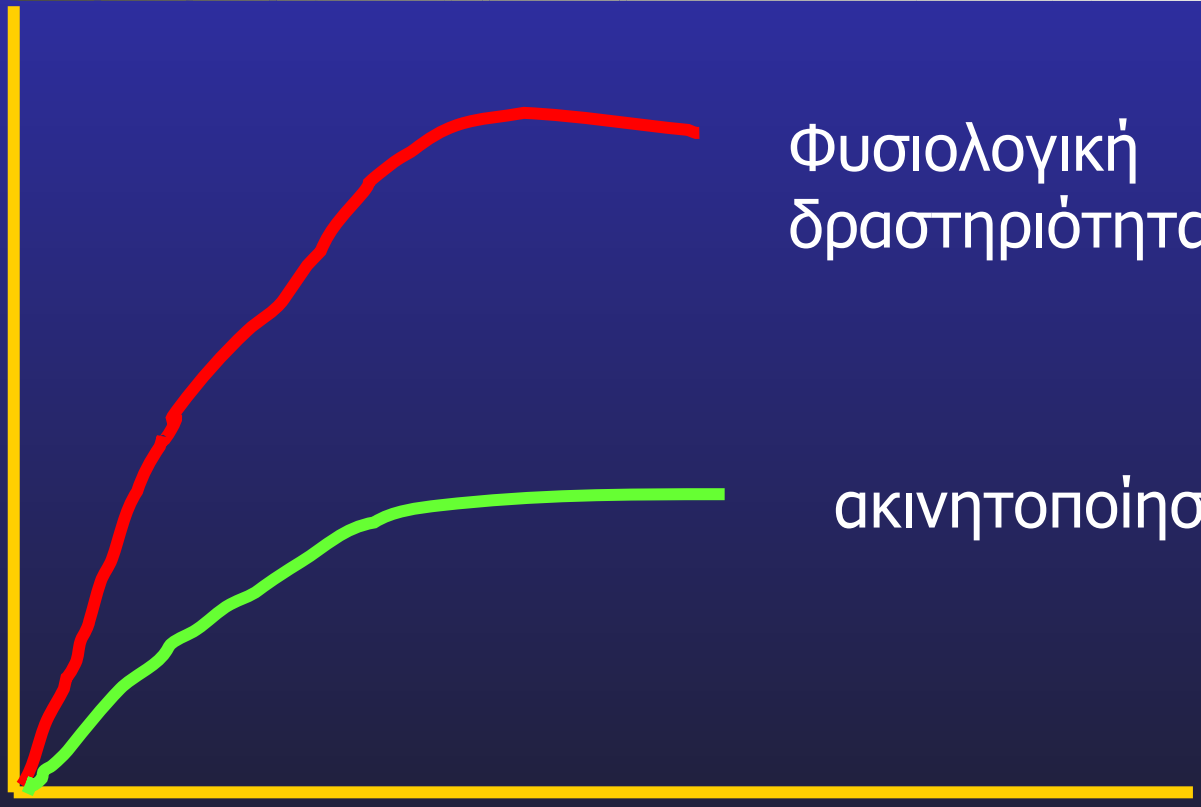


ηλικία

παραμόρφωση



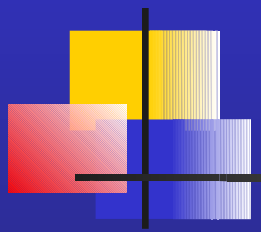
Τάση,  $\sigma$



Φυσιολογική  
δραστηριότητα

ακινητοποίηση

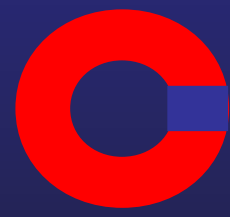
παραμόρφωση



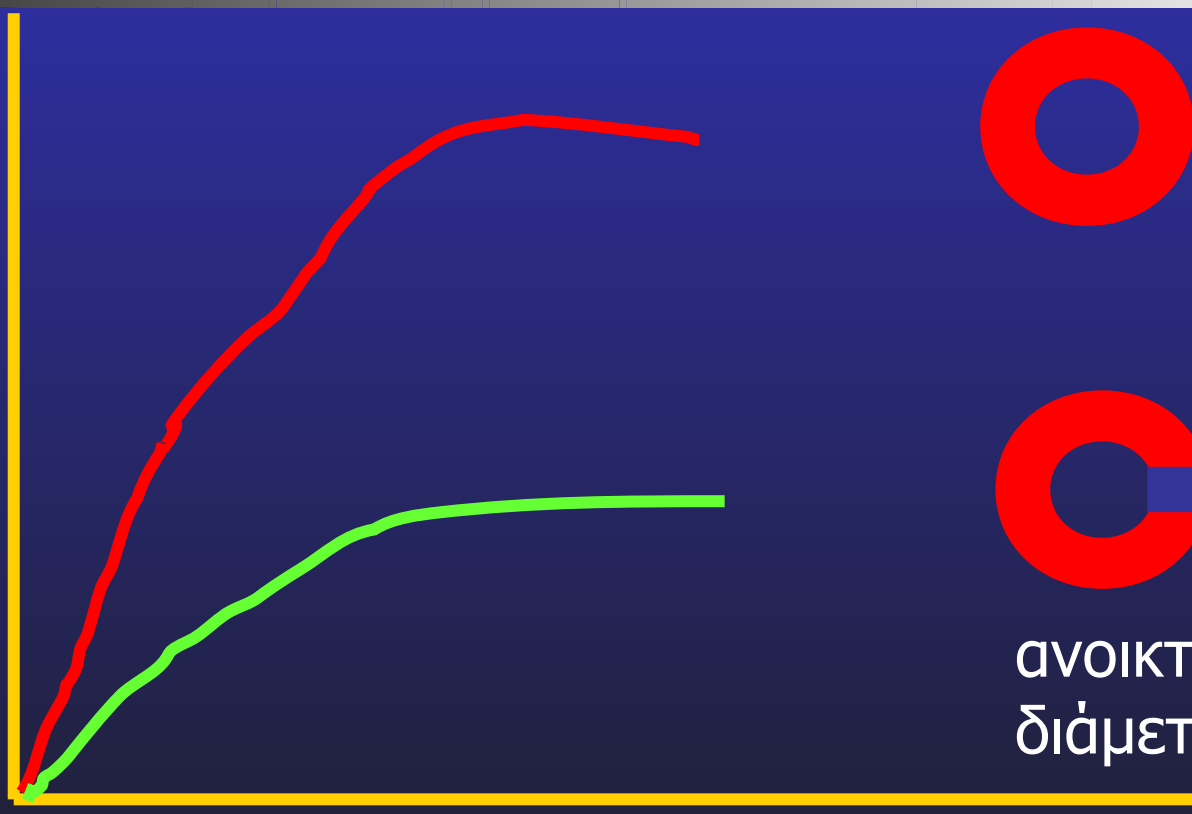
Κλειστή  
διάμετρος



Τάση,  $\sigma$

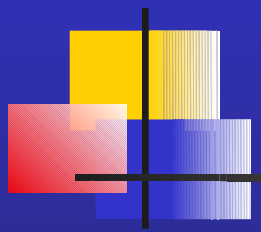


ανοικτή  
διάμετρος

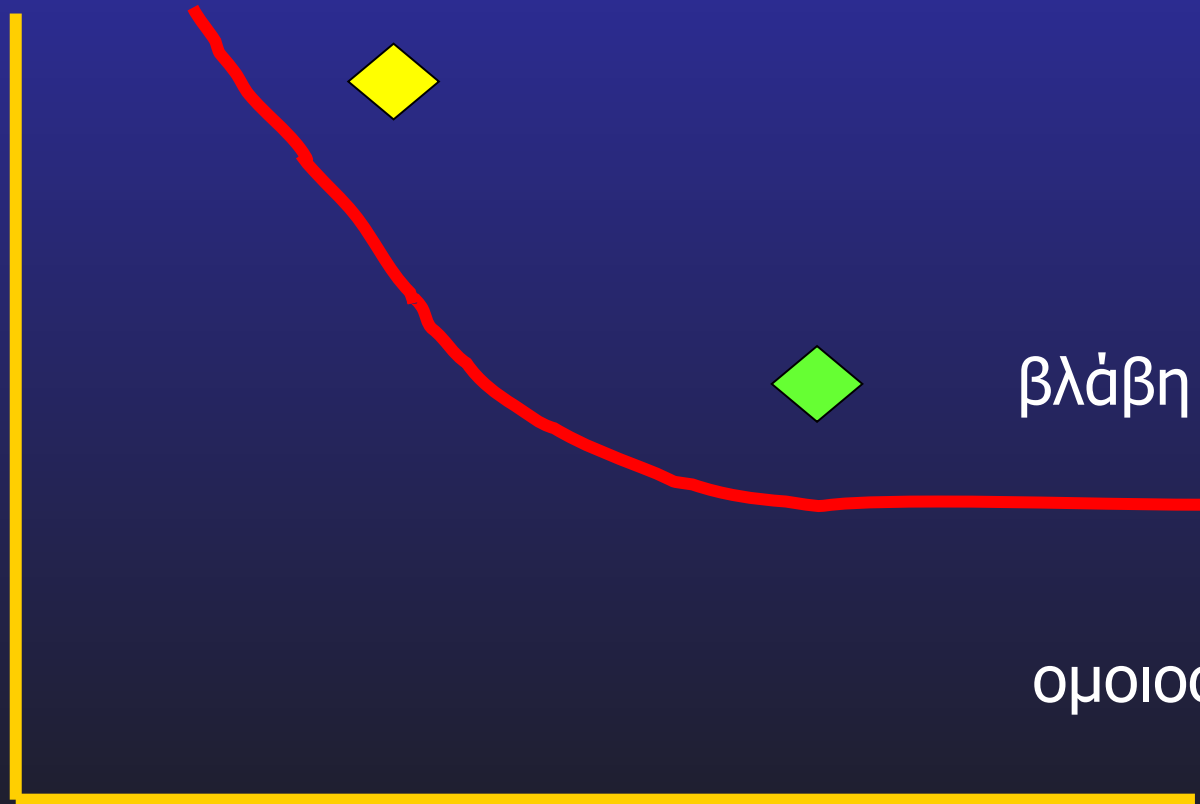


παραμόρφωση

# Κόπωση των Οστών



Τάση,  $\sigma$



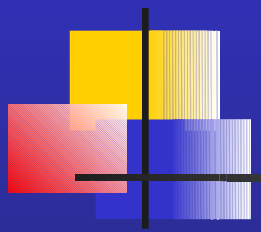
επαναλήψεις

βλάβη

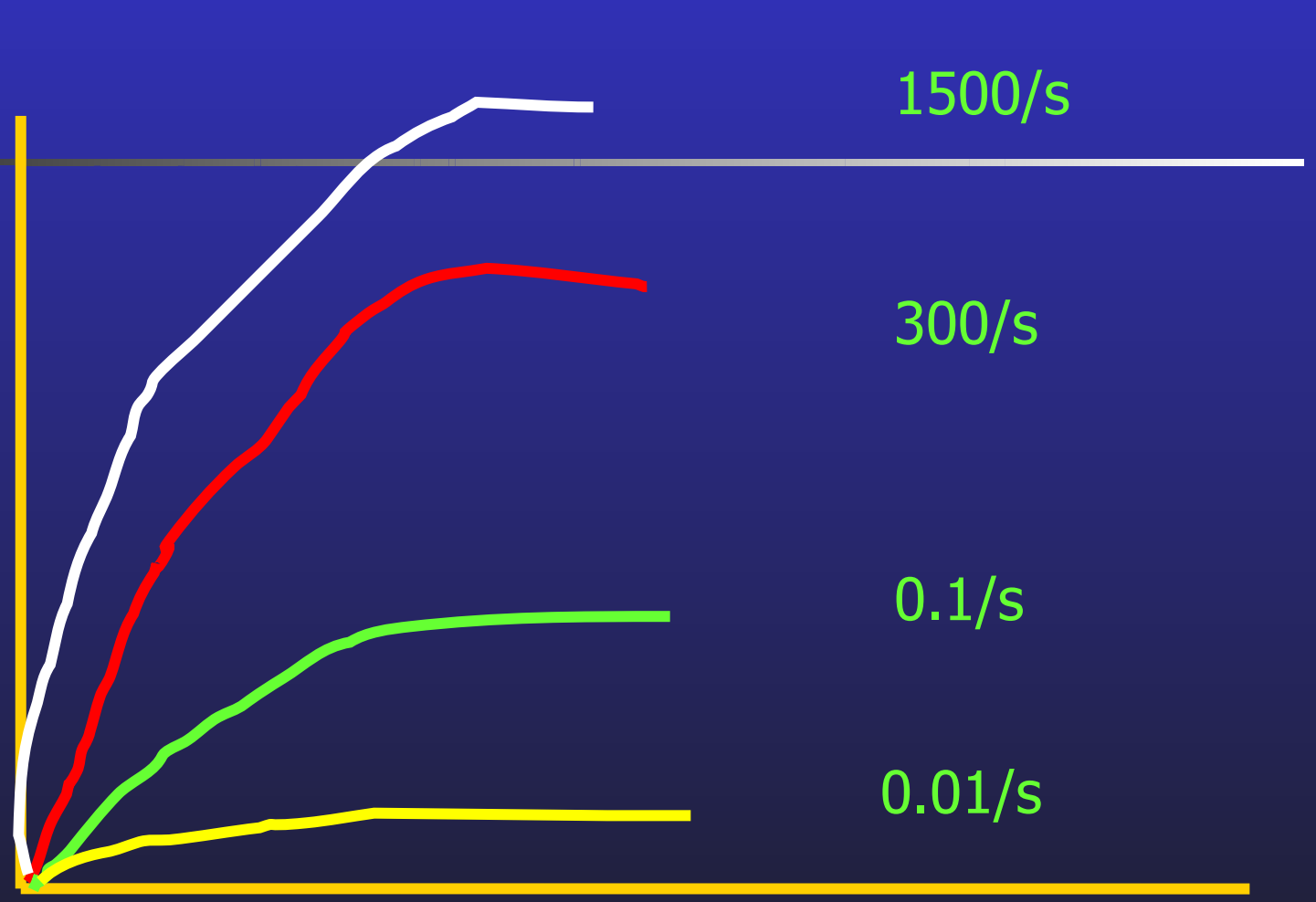
ομοιοστασία



# Ρυθμός Φόρτισης



Τάση,  $\sigma$



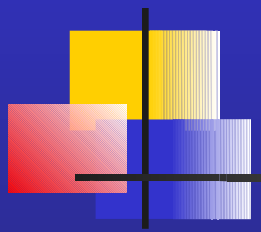
1500/s

300/s

0.1/s

0.01/s

παραμόρφωση



Αντοχή



Ανακατασκευή



# Κατάγματα Κόπωσης

---

Μικρές οστικές ρωγμές μετά από επαναλαμβανόμενη,  
μη φυσιολογική φόρτιση του οστού



## Κατάγματα Κόπωσης - Τύποι

---

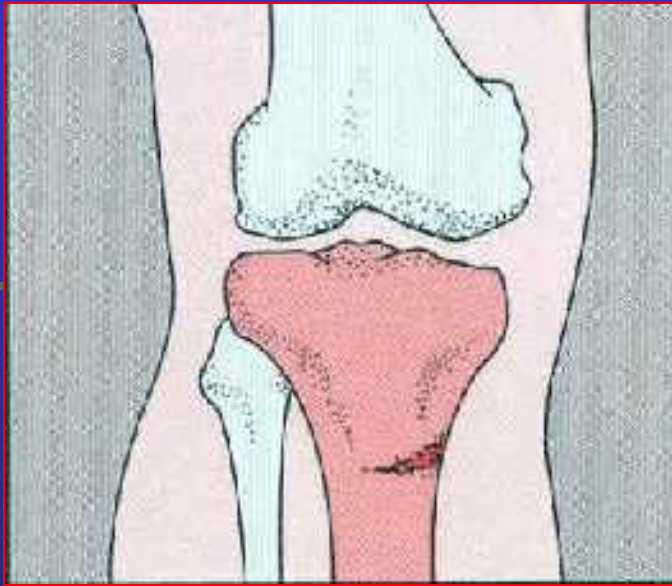
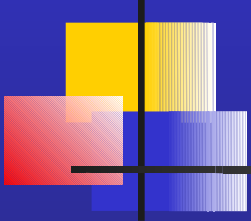
“εκ κόπωσης” (fatigue type)

αυξημένη φόρτιση σε φυσιολογικό οστό

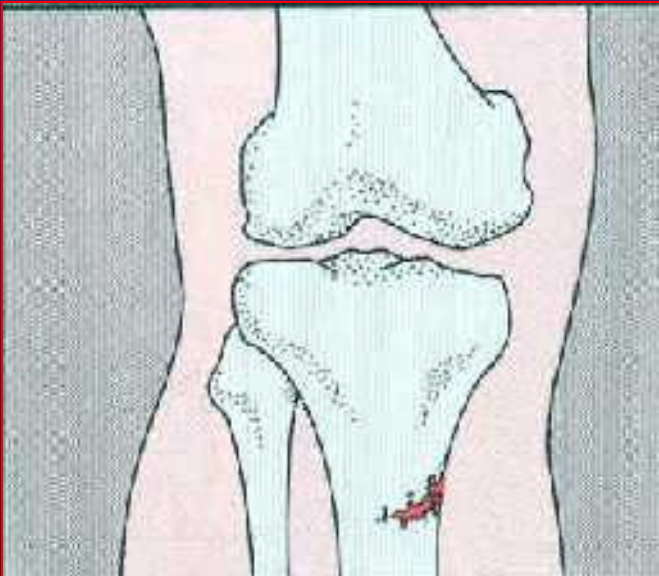
“εξ ανεπαρκείας” (insufficiency type)

φυσιολογική φόρτιση σε παθολογικό οστό

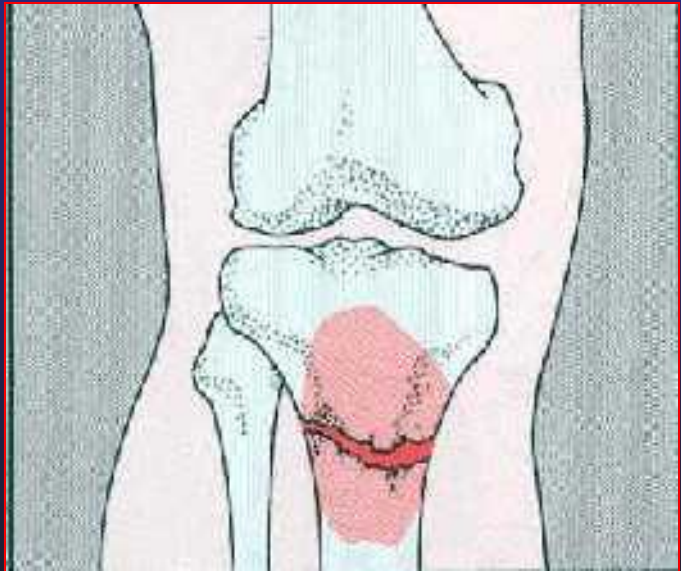
(οστεοπόρωση, ΡΑ, οστεομαλάκυνση, ινώδης δυσπλασία, ν. Paget, ατελής οστεογένεση, οστεοπέτρωση, υπερπαραθυρεοειδισμός, μετά ακτινοθεραπεία)



# ανεπαρκείας



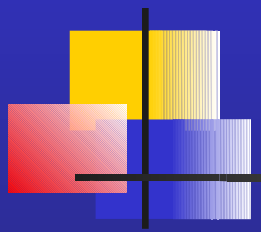
# κόπωσης



παθολογικό #

# Παθολογικό Κάταγμα





# ανεπαρκείας έξω κνημιαίου κονδύλου



Οστεομαλάκυνση

Looser zone





# Παθογένεια Καταγμάτων Κόπωσης

---

- Μετά από περίοδο αδράνειας, εντατική άσκηση
- Δημιουργία ρωγμής φλοιώδους οστού
- Στη μετάβαση διάφυσης-μετάφυσης
- Σε υπέρεκταση της ΟΜΣΣ κάταγμα κόπωσης στον ισθμό του Ο5



# Επιδημιολογία

---

- 10% των αθλητικών τραυματισμών
- 10% σε παιδιά < 15 ετών
- >50% στα κάτω άκρα
- Συνηθέστερη αιτία το τρέξιμο
- Ο κίνδυνος εμφάνισης είναι αντιστρόφως ανάλογος της ηλικίας  
( > 17 ετών, 28%)



# Εντόπιση Καταγμάτων Κόπωσης

---

- ΟΜΣΣ
- Ηβικό και Ιερό Οστό
- Αυχένιας μηριαίου
- Κνήμη
- Περώνη
- Πτέρνα
- Μετατάρσια - Σκαφοειδές οστό

# Προδιαθεσικοί Παράγοντες

---

- ✓ Διαταραχές Ε.Ρ
- ✓ Οστεοπόρωση
- ✓ Σακχαρώδης Διαβήτης
- ✓ Κάπνισμα, Αλκοόλ
- ✓ Υποθυρεοειδισμός
- ✓ Νευρογενής Ανορεξία
- ✓ νόσος Paget
- ✓ Ρευματοειδής αρθρίτιδα

# Προδιαθεσικοί Παράγοντες

## Ενδογενείς

---

- Χαμηλή BMD
- Πλημμελής ευθυγράμμιση κάτω άκρων
- Μυϊκή κόπωση
- Αδυναμία-μυϊκή ασυνέργεια
- Παθολογικές καταστάσεις των οστών
- Ανωμαλίες κύκλου

## Εξωγενείς

- Αύξηση ένταση ή όγκου προπόνησης
- Αλλαγή επιφάνειας άσκησης
- Φθορά υποδημάτων
- Κάπνισμα
- Ανεπαρκή διατροφή

## Παθοφυσιολογία # Κόπωσης

- ✓ Το οστό αντιδρά στη φόρτιση με αύξηση της οστεοβλαστικής δραστηριότητας.
- ✓ Η επάρκεια αυτού του μηχανισμού είναι πεπερασμένη.
- ✓ Σε υπέρμετρη φόρτιση υπερτερεί η οστεοκλαστική δράση.
- ✓ Σε επιμονή δημιουργία μικροκαταγμάτων.



## Κατάγματα Κόπωσης Υψηλού Κινδύνου

---

- Αυχέννας μηριαίου
- Σφηνοειδές οστό ταρσού (AVN)
- Πρόσθιος φλοιός μέσου τριτημορίου κνήμης τύπου ελκυσμού (πλήρες # 60%)



# ανεπαρκείας Ο1 σπονδύλου





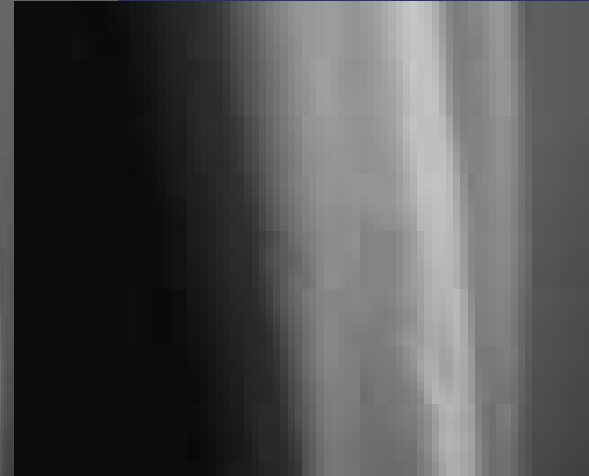
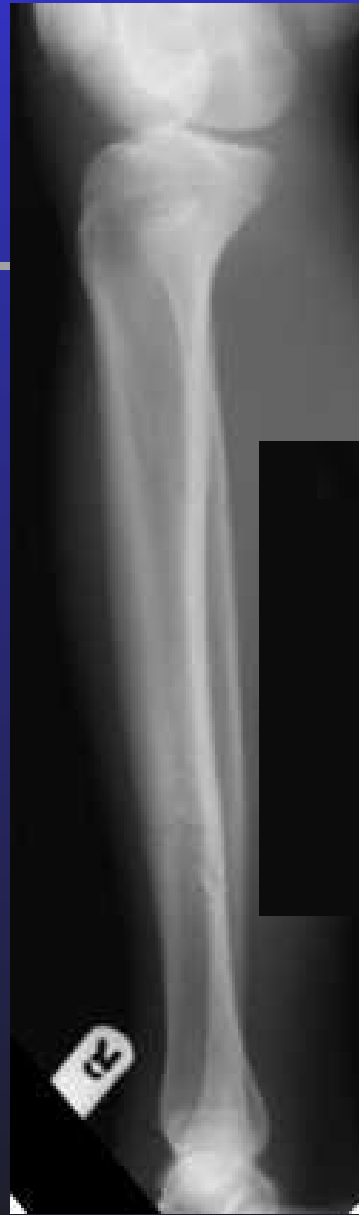
Vertebral Bodies



Vertebral Crush Fracture



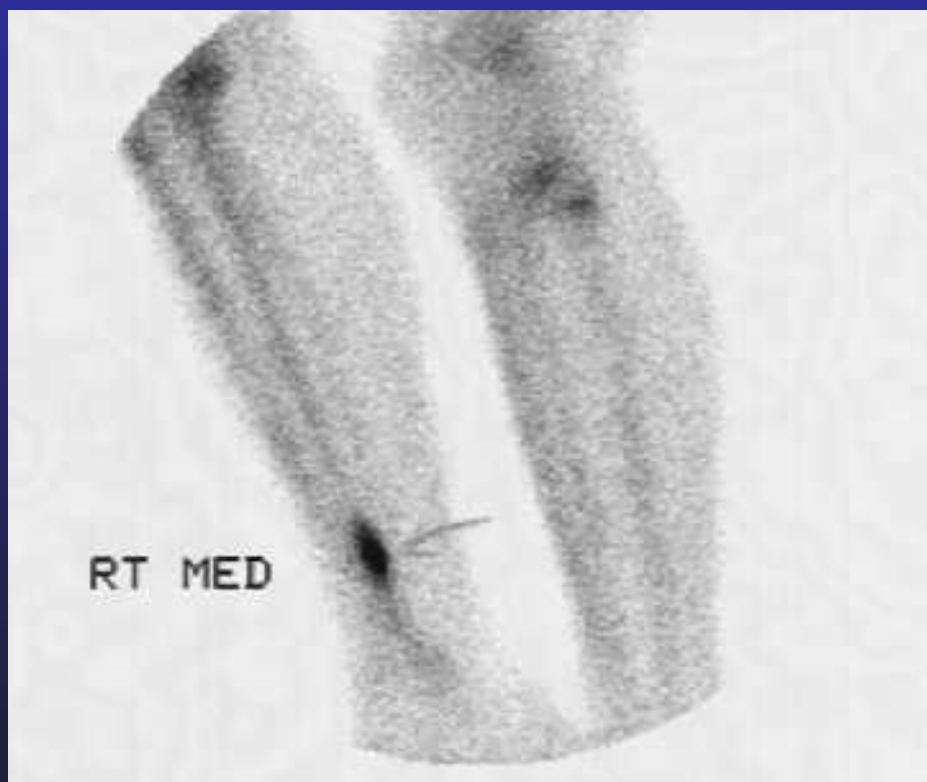
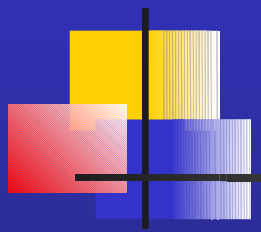
# κόπωσης



Μαραθωνοδρόμος 30 ετών

# Κάταγμα Κόπωσης Μεταταρσίων





# Κάταγμα Κόπωσης Πτέρνας





# Female Athlete Triad

---

- Αμηνόρροια
- Διαταραχές όρεξης και διατροφής
- Οστεοπόρωση



# ΔΙΑΓΝΩΣΗ

---

- Ιστορικό
- Κλινική εξέταση
- Απεικονιστικός έλεγχος
  - απλές ακτινογραφίες
  - σπινθηρογράφημα οστών τριών φάσεων
  - μαγνητική και αξονική τομογραφία
- Ενδοκρινολογικός Έλεγχος - Οστική Πυκνότητα

**Αποφυγή βιοψίας !!!**





# Ακτινολογική Διάγνωση Καταγμάτων Κόπωσης

---

- 10-25% από τα κατάγματα κόπωσης ανιχνεύονται με ακτινογραφίες κατά την αρχική εξέταση
- Η οστική απορρόφηση και η περιοστική παραγωγή οστού γίνονται εμφανείς μετά από 2 εβδομάδες
- Το σπινθηρογράφημα είναι θετικό σε όλες τις περιπτώσεις (χαμηλή ευαισθησία-πλημμελής ανατομικός εντοπισμός)



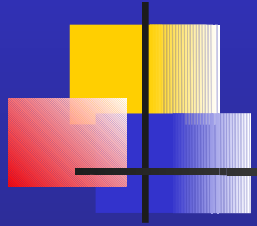
# Συμπτωματολογία

---

- Εντοπισμένος Πόνος
- Οίδημα
- Τοπική ευαισθησία στην ψηλάφηση

Σε ασθενείς με κατάλληλο ιστορικό !!!

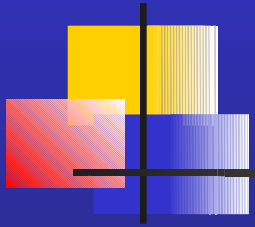
Απουσία οξέως τραυματισμού



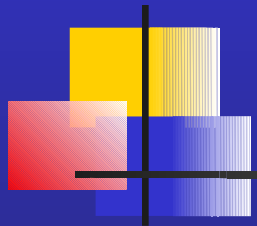
- ✓ Τα συμπτώματα παρουσιάζονται 6-8 εβδομάδες μετά από αλλαγή στη διάρκεια ή στην ένταση της προπόνησης.
- ✓ Το φαινόμενο αποτυχίας είναι ταχύτερο όταν συνυπάρχουν προδιαθεσικοί παράγοντες.

## Πόνος στο Τυπικό # Κόπωσης

- ✓ Αρχικά στην τελική φάση της εξάσκησης
- ✓ Προοδευτικά εμφανίζεται πρωιμότερα και παραμένει μετά την άσκηση.
- ✓ Είναι δυνατό να καθιστά αδύνατη την προπόνηση.
- ✓ Όχι νυκτερινός πόνος ή πόνος ανάπαυσης

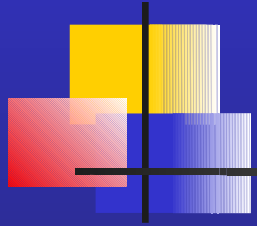


Όσο ταχύτερα αναγνωριστεί το πρόβλημα τόσο πιθανότερη είναι η πλήρης και ταχεία αποκατάσταση.

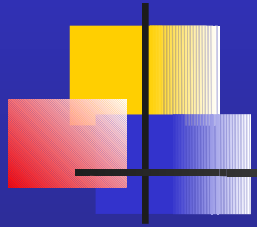


Οφείλονται σε ταχεία αύξηση της έντασης ή της ποσότητας της εξάσκησης.

- ✓ Αλλαγή προπονητικού πεδίου (χώμα-ταρτάν)
- ✓ Πλημμελής εξοπλισμός (φθαρμένα ή άκαμπτα υποδήματα δρομέων)
- ✓ Αυξημένη καταπόνηση (ποδοσφαιριστής που ξαφνικά παίζει διπλάσιο χρόνο)

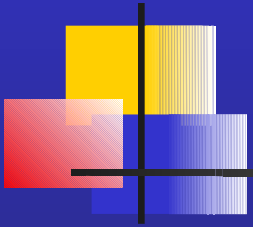


- ✓ Κατάγματα κόπωσης συμβαίνουν συχνά σε μη αθλητές ή άτομα απροπόνητα που αρχίζουν απότομη άσκηση.
- ✓ Είναι πιο συχνά σε γυναίκες
- ✓ Γυναίκες μη αθλητές είναι περισσότερο πιθανό να υποστούν κ.κ. από αθλητές, εκτός εάν αυτές πάσχουν από αμηνόρροια.



- ✓ Τα κατάγματα κόπωσης παρουσιάζουν τάση υποτροπής.
- ✓ 60% των ασθενών με κάταγμα κόπωσης έχουν υποστεί τουλάχιστον ένα ακόμα στο παρελθόν.





---

Τα πιο συχνά κατάγματα κόπωσης στα κάτω άκρα εντοπίζονται στην κνήμη και στα μετατάρσια.



# Διαφορική Διάγνωση

---

- Φλεγμονές
- Νεοπλάσματα
- Χρόνιο σύνδρομο διαμερίσματος
- Ισχιαλγία
- Φλεβική θρόμβωση
- Παγίδευση ιγνυακής αρτηρίας
- Περιοστίτιδα κνήμης



# Αντιμετώπιση

Ανάλογα με την περιοχή και τη σοβαρότητα του κατάγματος

- RICE
- NSAID
- Ακινητοποίηση(νάρθηκες-γύψοι)
- Αντιμετώπιση υποκείμενων αιτιών
- Ορθωτικά
- Χειρουργική θεραπεία (>6 μήνες)- ηλεκτρομαγνητική διέγερση



# Προσοχή !!!

---

Σε **ΟΛΑ** τα κατάγματα κόπωσης είναι αναγκαία  
η έγκαιρη διάγνωση γιατί υπάρχει

**ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΠΑΡΕΚΤΟΠΙΣΗΣ !!!**



# Προσοχή !!!

---

- Η ύφεση του πόνου δε σηματοδοτεί πλήρη επούλωση.
- Ιδιαίτερα στους αθλητές η υποτροπή είναι συχνή

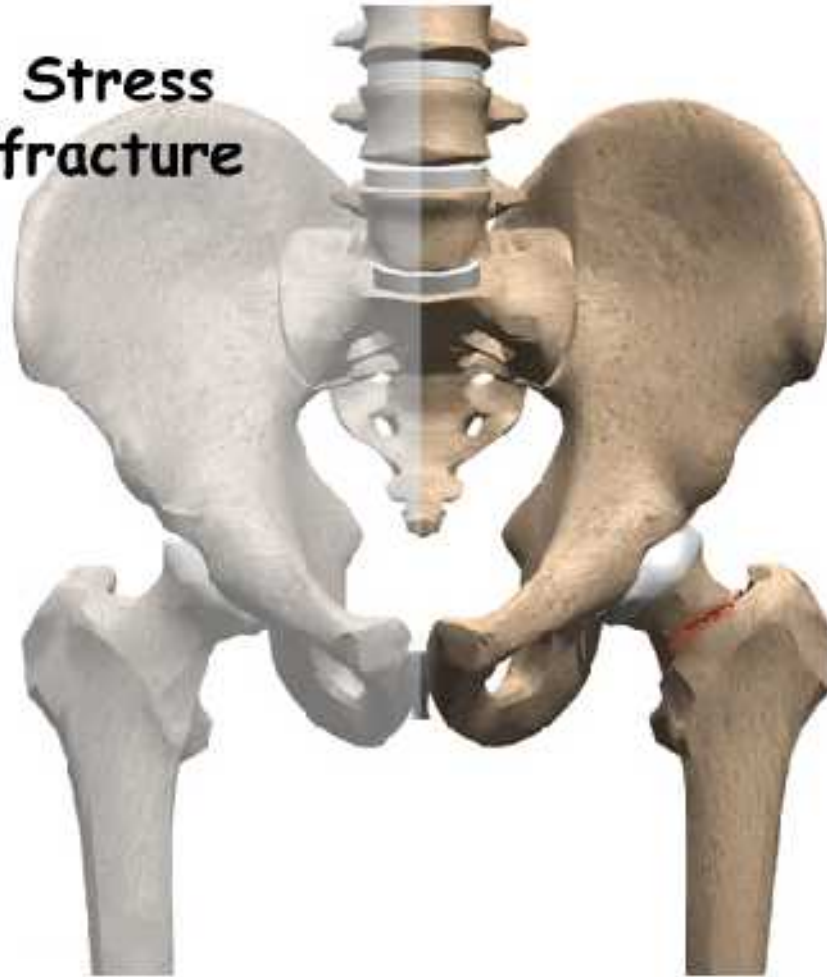


# ΠΡΟΛΗΨΗ

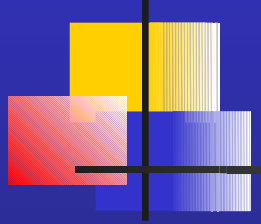
---

- Κατάλληλο προοδευτικό πρόγραμμα εκγύμνασης
- Προοδευτική επάνοδος στις αθλητικές δραστηριότητες
- Κατάλληλος αθλητικός εξοπλισμός
- Ενημέρωση αθλητών

**Stress  
fracture**

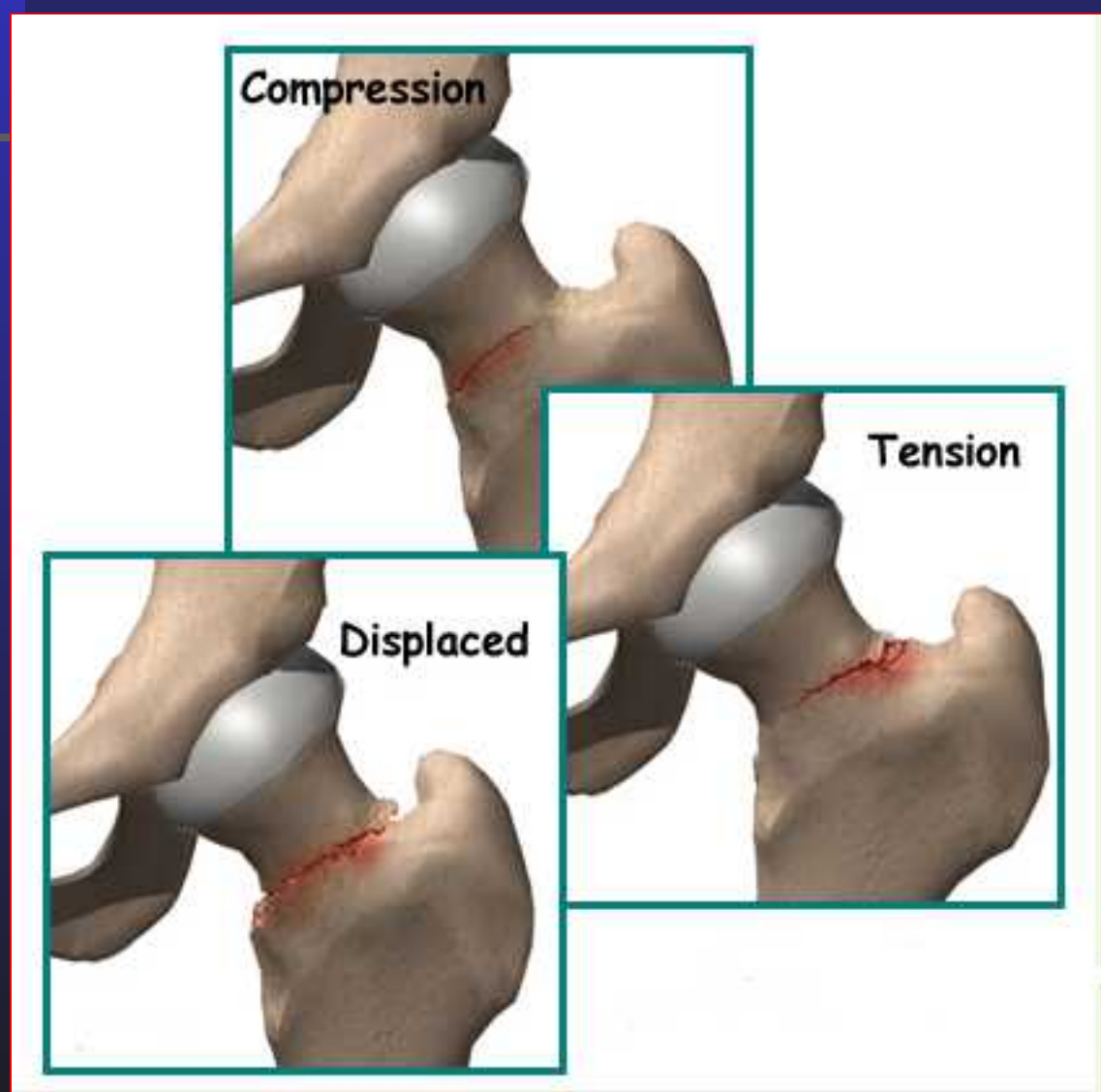


# # Κόπωσης στο Ισχίο

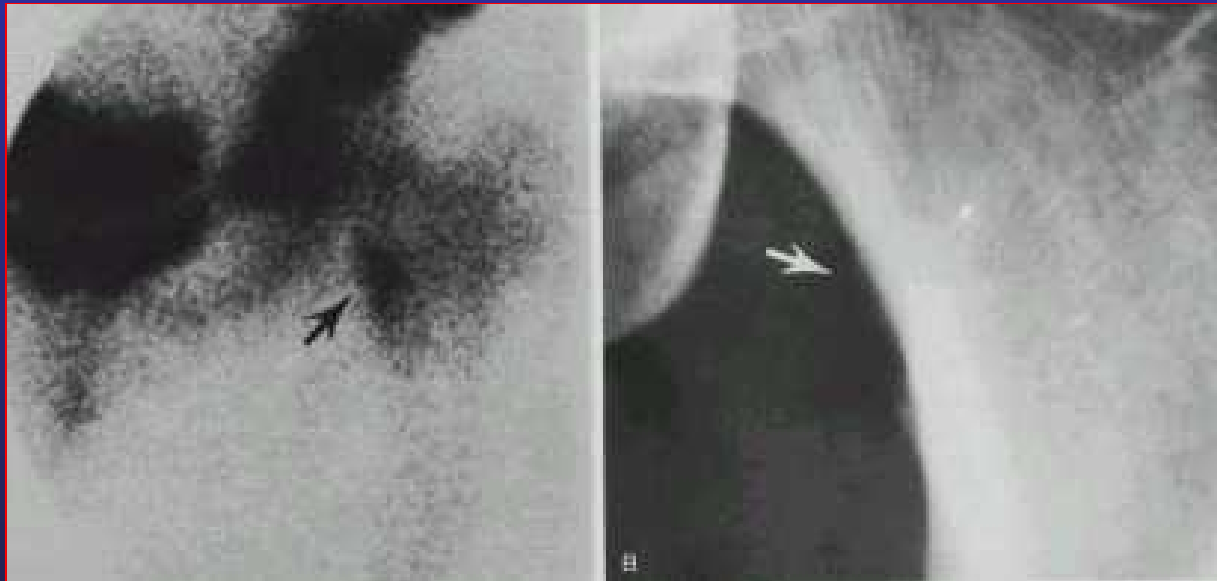


5% των

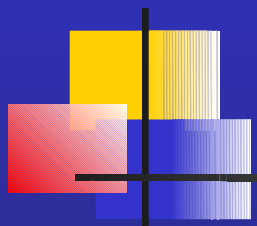
# κόπωσης





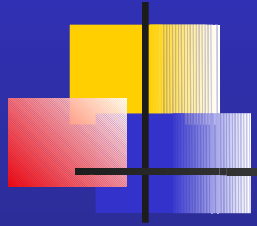


# κόπωσης του αυχένα του μηριαίου σε μία νεαρή αθλητική γυναίκα

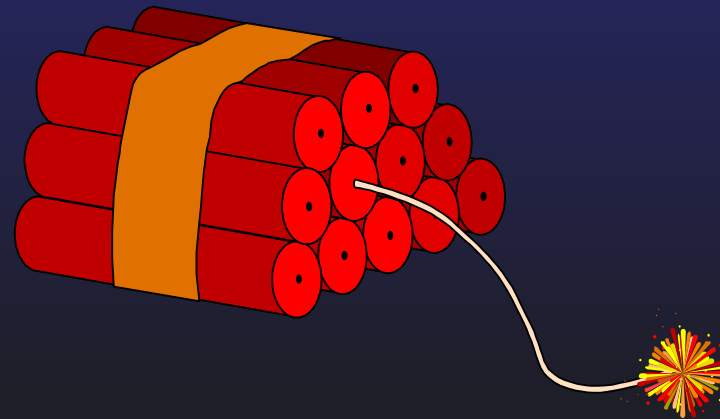


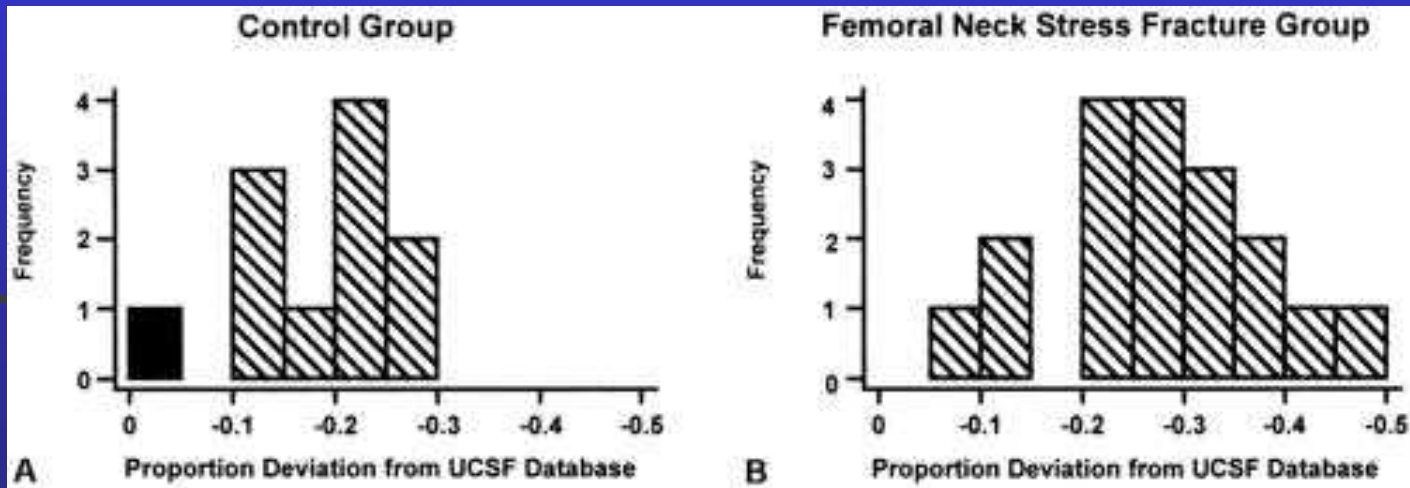
Κάταγμα ελκυσμού μηριαίου αυχένα





Τα κατάγματα κόπωσης του ισχίου τύπου ελκυσμού  
πρέπει να σταθεροποιούνται χειρουργικά λόγω πιθανής  
παρεκτόπισης

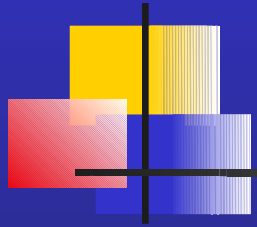




- Ασθενείς με κ.κ. ισχίου είχαν μικρότερη BMD σε σχέση με υγιείς.
- Δεν παρατηρήθηκε βιοχημική ή ιστομορφομετρική διαφορά.

# # κόπωσης στην κνήμη

- Τα συχνότερα κ.κ. (50% σε παιδιά και ενήλικες)
- Σε αγωνίσματα με τρέξιμο και άλματα.
- Σε παιδιά στο εγγύς 1/3
- Σε ενήλικες στο όριο μέσου και περιφερικού 1/3
- Πρόσθια # από ελκυσμό έχουν αυξημένη τάση ψευδάρθρωσης σε σχέση με τα πρόσθια-έσω



Κάταγμα κόπωσης σε ένα  
αγόρι 12 ετών στο εγγύς 1/3  
της κνήμης.

Ταινία σκλήρυνσης  
στην άνω μετάφυση και  
περισστική αντίδραση

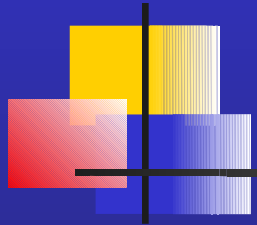


# Κάταγμα κόπωσης της κνήμης



Οριζόντια, γραμμοειδής λύση της συνέχειας του φλοιού με περισοτική αντίδραση

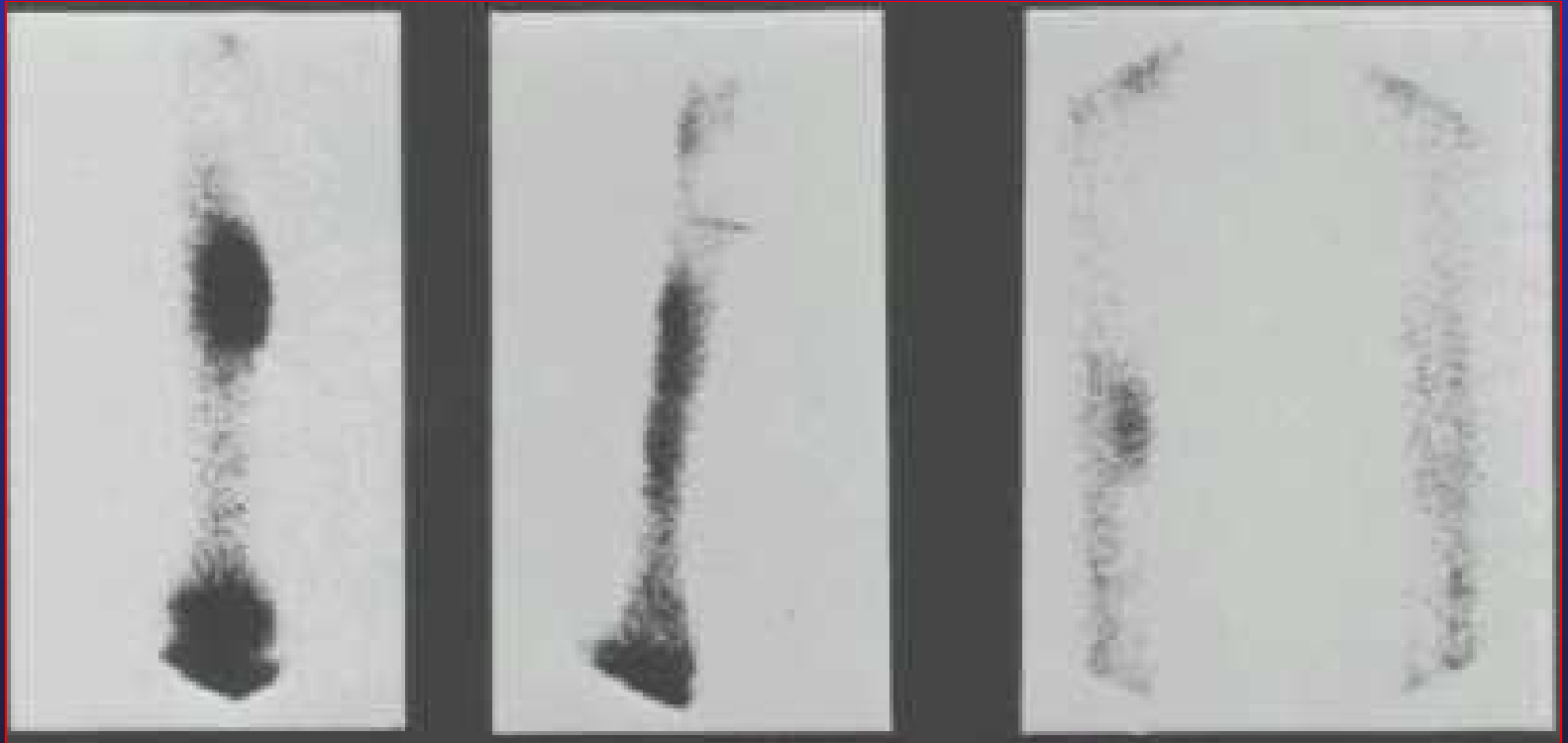




Αμφοτερόπλευρο  
# Κόπωσης



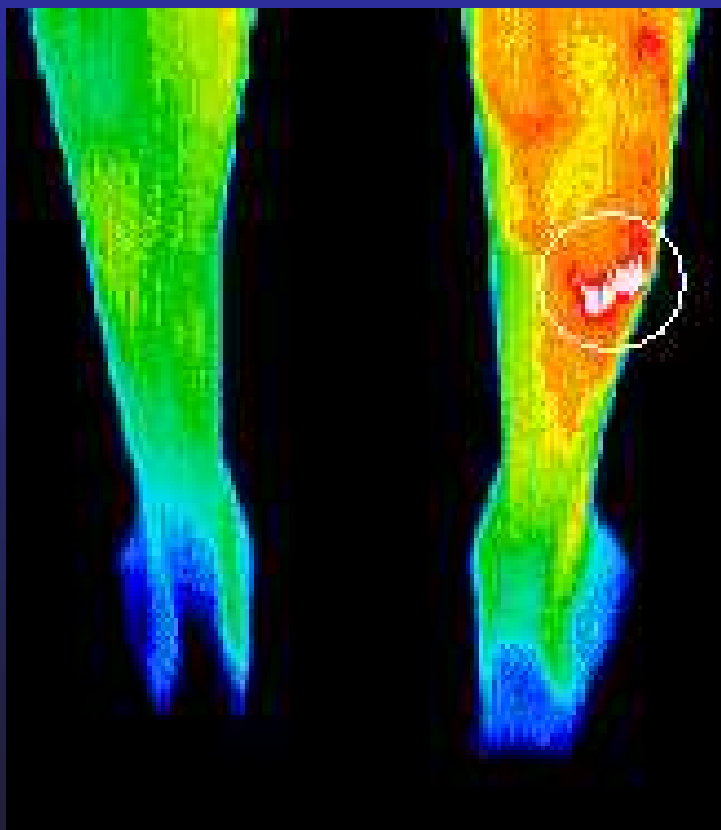
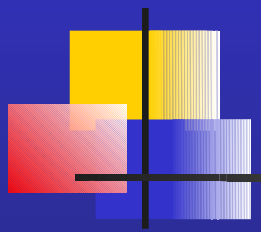
# Σπινθηρογράφημα Οστών



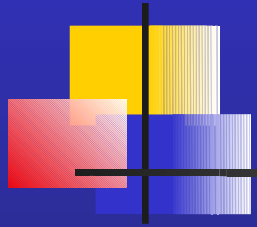
# κόπωσης

Shin splint

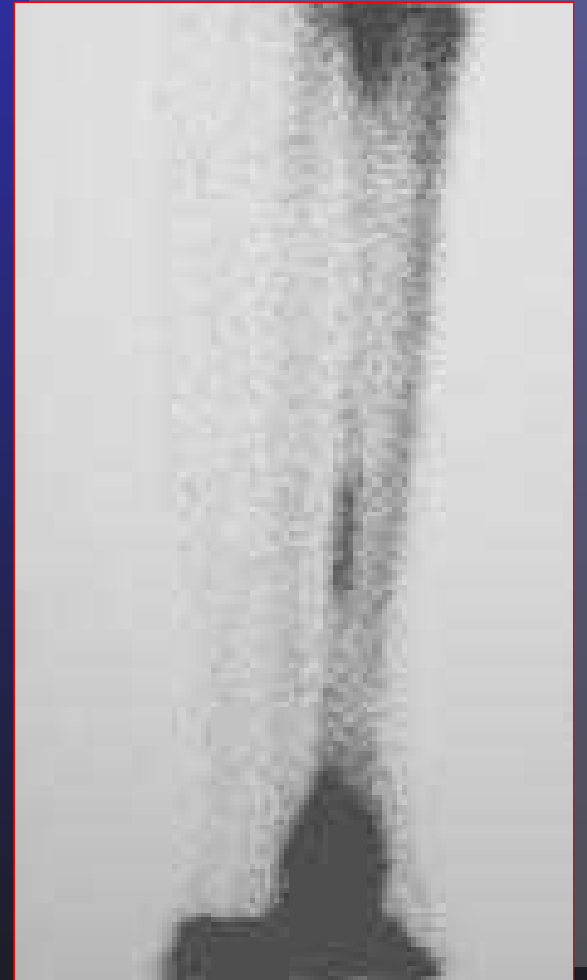
3 μήνες



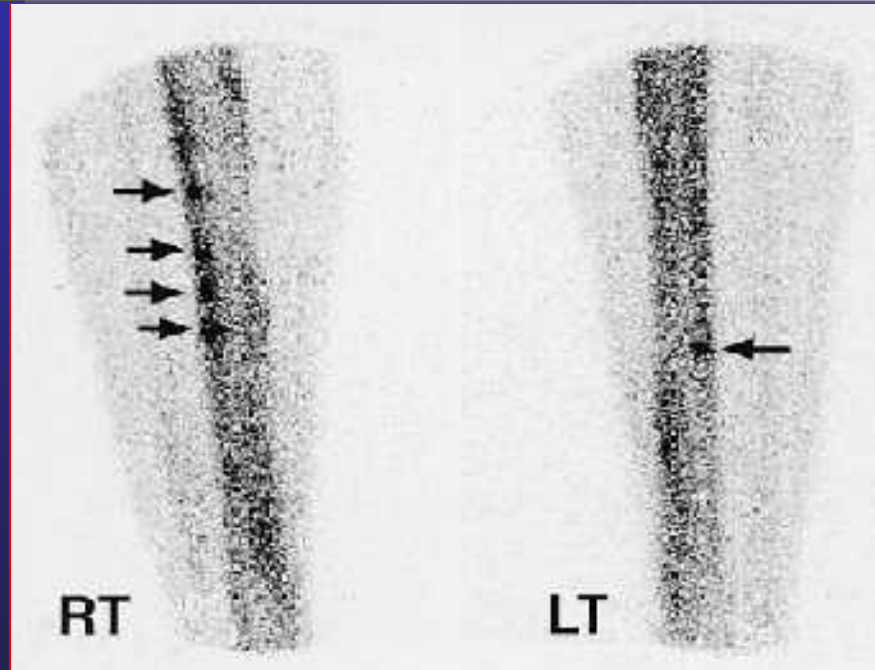
Θερμογραφία Κνήμης



Πρόσληψη στην οπίσθια-έσω  
επιφάνεια της κνήμης

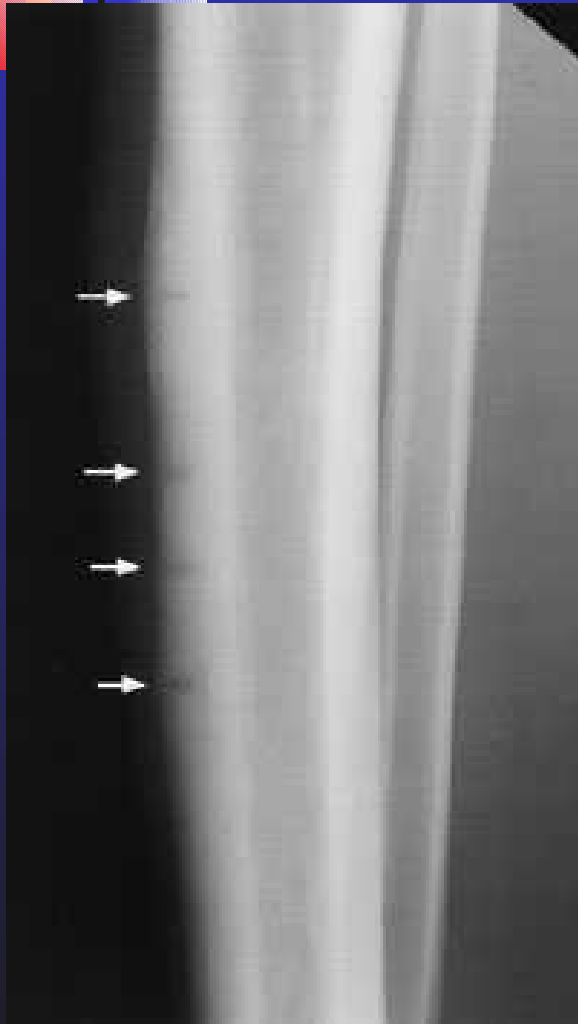


Αμφοτερόπλευρο Άλγος Κνημών σε Αθλητή 21 ετών  
Σπινθηρογράφημα οστών 3 φάσεων



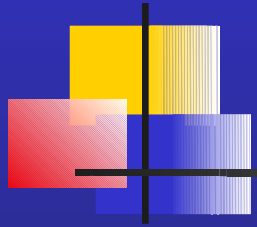
Αιματική δεξαμενή: ήπια αύξηση άμφω

Όψιμη φάση: 4 εστίες πρόσληψης στο πρόσθιο χείλος της ΔΕ και 1 εστία στην ΑΡ κνήμη.



MRI T2-weighted

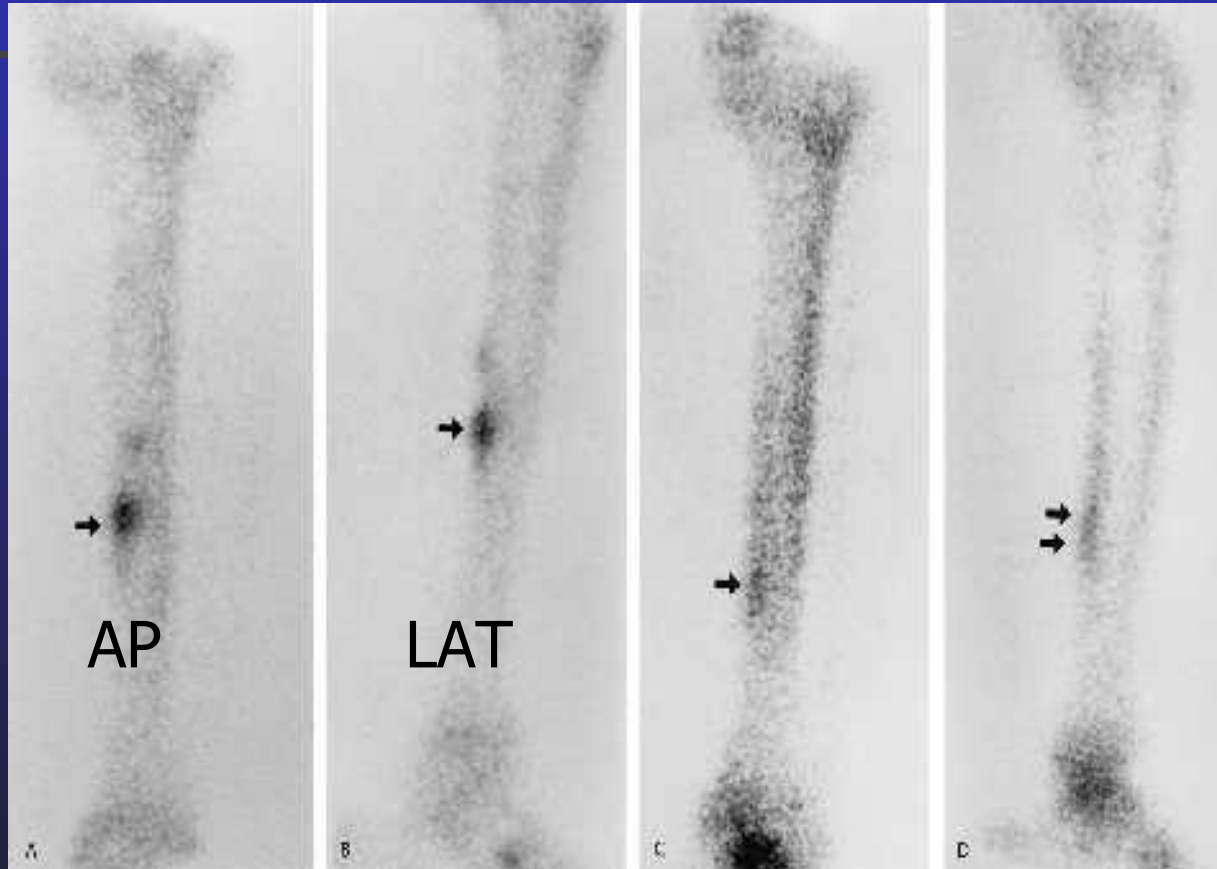
3 εγκάρσιες  
καταγματικές  
γραμμές χωρίς  
οίδημα του  
οστικού μυελού.



- Πολλαπλά κατάγματα κόπωσης είναι σπάνια.
- Η εντόπιση καταγμάτων σε πολλαπλές εστίες είναι συχνή.
- Στην κνήμη δδ shin splints

Εντοπισμένη  
πρόσληψη

Επιμήκης, γραμμοειδής  
πρόσληψη shin splints



Η πρόσληψη εξαρτάται από  
τον οστικό μεταβολισμό και  
την αγγείωση της περιοχής

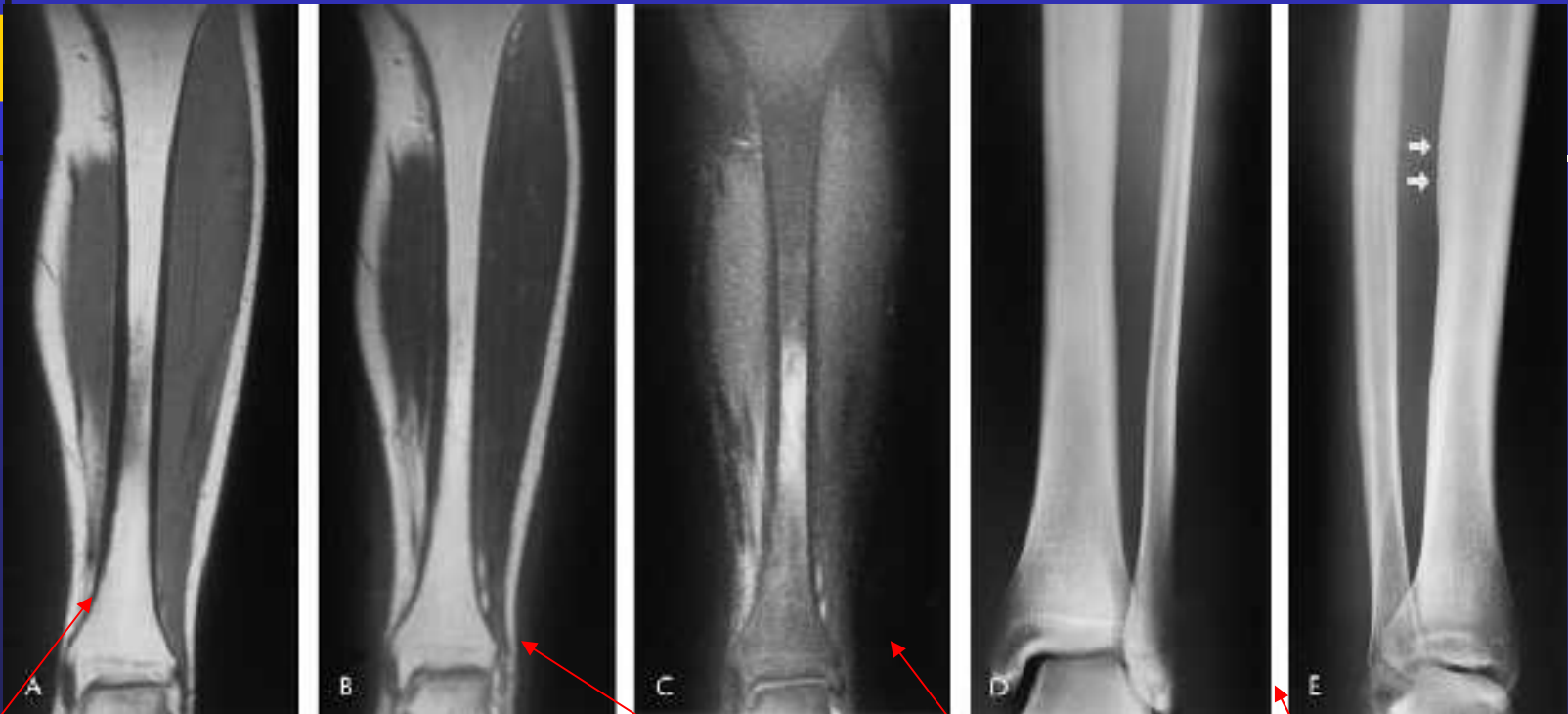




## MRI σε Κατάγματα Κόπωσης

---

- ενδομυελική περιοχή σήματος υψηλής έντασης που συνέχεται με το φλοιό σε απεικόνιση STIR με καταστολή λίπους.
- αντιστοιχεί σε περιοχές κατάγματος, αιμορραγίας και οιδήματος.



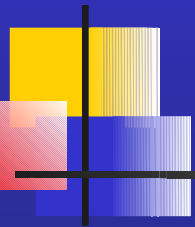
wide low signal intensity on the T1-weighted scan

high signal intensity on the T2-weighted scan

STIR fat-suppressed scan in the localized bone marrow.

Radiographs obtained 8 weeks after the first examination revealed callus formation at the lateral and posterior side of the tibia (Aoki, 2004)

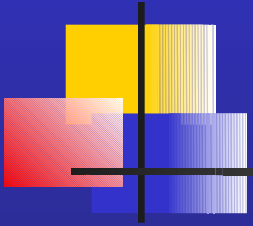
# Κάταγμα κόπωσης περόνης



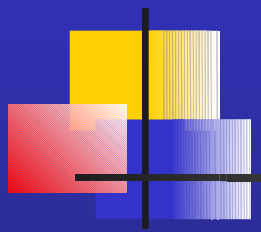
- Ενήλικες 10%
- Παιδιά 20%
- Κυρίως περιφερικό 1/3,  
αλλά και εγγύς 1/2

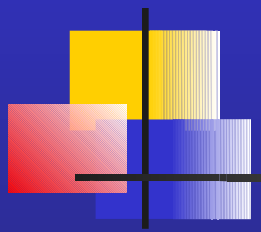


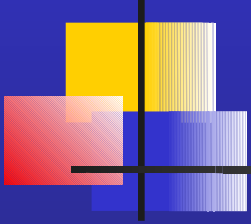
## # κόπωσης μεταταρσίων



- 25% των #
- II-III μετατάρσιο (κατάγματα πορείας- "en pointe")
- Σπάνια το IV





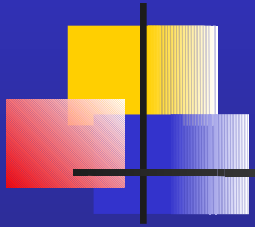


# Σάρκωμα Ewing 2ου μεταταρσίου



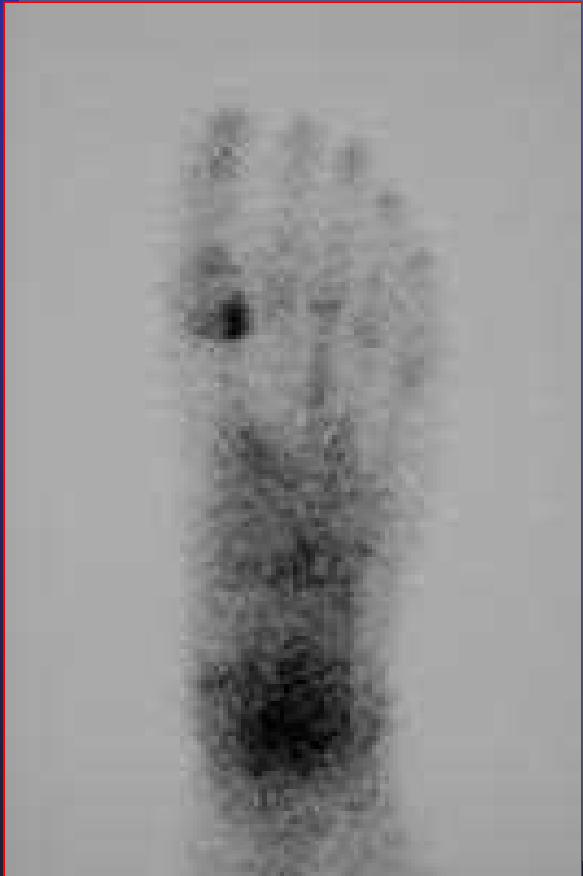
Λύση, μάζα μαλακών μορίων, ακτινωτή περιοστική αντίδραση





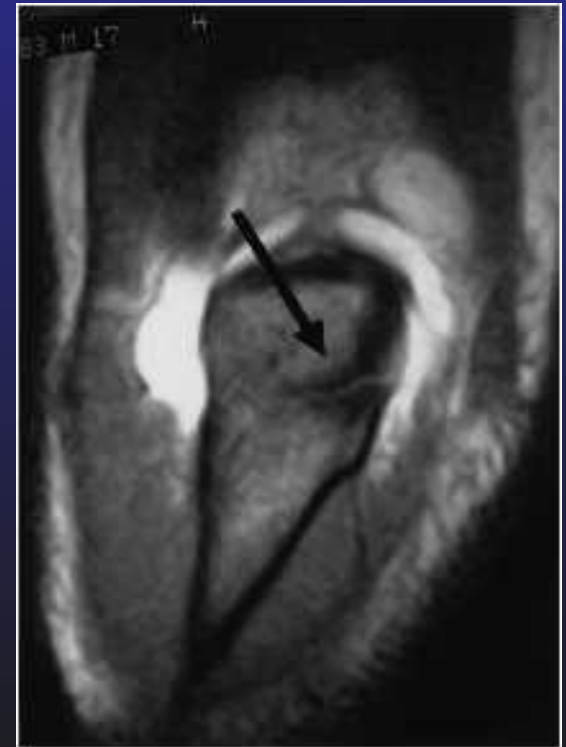
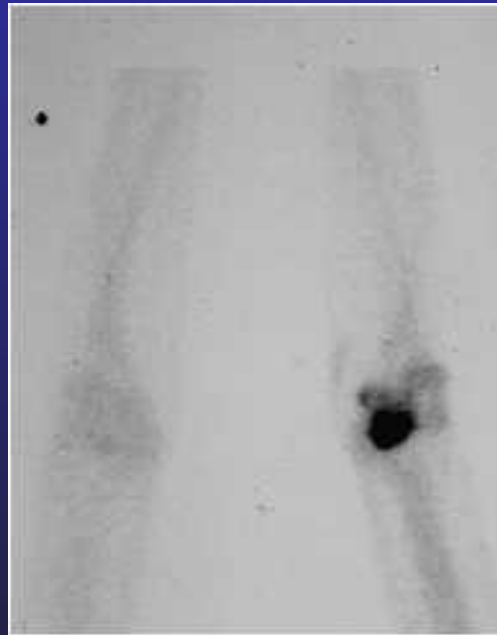
- ✓ Οι απλές ακτινογραφίες παρουσιάζουν περιοστική παραγωγή νέου οστού ή όψιμα την παρουσία μίας σκληρυντικής γραμμής
- ✓ Σχεδόν όλες οι αρχικές ακτινογραφίες είναι αρνητικές
- ✓ Ο χρόνος από την έναρξη του πόνου έως τις θετικές ακτινογραφίες κυμαίνεται μεταξύ 2 εβδομάδων και 3 μηνών.

# # κόπωσης σησαμοειδών

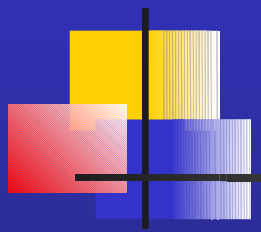


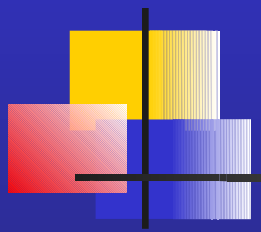
# Κάταγμα κόπωσης της πτέρνας





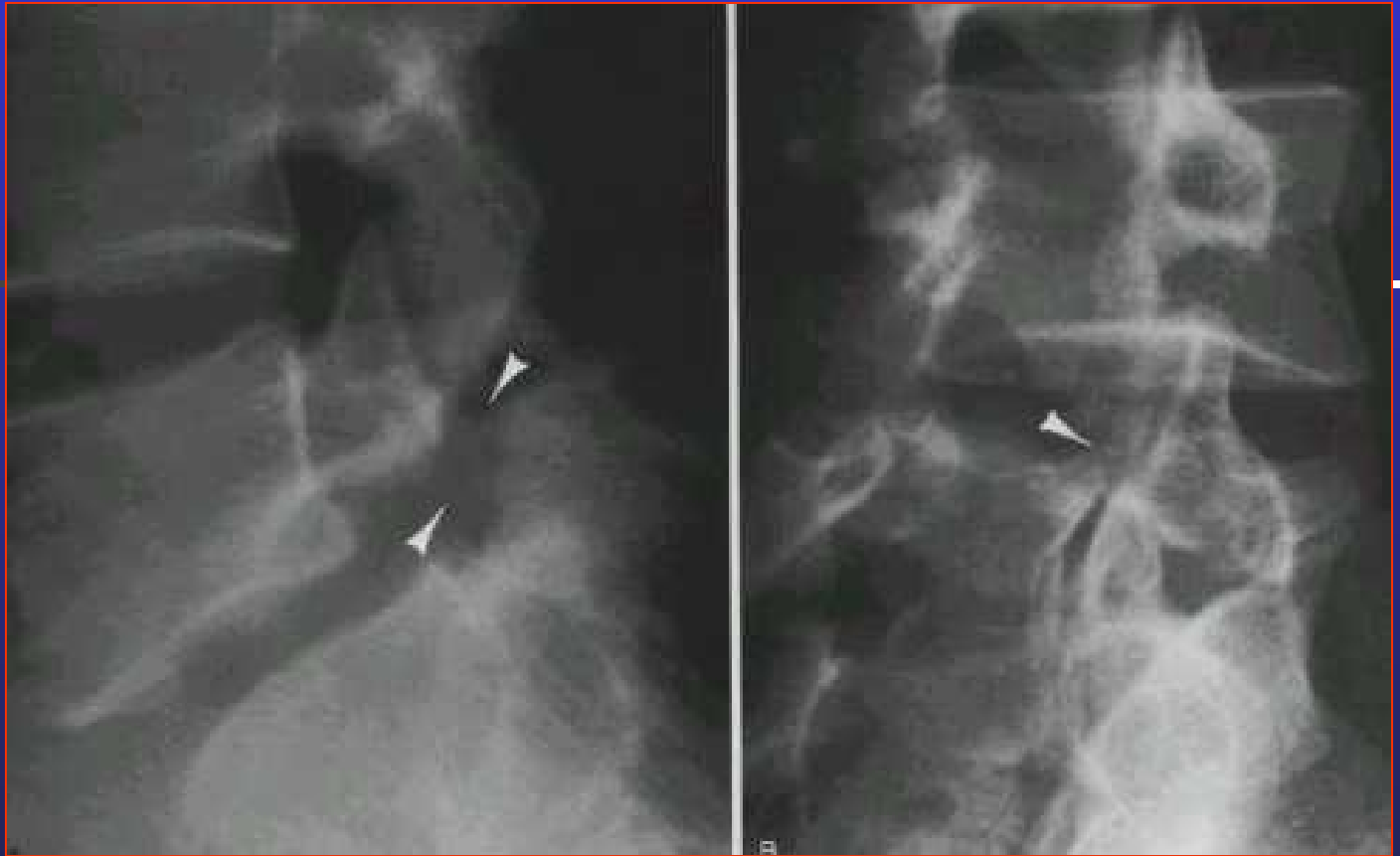
Κάταγμα κόπωσης του Ωλεκράνου σε Ρίπτρια





# Ρωγμώδες κάταγμα κερκίδας





Σπονδυλόλυση στον Ο5.

1ου βαθμού σπονδυλολίσηση  
του Ο5 επί του Ι1.



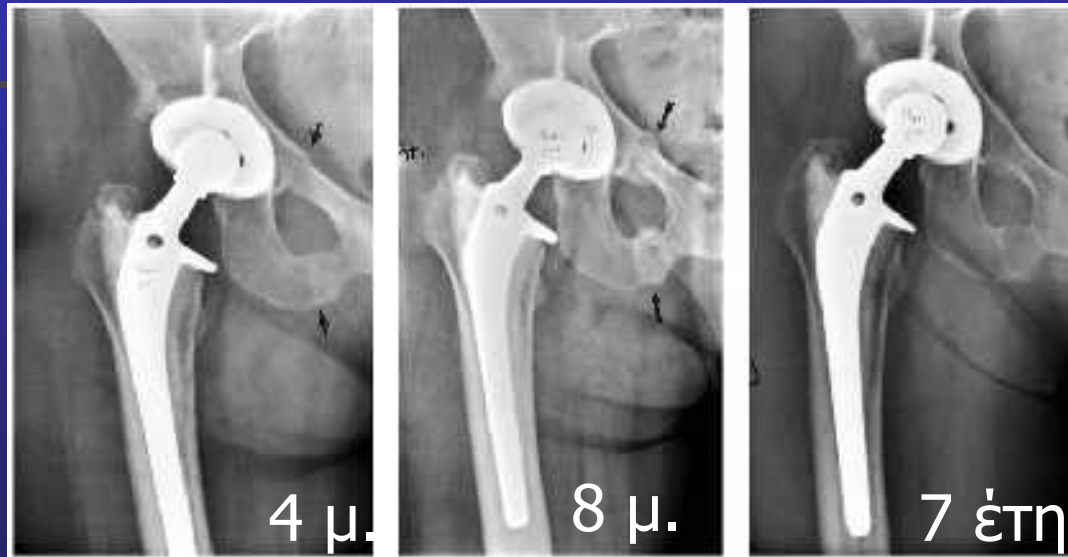
Αυξημένη πυκνότητα στο αριστερό πέταλο του Ο5

Αυξημένη συγκέντρωση του ραδιοφαρμάκου

Στην αξονική τομογραφία παρατηρείται  
αμφοτερόπλευρη σπονδυλόλυση



# # Ανεπαρκείας σε οστεοπενικούς με ΟΑΙ



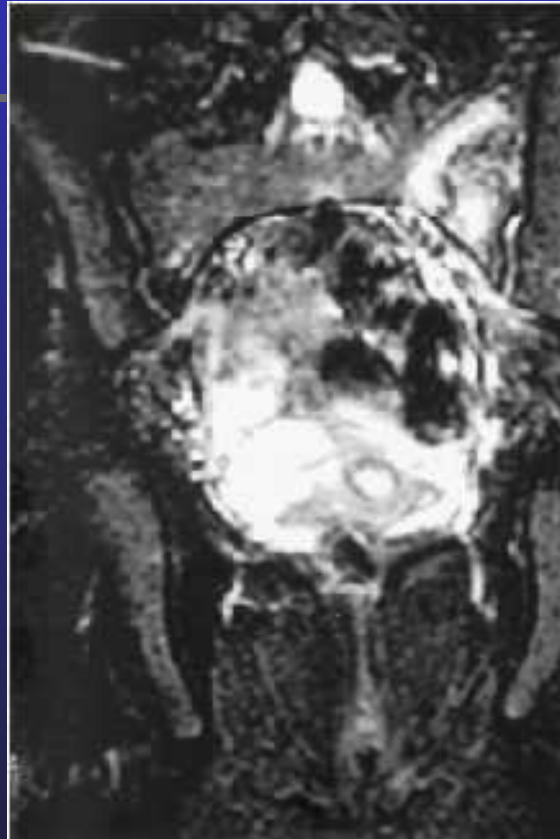
Θήλυ 70 ετών

Πόνος στο ριζομήριο 4 μήνες μετά από ΟΑΙ

# κλάδων ηβικού οστού

# # κόπωσης ιερού οστού

Πόνος στην οσφύ, το γλουτό και το μηρό χωρίς ιστορικό τραυματισμού

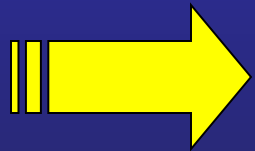


Αυξημένο σήμα στην AP πτέρυγα του ιερού (T2) λόγω οιδήματος μυελού. Εντός του οιδήματος καταγματική γραμμή χαμηλής έντασης.

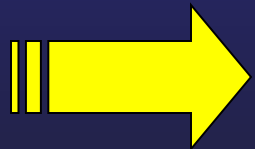


# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

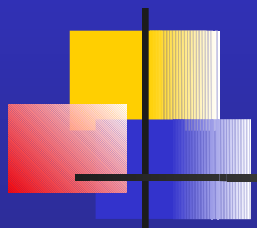
---



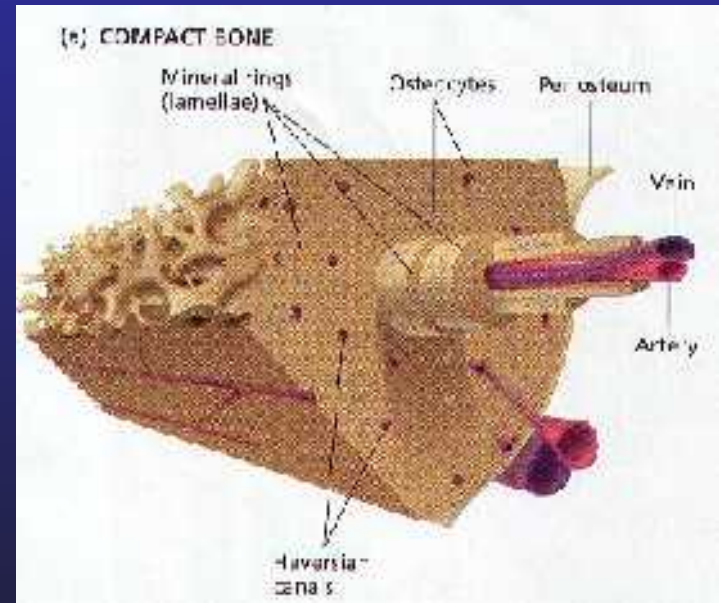
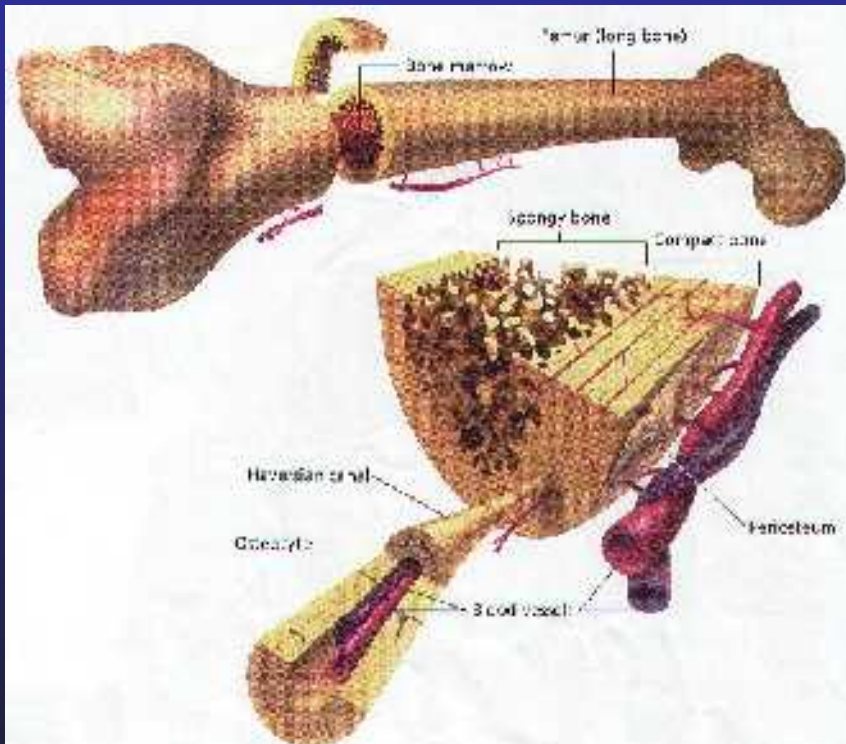
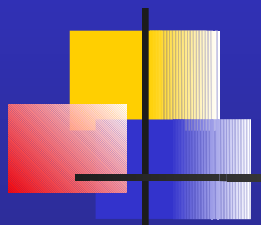
Τα κατάγματα κόπωσης εμφανίζονται συνήθως σε ασχολούμενους ενεργά με τον αθλητισμό.

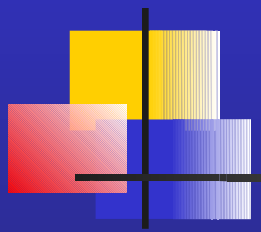


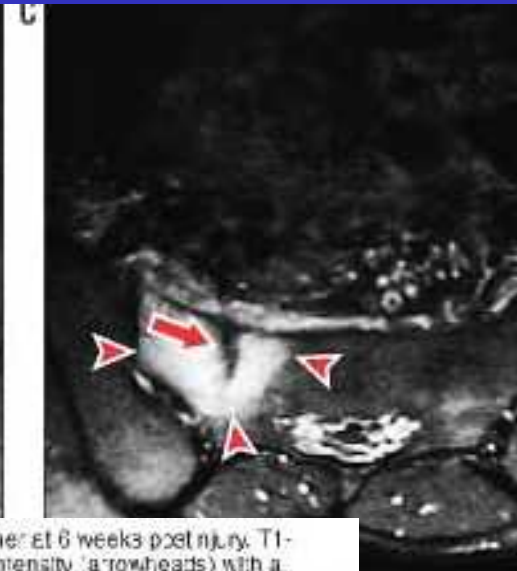
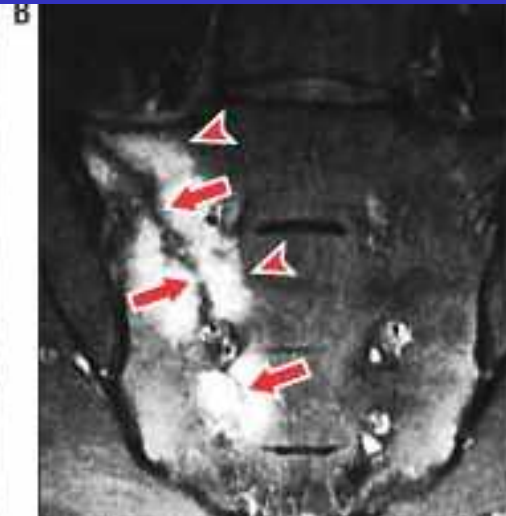
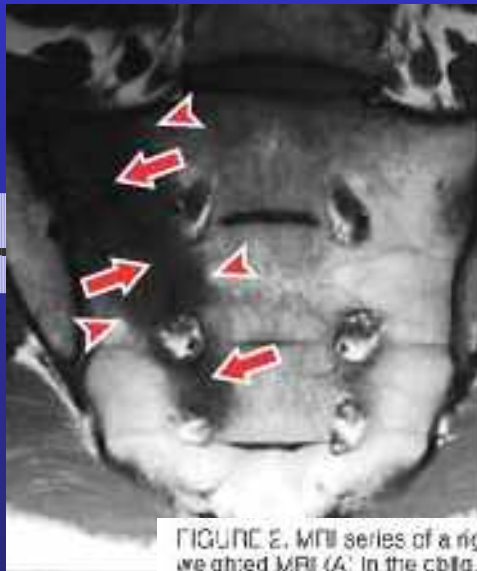
Η πρόιμη διάγνωση και η κατάλληλη αντιμετώπιση οδηγεί σε γρήγορη αποθεραπεία και επάνοδο στις αθλητικές δραστηριότητες.



**ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ**





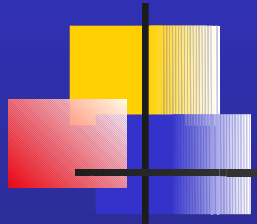


**FIGURE 2.** MRI series of a right sacral stress fracture in a 20-year-old male runner at 6 weeks post injury. T1-weighted MRI (A) in the oblique coronal plane shows a focal area of low signal intensity (arrowheads) with a central lower signal fracture line (arrows). Fat-suppressed T2-weighted MRI (B) shows bone edema (arrowheads) and better demonstrates the low-signal fracture line (arrows). Axial T2-weighted MRI (C) shows bone marrow edema (arrowheads) surrounding a low-intensity fracture line (arrow) through the anterior aspect of the sacrum. The injury may have been caused by the patient's training on asphalt, rather than his usual trails, while on vacation.



**FIGURE 3.** CT scan of the sacrum in the same patient obtained 8 weeks after the MRI series in figure 2 shows sclerosis along the fracture line and callus formation along the anterior aspect of the sacrum (arrows). Sclerotic and callus formation are signs of bony union that are desirable before an early return-to-running program can begin. Because of the severity of the injury, the patient did not start a return-to-running protocol until 12 weeks postinjury, and he was not back to his preinjury training mileage (100 miles/wk) until 6 months postinjury.





- The skeleton represents 17% of the human body so structural efficiency of bones is relevant to their performance in the body
- In human volunteers the maximum strain along the tibia axis is  $3.5 \times 10^{-4}$  during walking at 1.4 m/sec and  $8 \times 10^{-4}$  during running at 2.2 m/sec
- Strains of similar magnitudes have been observed in animals such as sheep
- The largest strain magnitude is  $3.2 \times 10^{-3}$  in the tibia of a galloping horse
- In tension in the longitudinal direction human bone yields at a strain of  $6.7 \times 10^{-3}$  and fractures at strain of 0.03



