

Νέες απεικονιστικές μέθοδοι στην απεικόνιση του μυοσκελετικού συστήματος (Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού)

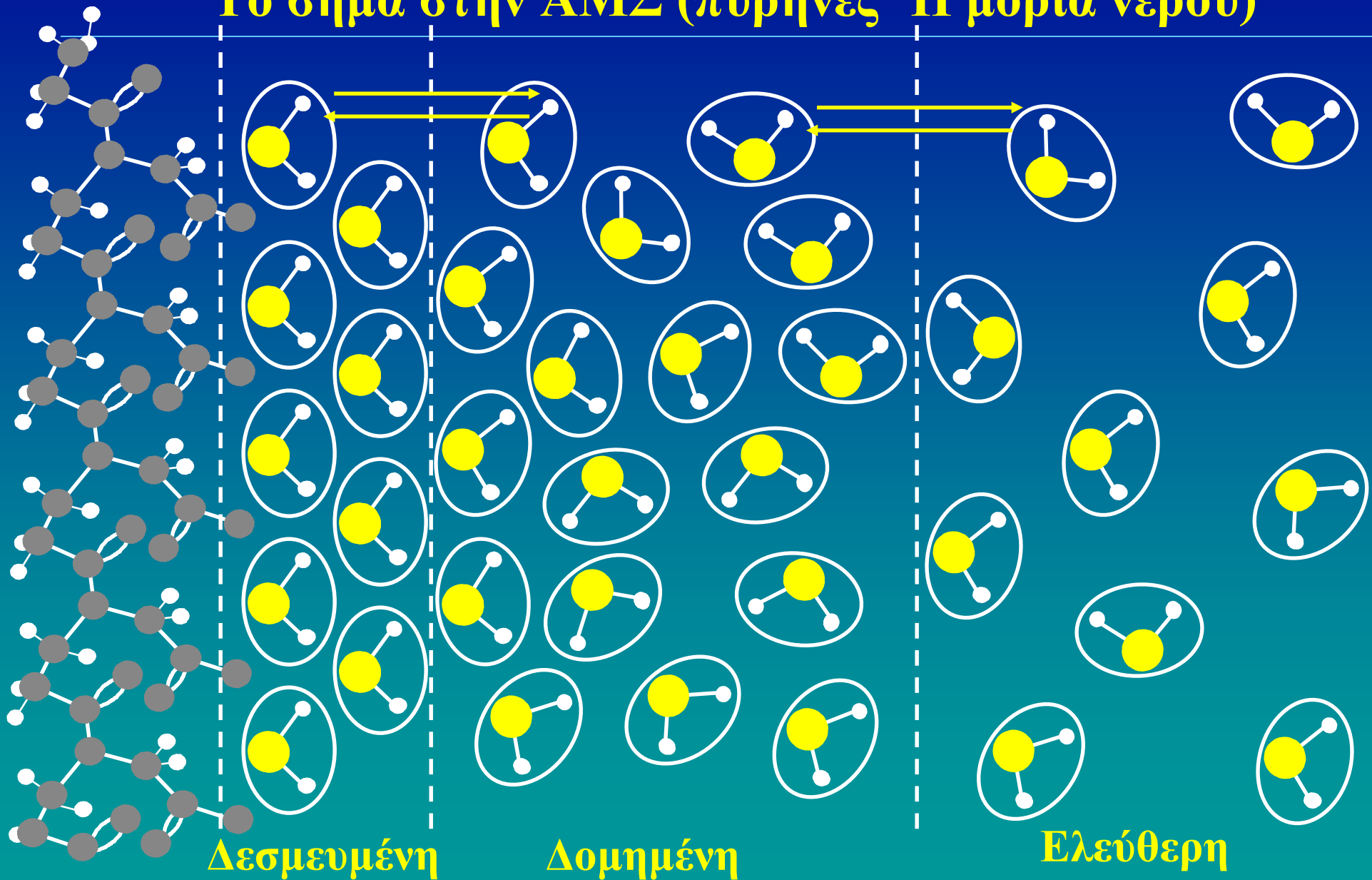
Θωμάς Γ. Μαρής
Αναπληρωτής Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής
Πανεπιστήμιο Κρήτης
(email: marist@uoc.gr)



Νέες τεχνικές απεικόνισης ΜΣΚ στην ΑΜΣ

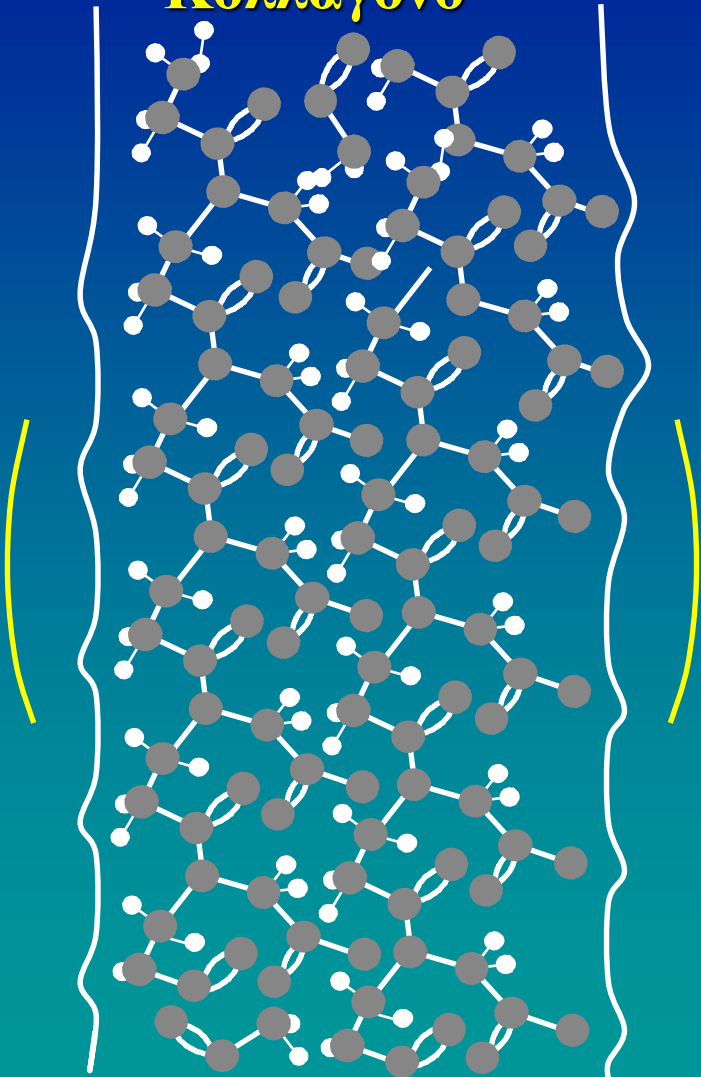
- ✓ Εισαγωγή στην ΑΜΣ
- ✓ Μετρητική της μαγνητικής αποκατάστασης
 - ✓ Μετρητική της μοριακής διάχυσης
 - ✓ Μετρητική της αιματικής διήθησης
 - ✓ Φασματοσκοπία

Το σήμα στην ΑΜΣ (πυρήνες ^1H μόρια νερού)

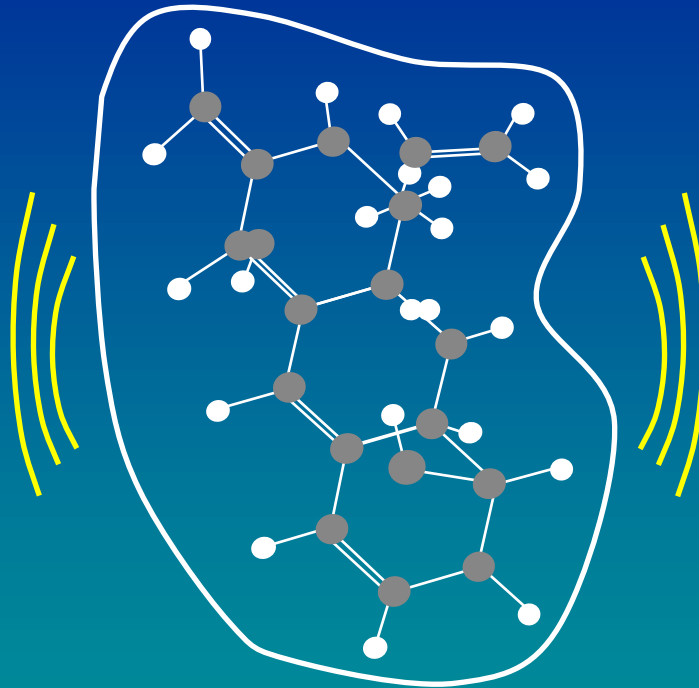


Το σήμα στην ΑΜΣ (πυρήνες ^1H μόρια λιπιδίων)

Κολλαγόνο

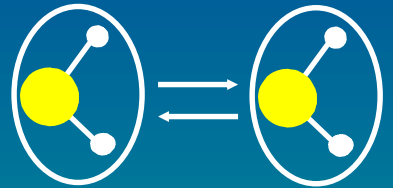


Χοληστερόλη

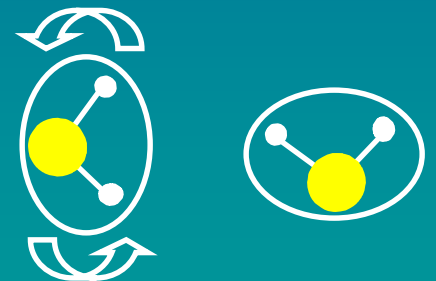


τ_c : χρόνος συσχέτισης
μεταφορικής και περιστροφικής
μοριακής κίνησης

Ελεύθερο νερό



Μεταφορά



Περιστροφή

Φυσικοί παράγοντες σκιαγραφικής αντίθεσης στην ΑΜΣ

- ✓ 1 : Μαγνητική επιδεκτικότητα ιστών (χ) :
(Επιδοχή εξωτερικού στατικού μαγνητικού πεδίου)
- ✓ 2 : Ηλεκτρική αγωγιμότητα ιστών (σ) :
(Επιδοχή εξωτερικού στατικού/μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου)
- ✓ 3 : Πυκνότητα Πρωτονίων (PD) :
(Αριθμός μαγνητικά ενεργών πυρήνων ^1H)
- ✓ 4 : Χρόνος μαγνητικής αποκατάστασης T1 :
(Μοριακός μαγνητικός συντονισμός πυρήνων ^1H)
- ✓ 5 : Χρόνοι μαγνητικής αποκατάστασης T2, T2* :
(Μοριακή **μαγνητική** γειτνίαση πυρήνων ^1H)
- ✓ 6 : Μοριακή Διάχυση, Φαινομενικός Συντελεστής Διάχυσης (ADC) :
(Μοριακή **φυσική** γειτνίαση πυρήνων ^1H)

Φυσιολογικές τιμές φυσικών παραγόντων στην ΑΜΣ

- ✓ 1 : Μαγνητική επιδεκτικότητα ιστών (χ) :
[(-11 to -7) $\times 10^{-6}$, κυρίως διαμαγνητικά υλικά]
- ✓ 2 : Ηλεκτρική αγωγιμότητα ιστών (σ) :
[$\sigma = 0.010$ S/cm, ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά]
- ✓ 3 : Πυκνότητα Πρωτονίων (PD) :
[PD $\geq$ πυκνότητα πυρήνων ^1H στα μόρια H_2O]
- ✓ 4 : Χρόνος μαγνητικής αποκατάστασης T1 :
[100 ms < T1 < 1200 ms]
- ✓ 5 : Χρόνοι μαγνητικής αποκατάστασης T2, T2* :
[(50ms < T2 < 400 ms), (20ms < T2* < 200 ms)]
- ✓ 6 : Μοριακή Διάχυση, Φαινομενικός Συντελεστής Διάχυσης (ADC) :
[(40-400) $\times 10^{-5}$ mm²/sec]

Μαλακοί ιστοί :
T1/T2 ~ 5

Σωματικά υγρά :
T1/T2 ~ 2.5

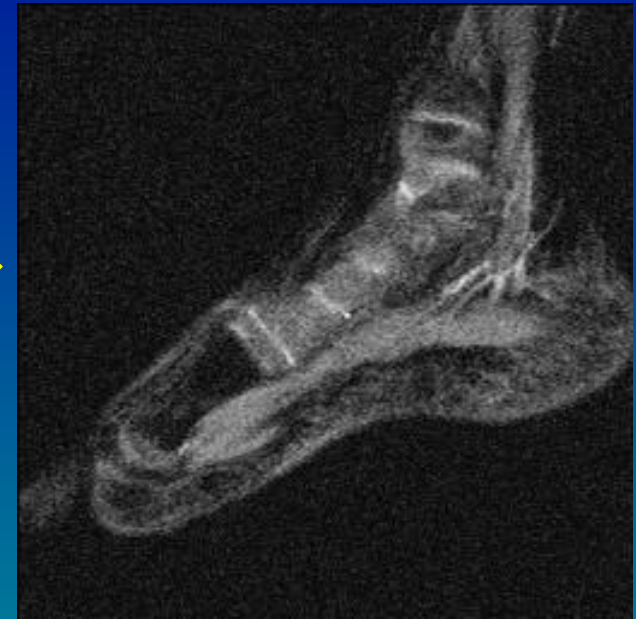
Χαρακτηριστικά εικόνων ΑΜΣ

Παράγοντες βελτιστοποίησης διαγνωστικής αξίας

- ✓ Επαρκής ΣηματοΘορυβικός Λόγος (ΣΘΛ, SNR)
- ✓ Αυξημένη χωρική διακριτική ικανότητα (λεπτομέρεια)
- ✓ Επαρκής απεικόνιση ανατομίας
- ✓ Βελτιστοποίηση σκιαγραφικής αντίθεσης
- ✓ Βελτιστοποίηση του χρόνου εξέτασης
- ✓ Ελαχιστοποίηση τεχνικών σφαλμάτων (κίνησης / μαγνητικής επιδεκτικότητας)

Σηματοθορυβικός λόγος (SNR)

Εικόνα ΑΜΣ με μικρό SNR αντιστοιχεί σε εικόνα με κοκκώδη υφή με αδυναμία απεικόνισης της ανατομικής πληροφορίας →



Αύξηση του SNR επιτυγχάνεται με

- ✓ Αύξηση του χρόνου επανάληψης εκπομπής (TR)
- ✓ Μείωση του χρόνου λήψης (TE)
- ✓ Αύξηση του αριθμού δειγματοληψιών (NSA, NEX, averages)
- ✓ Μεγαλύτερα στοιχεία όγκου εικόνων (voxel size)
- ✓ Μεγάλες τιμές έντασης στατικού πεδίου (3T)
- ✓ Ειδικά πηνία λήψης (RF Coils)

Χωρική Διακριτική Ικανότητα

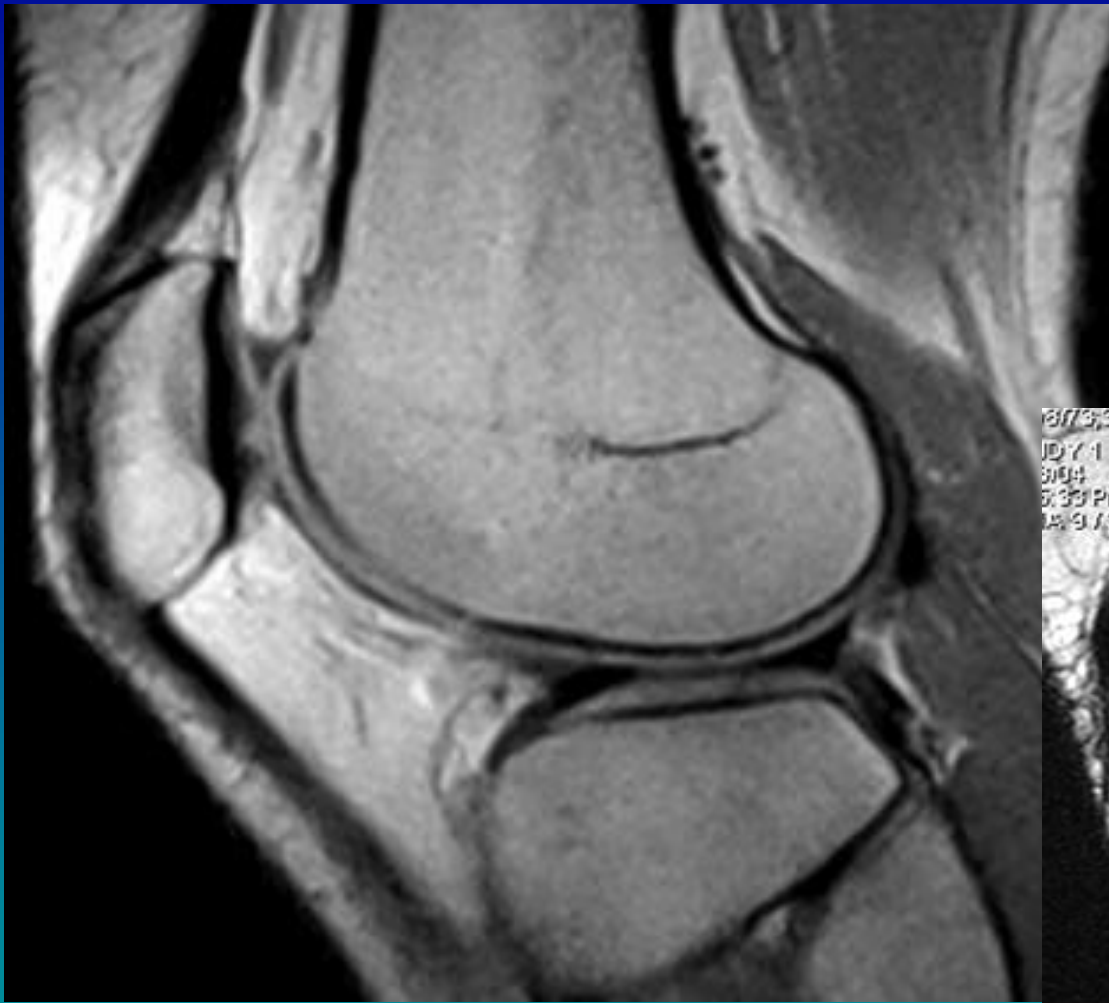
- ✓ Μήτρα ανακατασκευής εικόνας
 - ✓ Πάχος τομής
 - ✓ Εξεταστικό πεδίο
- } **Στοιχείο όγκου (voxel)**

Βελτίωση της ΧΔΙ (μικρό voxel) επιτυγχάνεται με

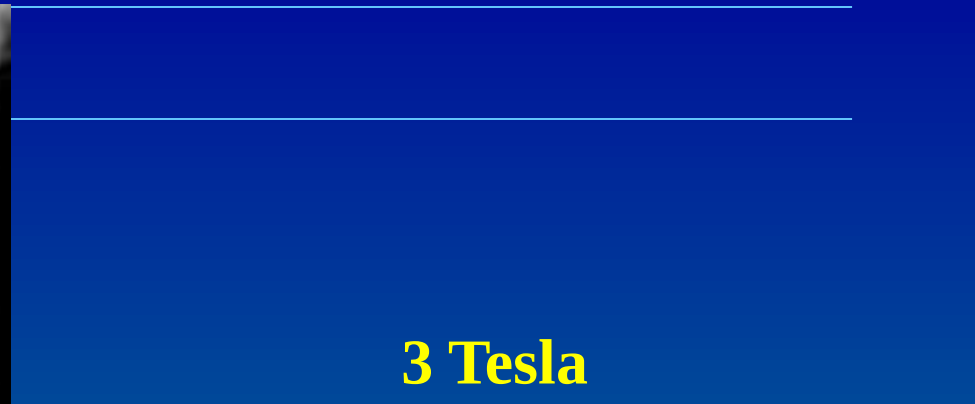
- ✓ Συστήματα υψηλής έντασης στατικού πεδίου
- ✓ Συστήματα βαθμίδων (Gradients) μεγάλης ισχύος
- ✓ Ειδικά πηνία επιφανείας μικρών διαστάσεων

Η αρχή της τελειότητας





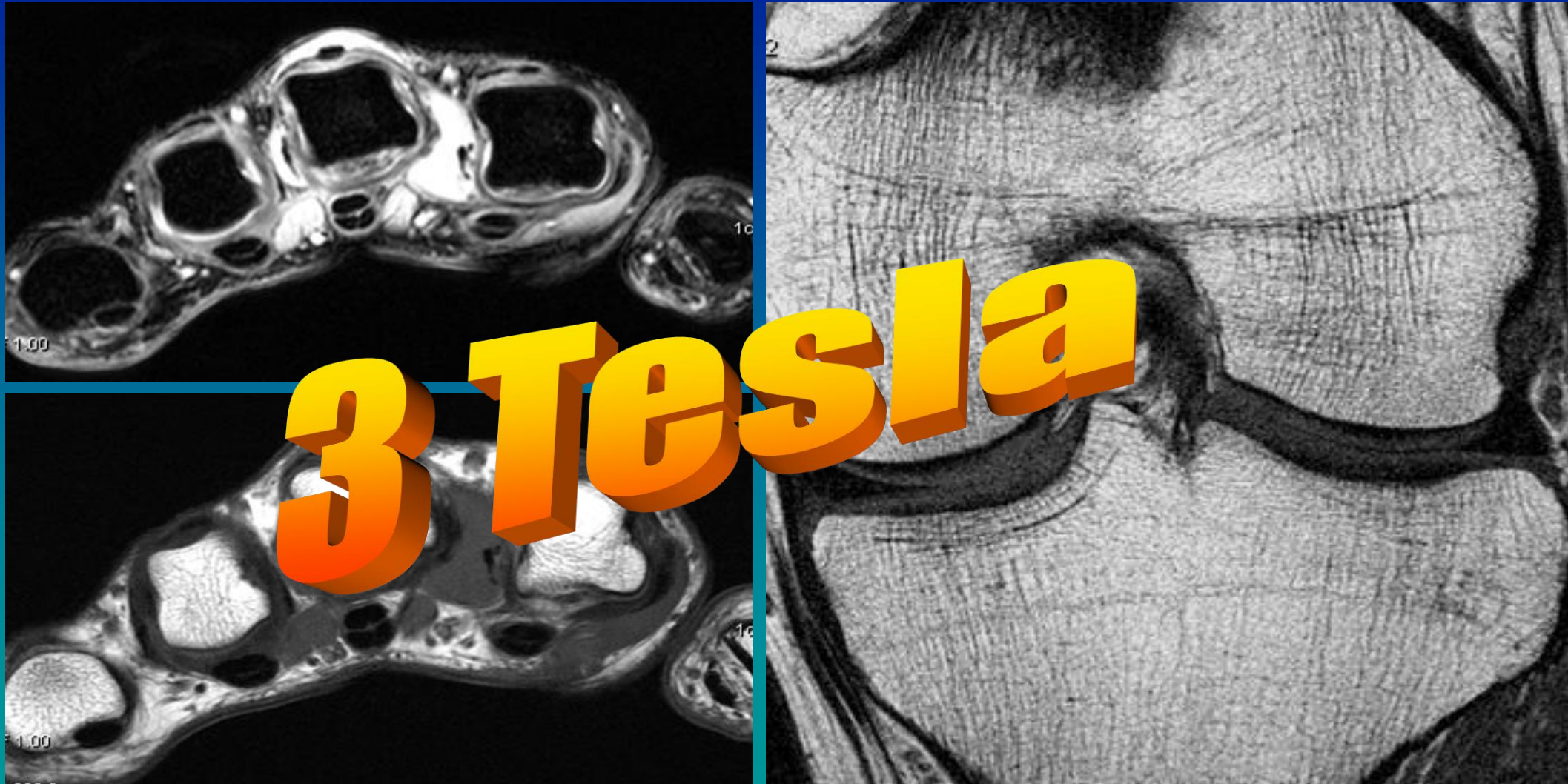
0.25 Tesla



3 Tesla



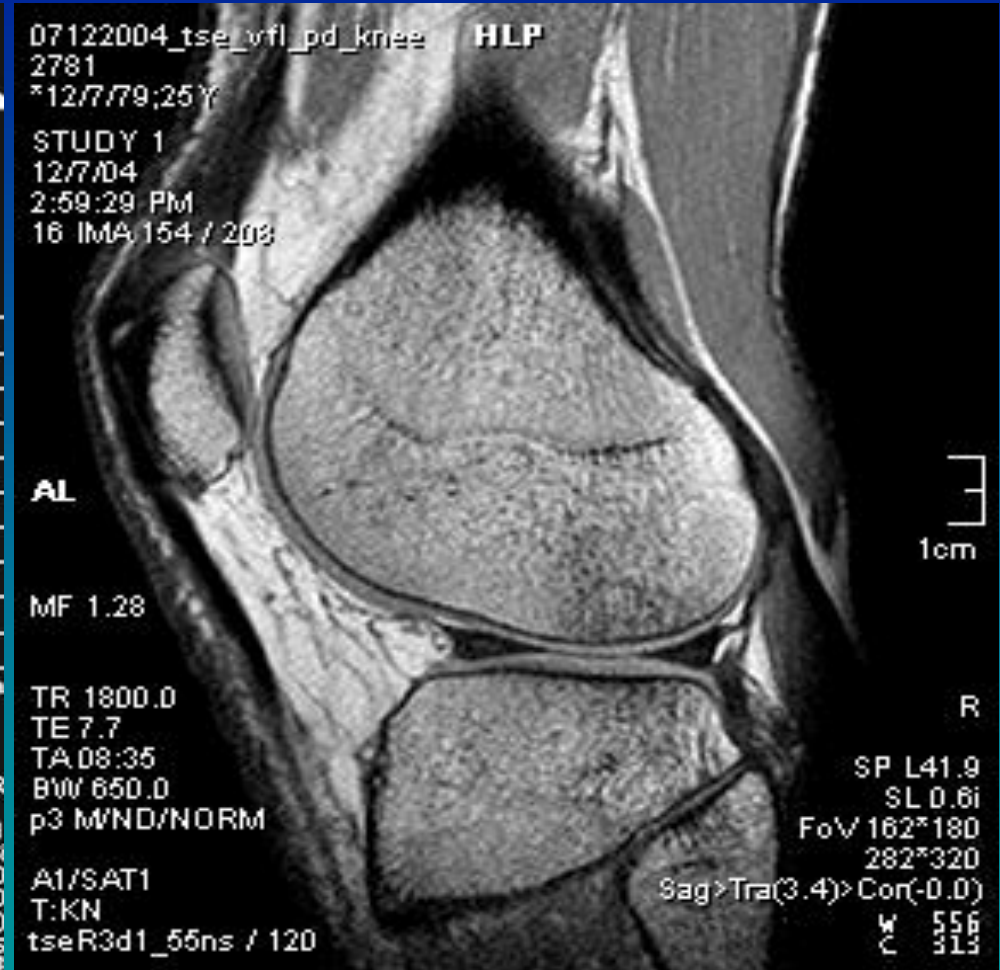
$H_0 = 3$ Tesla, Ισχυρά συστήματα βαθμίδων (Gradients)



$H_0 = 1.5$ Tesla, Ισχυρά συστήματα βαθμίδων (Gradients)

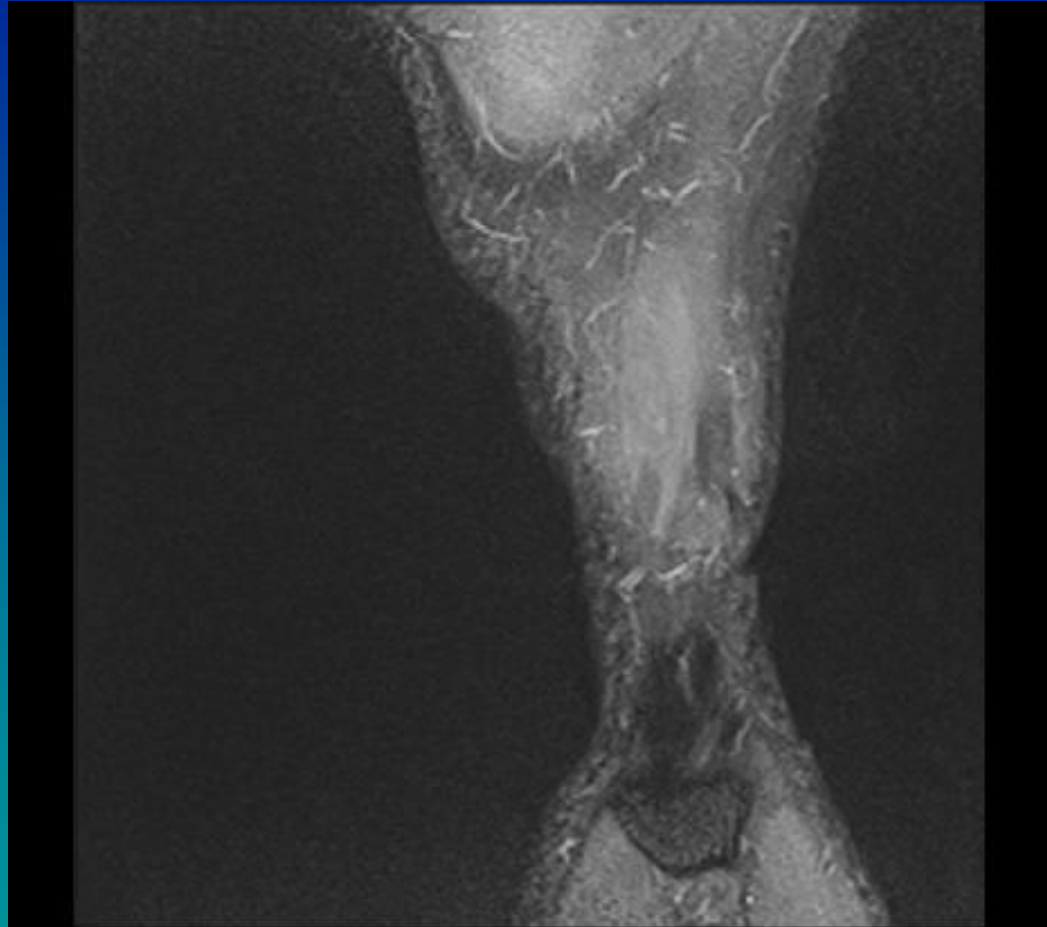
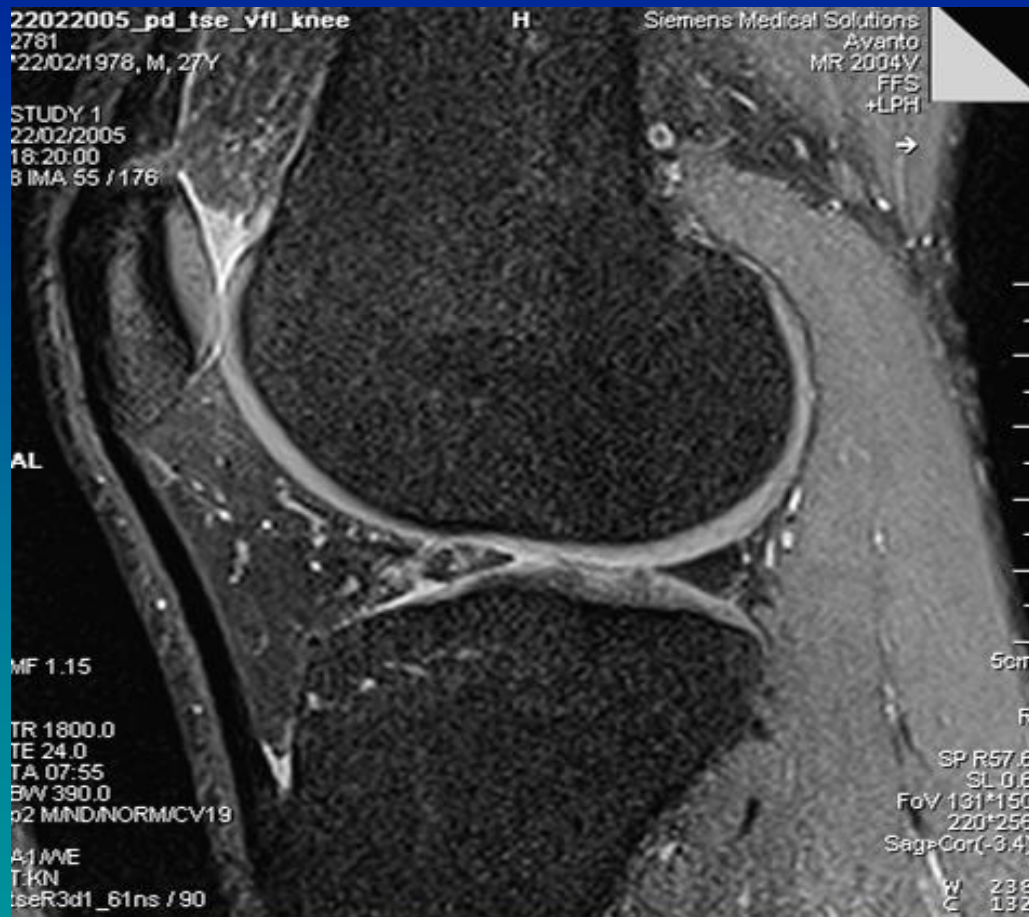


3D PD SPACE with Fat Sat and Restore Pulse



isotropic 0.6 mm, PAT=3

3D PD SPACE with Fat Sat and Restore Pulse



isotropic 0.6 mm, PAT=2

Νέες τεχνικές απεικόνισης ΜΣΚ στην ΑΜΣ

- ✓ Εισαγωγή στην ΑΜΣ
- ✓ Μετρητική της μαγνητικής αποκατάστασης
 - ✓ Μετρητική της μοριακής διάχυσης
 - ✓ Μετρητική της αιματικής διήθησης
 - ✓ Φασματοσκοπία

Μετρητική μαγνητικής αποκατάστασης (T1, T2, T2*)

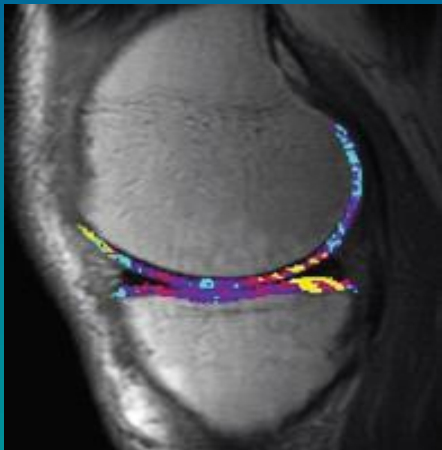
- ✓ Αρθρικός χόνδρος
- ✓ Οστεοπόρωση

Μετρητική T2 : (Αρθρικός χόνδρος)

Παραμετρικοί χάρτες T2 (T2 maps)

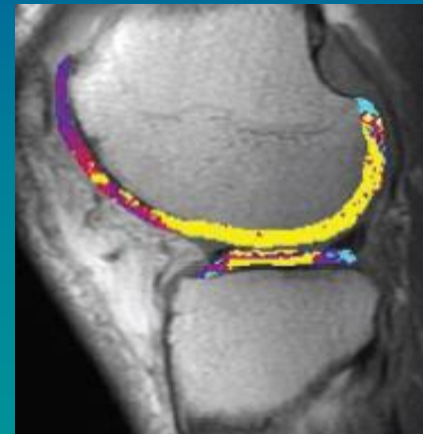
- ✓ Φυσιολογικές τιμές : μέσες τιμές T2 : **32.1–35.0 msec**
- ✓ Οστεοαρθρίτιδα (ΟΑ) : μέσες τιμές T2 : **34.4–41.0 msec**
- ✓ Στον αρθρικό χόνδρο (Μηρός + Κνήμη) : Οι τιμές T2 αυξάνονται με την βαρύτητα της νόσου της οστεοαρθρίτιδας

• *Dunn, Radiology 04*



T2map @ T1w

Φυσιολογικές τιμές



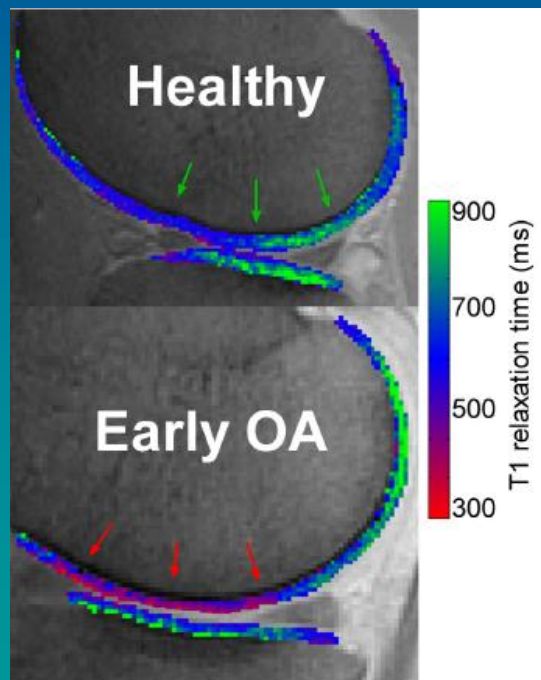
T2map @ T1w

Αυξημένες τιμές T2

Μετρητική T1 : (Αρθρικός χόνδρος)

Delayed Gadolinium-Enhanced MRI (dGEMRIC), 3T

- ✓ Στον αρθρικό χόνδρο (Μηρός + Κνήμη) : Οι τιμές T1 (dGEMRIC) μειώνονται με την βαρύτητα της νόσου της οστεοαρθρίτιδας (OA).



T1map @ 3D T1w

Μείωση συγκέντρωσης
Πρωτεογλυκανών η/και
Γλυκοζαμινογλυκανών



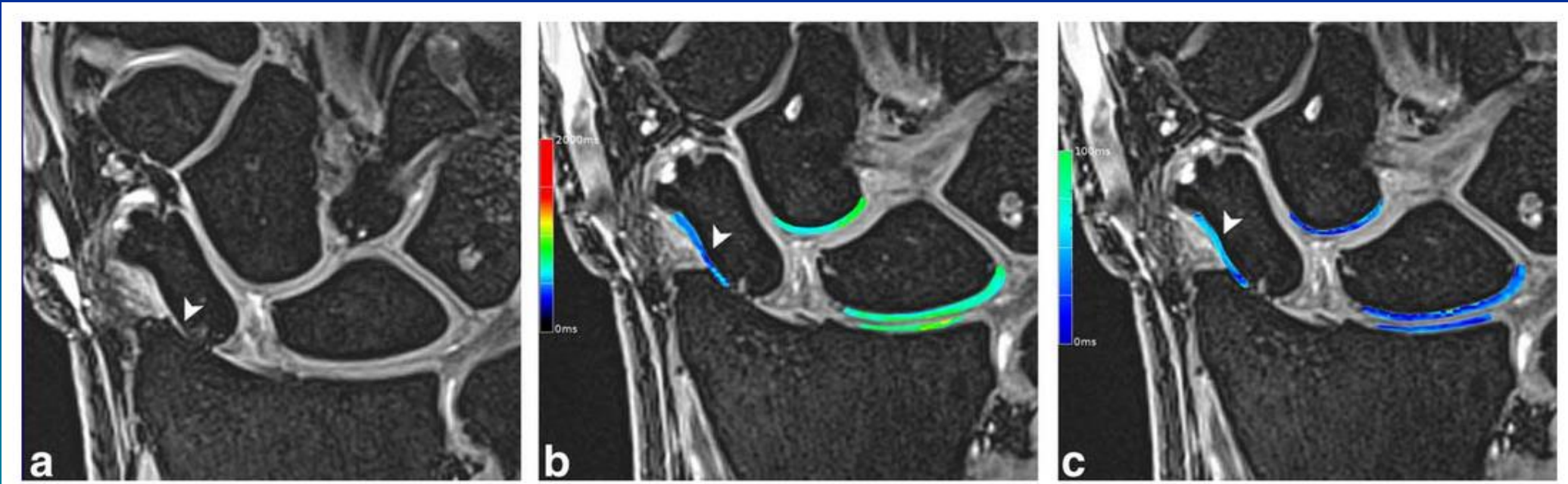
Αύξηση καθυστερημένης
πρόσληψης Gd



Μείωση του χρόνου T1

Μετρητική T1 : (Αρθρικός χόνδρος)

Delayed Gadolinium-Enhanced MRI (dGEMRIC), 3T



Ανατομική DESS

T1map @ DESS

T2map @ DESS

Φυσιολογικές τιμές ➡ T1 : 731.3 ± 47.1 ms

Παθολογικές τιμές ➡ T1 : 674.6 ± 72.1 ms

T2 : 36.5 ± 5 ms

T2 : 41.1 ± 3.2 ms

Rehnitz, JMRI, 2017

Πανεπιστήμιο Κρήτης

Μετρητική T2, T2*: οστεοπόρωση

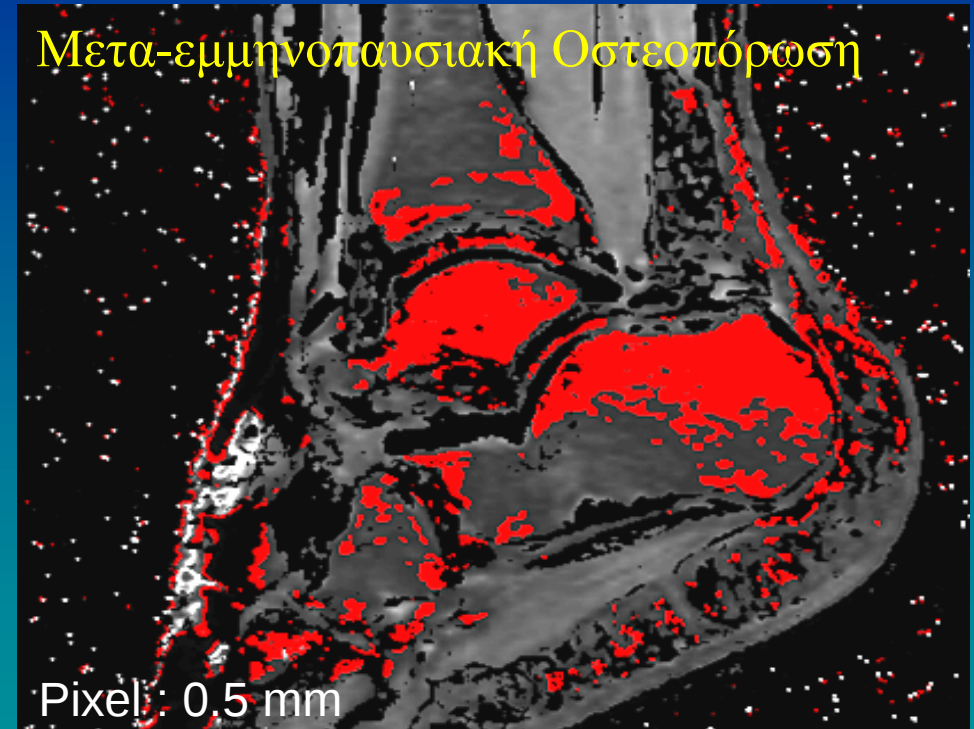
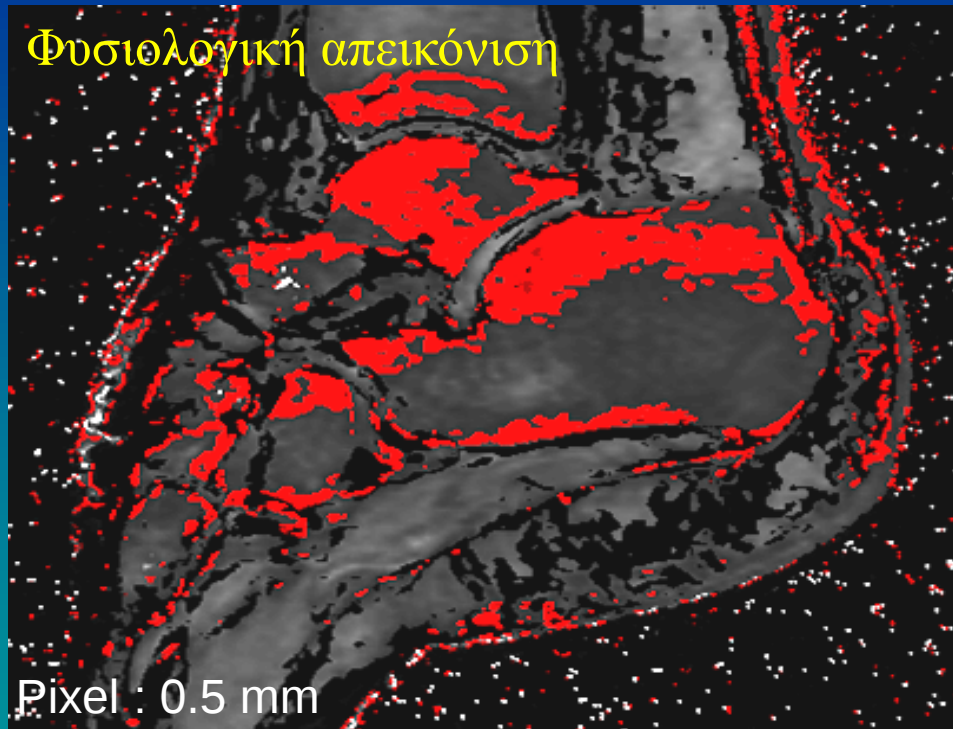
Πυκνότητα, ποιότητα και ποσότητα των οστικών δοκίδων

- ✓ Οι XMA T2* στον οστικό μυελό, αυξάνονται με την μείωση της οστικής πυκνότητας, άρα και με την ηλικία
 - *Wehrli FW, Radiology, 1991*
- ✓ Φυσιολογικές τιμές, T2* : 13.4 ms , Οστεοπόρωση, T2* : 19.9 ms
 - *Funke M, Fortschr Roentgenstr 1994*
- ✓ Οι τιμές T2* και T2' (ΔH) είναι αρκετά ευαίσθητες στην εκτίμηση της οστεοπόρωσης της οσφυικής μοίρας
 - *Maris, Eur J Radiol 2004*

Μετρητική T2*: οστεοπόρωση

Πυκνότητα των οστικών δοκίδων

2D MEGRE (22 echoes), 1.5T : (TR/TE1/TE22/FA : 120/2.4/52.8/20)



Παραμετρικοί χάρτες T2*

Χρωματική επίπεδη κλίμακα τιμών T2* : (13 - 20) ms

Μορφομετρία 3D DESS : οστεοπόρωση

Ποιότητα και ποσότητα των οστικών δοκίδων

3D DESS sequence, 1.5T : (TR/TE/FA : 20/6/45), Φίλτρα όξυνσης

Φυσιολογική απεικόνιση



Μετα-εμμηνοπαυσιακή Οστεοπόρωση



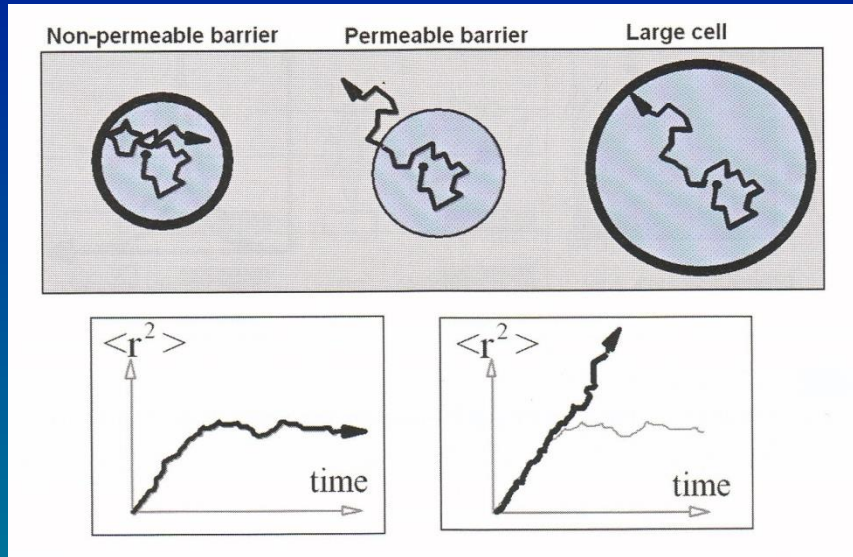
Μορφομετρικές παράμετροι :

- (a) Φαινομενικό πάχος δοκίδων, (b) Σχετικός όγκος δοκιδώδους οστού,
- (c) Κενοτοπικότητα δοκίδων, (d) Επιφανειακή πυκνότητα δοκίδων

Νέες τεχνικές απεικόνισης ΜΣΚ στην ΑΜΣ

- ✓ Εισαγωγή στην ΑΜΣ
- ✓ Μετρητική της μαγνητικής αποκατάστασης
 - ✓ Μετρητική της μοριακής διάχυσης
 - ✓ Μετρητική της αιματικής διήθησης
 - ✓ Φασματοσκοπία

Μοριακή διάχυση



$$\langle r^2 \rangle = 6 \cdot D \cdot t \Leftrightarrow \langle r \rangle = \sqrt{6 \cdot D \cdot t}$$

- Μπορεί για ένα μόριο νερού να υπολογισθεί η μέση μετακίνηση ανά sec, για συγκεκριμένο (D)
- Το συνολικό μήκος $>$ μέσο μήκος

Για τα μόρια του νερού σε μικροπεριβάλλον ελεύθερης κίνησης, ο συντελεστής αυτο-διάχυσης είναι ένα απλό βαθμωτό μέγεθος

$T = 20 \text{ C} : D = 200 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{sec},$	$\langle r \rangle \sim 45 \text{ } \mu\text{m} / \text{sec}$
$T = 25 \text{ C} : D = 220 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{sec}$	$\langle r \rangle \sim 50 \text{ } \mu\text{m} / \text{sec}$
$T = 37 \text{ C} : D = 300 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{sec}$	$\langle r \rangle \sim 55 \text{ } \mu\text{m} / \text{sec}$

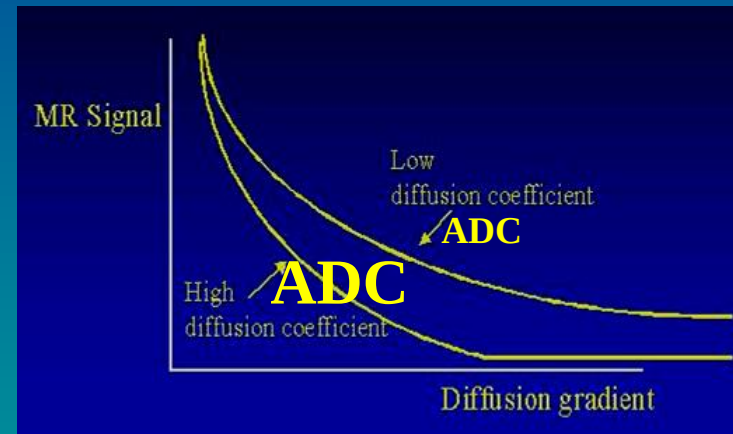
Μοριακή Διάχυση μετρητικής ADC

Βασική εξίσωση διάχυσης : $I = I_0 \exp(-b \text{ ADC})$

I : Ένταση σήματος ΑΜΣ *με την παρουσία* βαθμίδων ποσοτικοποίησης διάχυσης,

I_0 : Ένταση σήματος ΑΜΣ *χωρίς την παρουσία* βαθμίδων ποσοτικοποίησης διάχυσης,

$$b = (\gamma g \delta)^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right)$$



γ : Γυρομαγνητικός λόγος

Παράμετροι βαθμίδων ποσοτικοποίησης διάχυσης :

g : πλάτος, Δ , δ : Χρονικές διαφορές εφαρμογής βαθμίδων διάχυσης

Μοριακή Διάχυση μετρητικής ADC

Εφαρμογές στο μυοσκελετικό σύστημα

✓ Εκτίμηση παθολογιών σπονδύλων

- Καλοήθη συμπιεστικά κατάγματα
- Μεταστάσεις
- Αιμαγγειώματα
- Εκφύλιση δίσκων, πρόδρομη απεικόνιση δισκοκοίλης

✓ Εκφύλιση οστικού χόνδρου

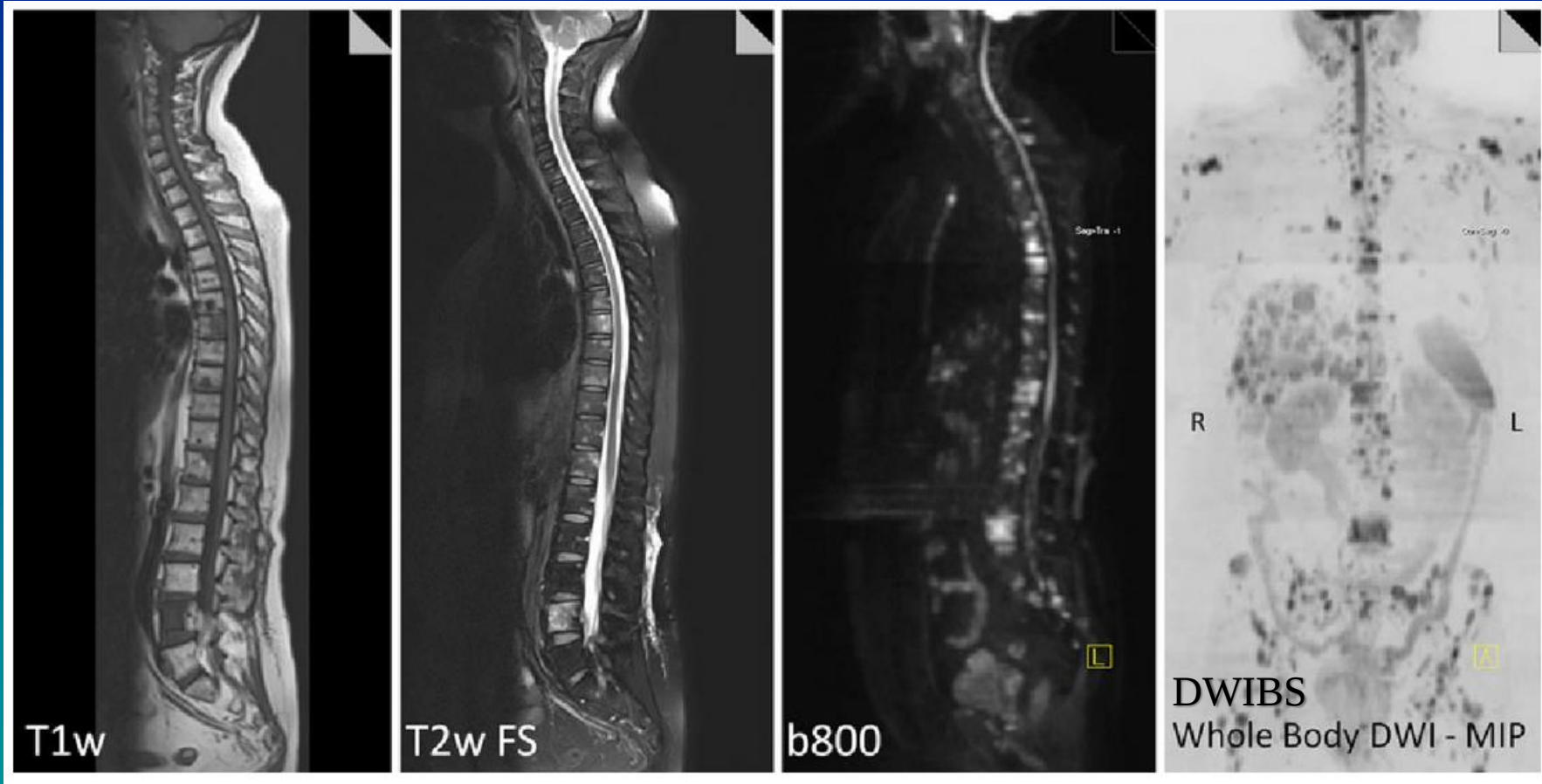
✓ Οστεοπόρωση

✓ Ολοσωματικές Μεταστάσεις – πολλαπλό μυέλωμα

✓ Λοιμώδεις νόσοι

Μοριακή Διάχυση μετρητικής ADC

Ασθενής (F) 27y, Οστικές μεταστάσεις



b800 : Εικόνα έμφασης διάχυσης με τιμή $b = 800 \times 10^{-5} \text{ s/mm}^2$

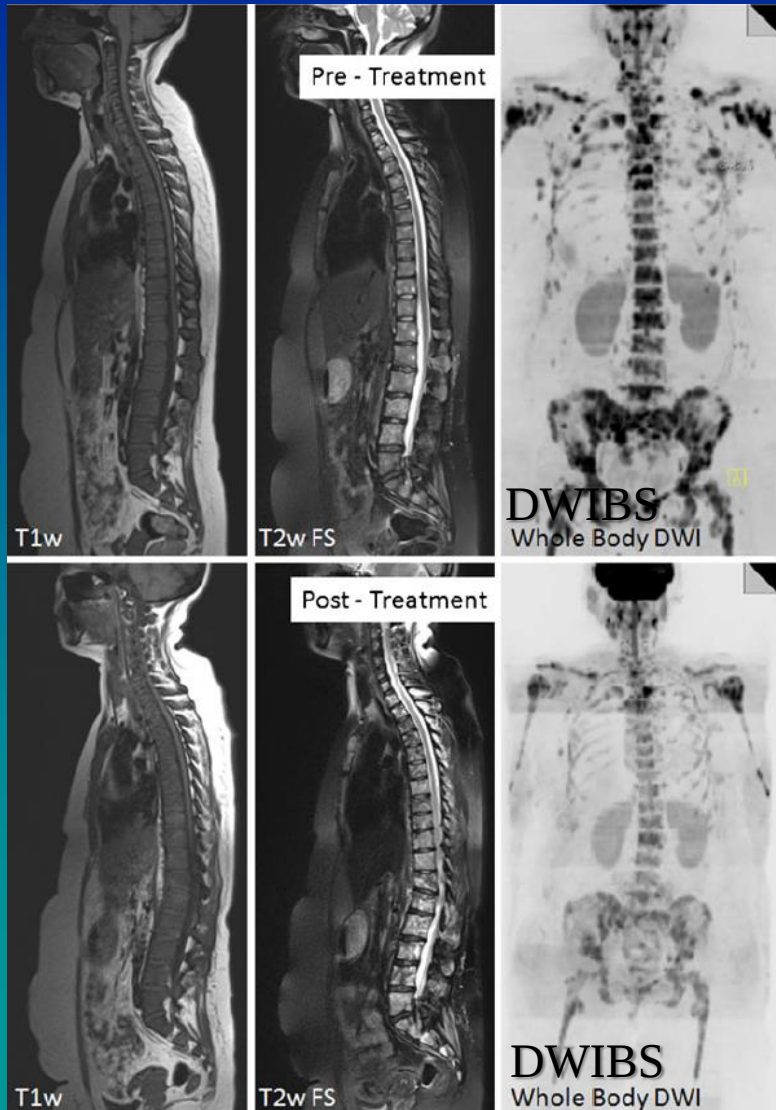
DWIBS : Diffusion Weighted Imaging with Background body signal suppression

Khoo, Skeletal Radiol, 2011

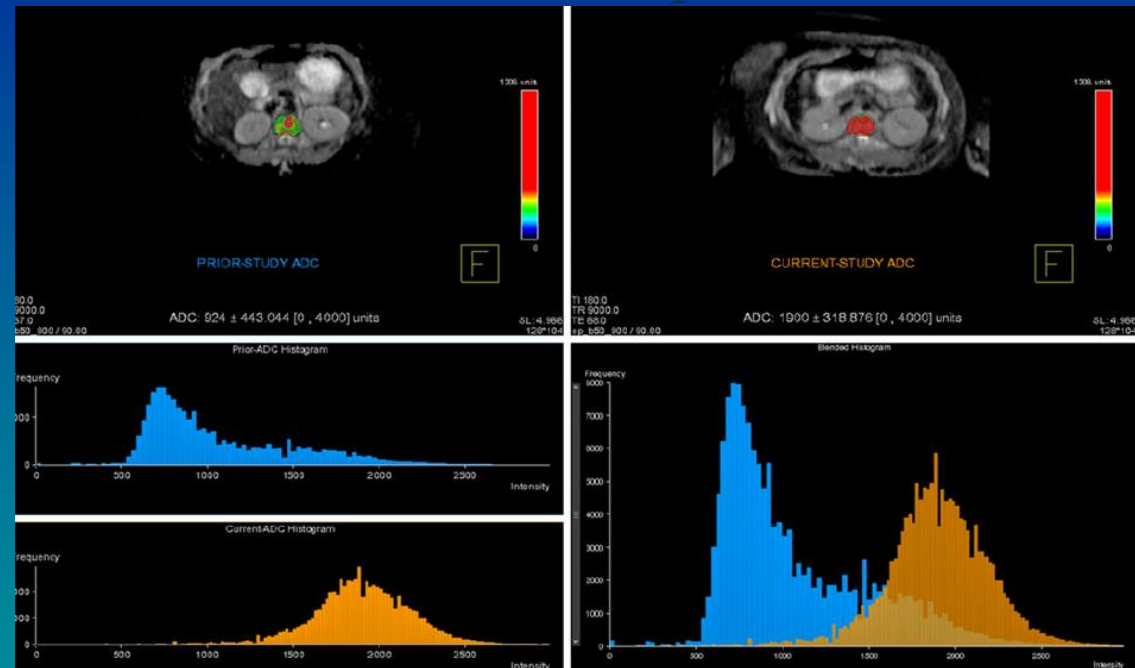
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Μοριακή Διάχυση μετρητικής ADC

Ασθενής (F) 37y, πριν και μετά 3μηνο σχήμα χημειοθεραπείας



ADC maps



<ADC>

92.4 x 10⁻⁵ mm²/s

<ADC>

190 x 10⁻⁵ mm²/s

Khoo, Skeletal Radiol, 2011

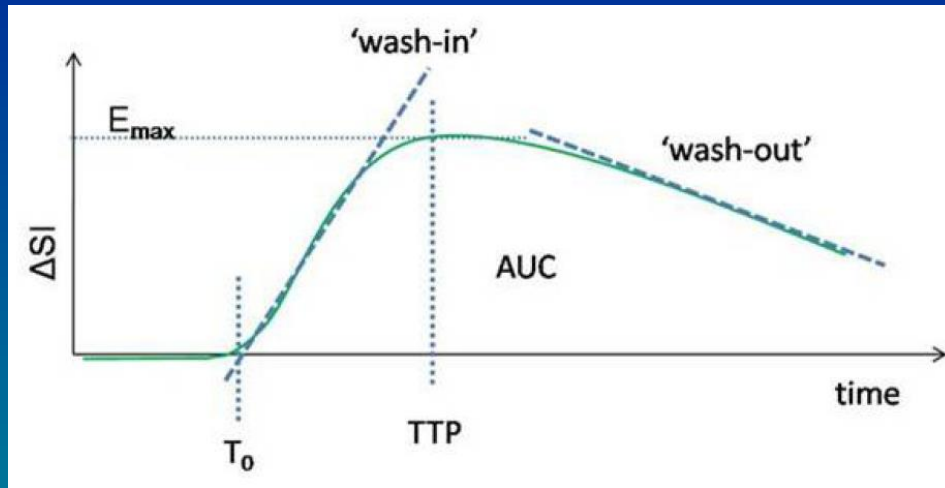
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Νέες τεχνικές απεικόνισης ΜΣΚ στην ΑΜΣ

- ✓ Εισαγωγή στην ΑΜΣ
- ✓ Μετρητική της μαγνητικής αποκατάστασης
 - ✓ Μετρητική της μοριακής διάχυσης
 - ✓ Μετρητική της αιματικής διήθησης
 - ✓ Φασματοσκοπία

Αιματική διήθηση μετρητικής T1 (T1 perfusion)

Ποσοτική εκτίμηση, κινηματικά μοντέλα διήθησης σκιαγραφικών



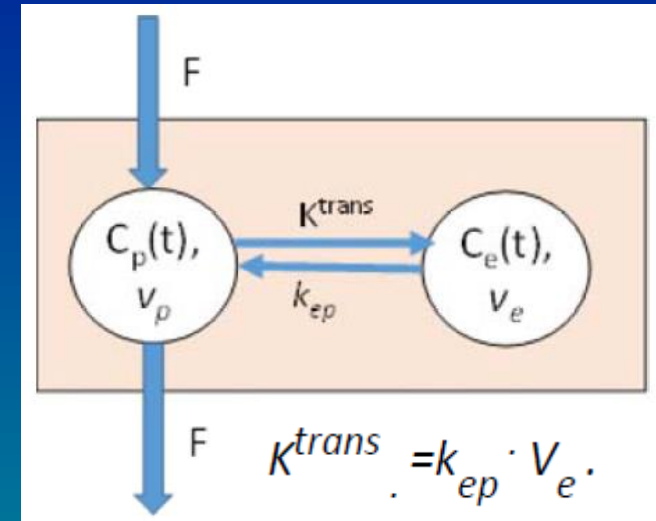
Ημιοσοτική μοντελοποίηση

Wash IN

Wash OUT

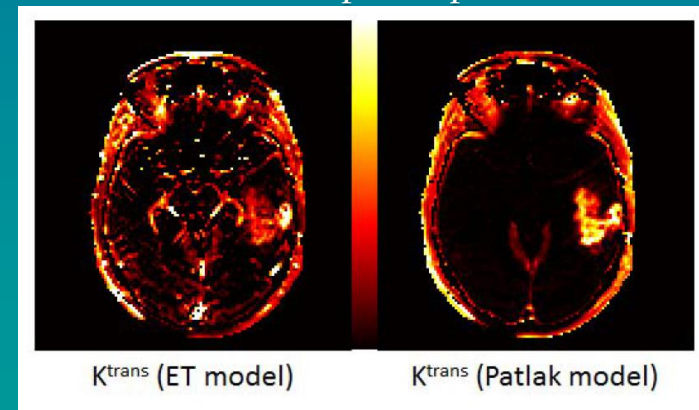
AUC

TTP



Ποσοτική μοντελοποίηση

K^{trans} , k_{ep} , V_p , V_e



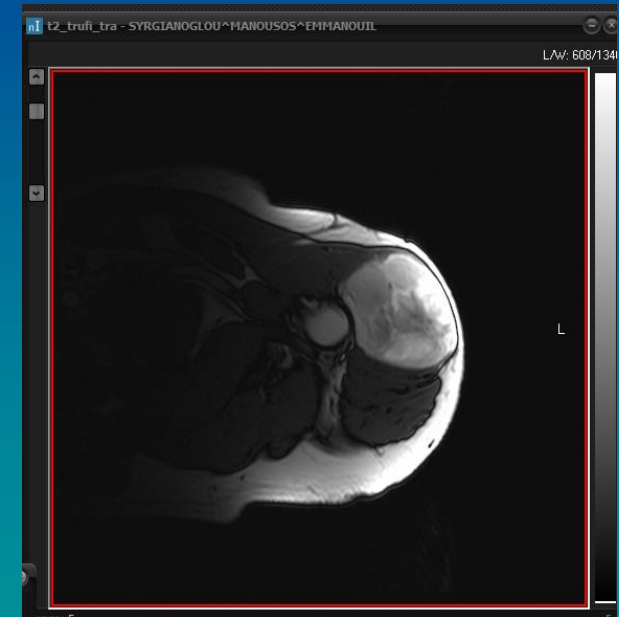
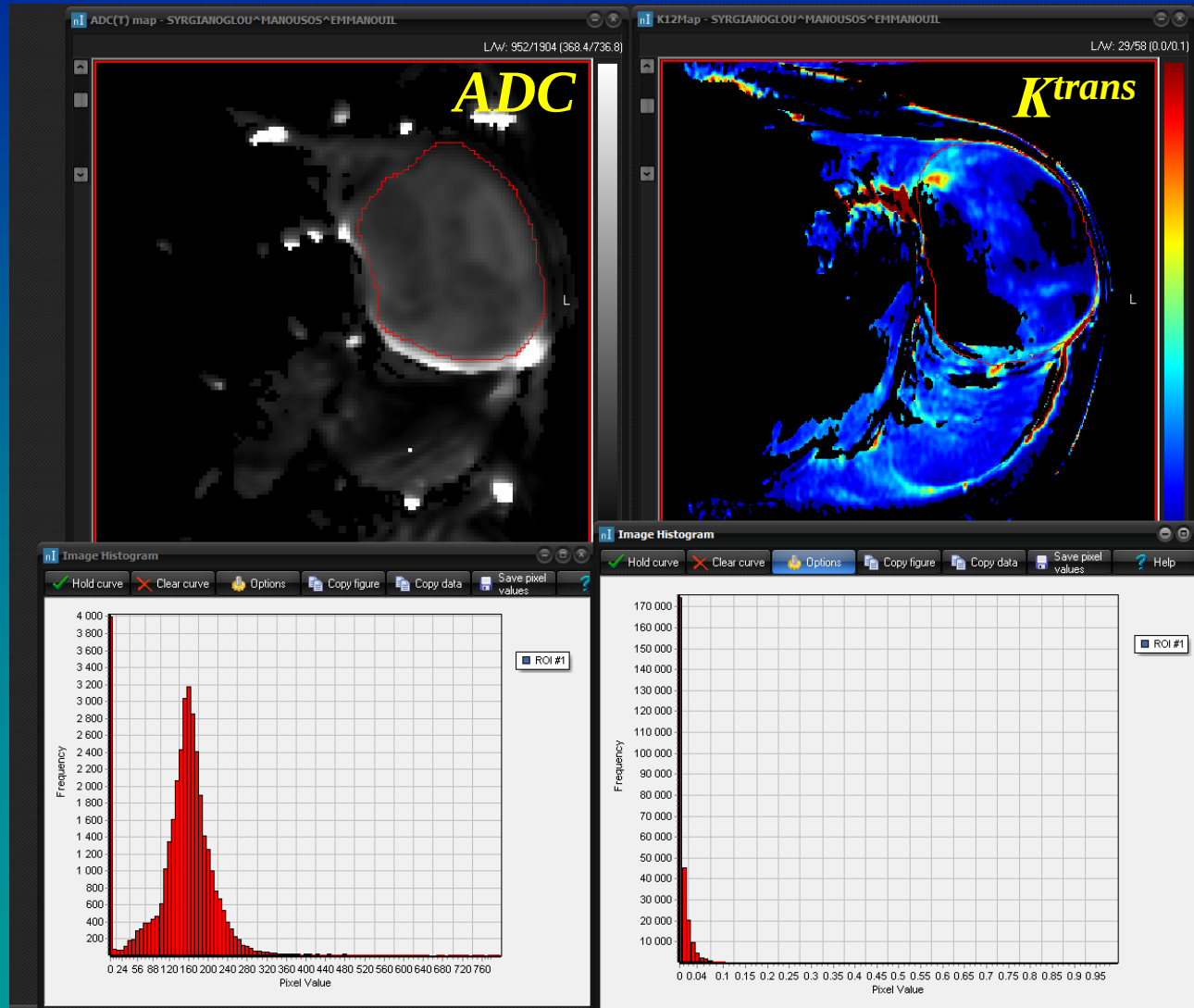
Αιματική διήθηση μετρητικής T1 (T1 perfusion)

Εφαρμογές στο μυοσκελετικό σύστημα

- ✓ Όγκοι μαλακών μορίων
- ✓ Όγκοι οστικών δομών
 - Καλοήθεις
 - Κακοήθεις
- ✓ Παροδική οστεοπόρωση
- ✓ Βιωσιμότητα αγγειούμενων μοσχευμάτων
- ✓ Εκτίμηση ρευματοειδούς αρθρίτιδας

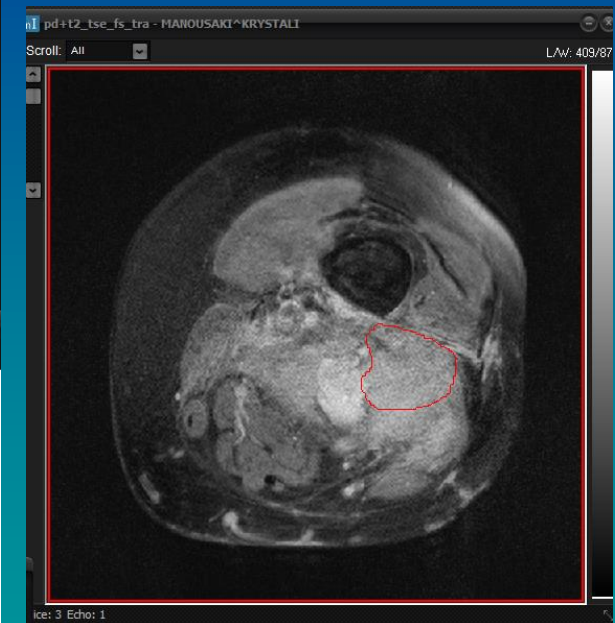
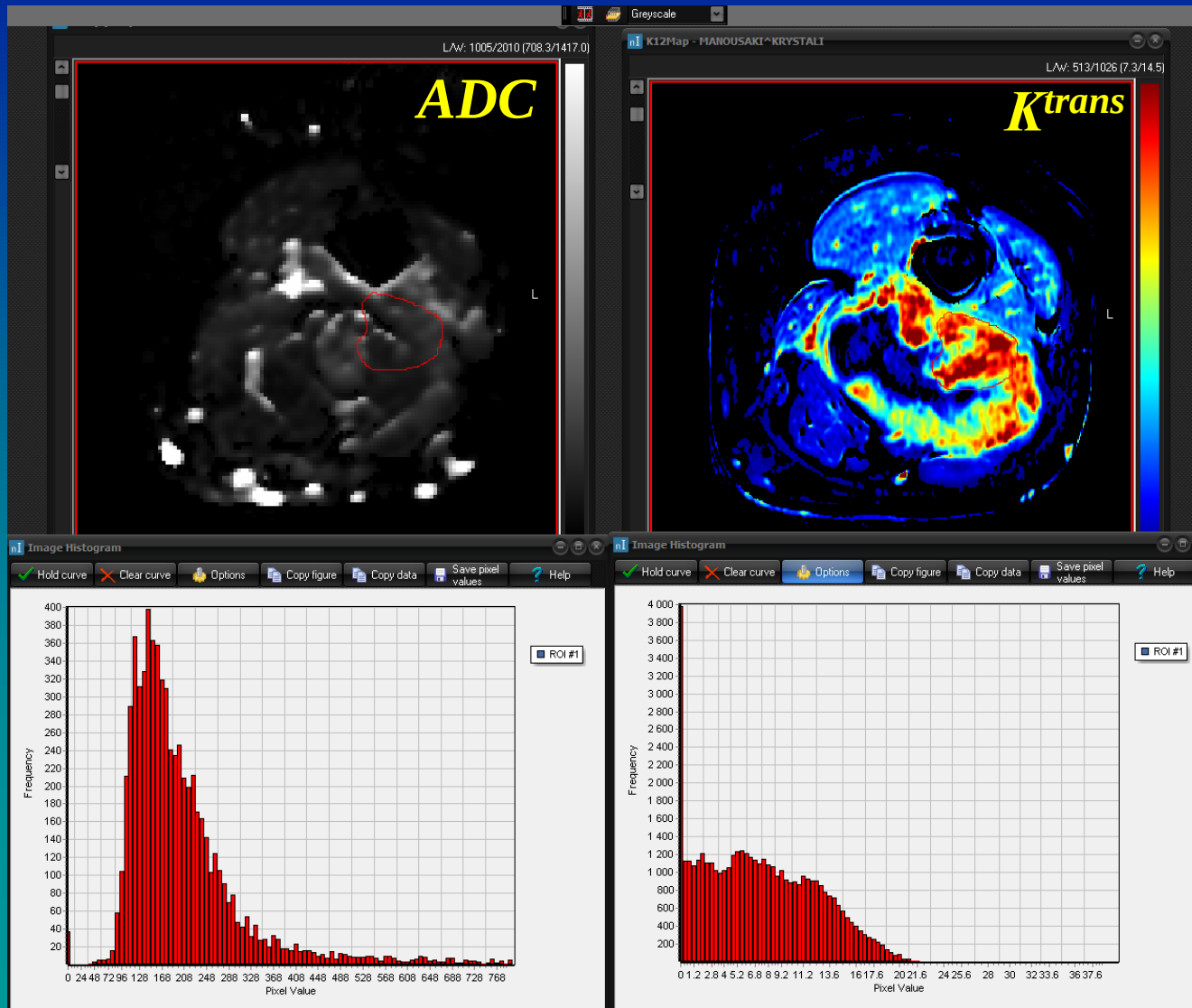
Μοριακή Διάχυση, Αιματική διήθηση

Μυξοειδές Λιποσάρκωμα



Μοριακή Διάχυση, Αιματική διήθηση

Αποδιαφοροποιημένο Λιποσάρκωμα



Νέες τεχνικές απεικόνισης ΜΣΚ στην ΑΜΣ

- ✓ Εισαγωγή στην ΑΜΣ
- ✓ Μετρητική της μαγνητικής αποκατάστασης
 - ✓ Μετρητική της μοριακής διάχυσης
 - ✓ Μετρητική της αιματικής διήθησης
 - ✓ Φασματοσκοπία

In Vivo Φασματοσκοπία (^1H) ΜΣ

✓ Η χολ

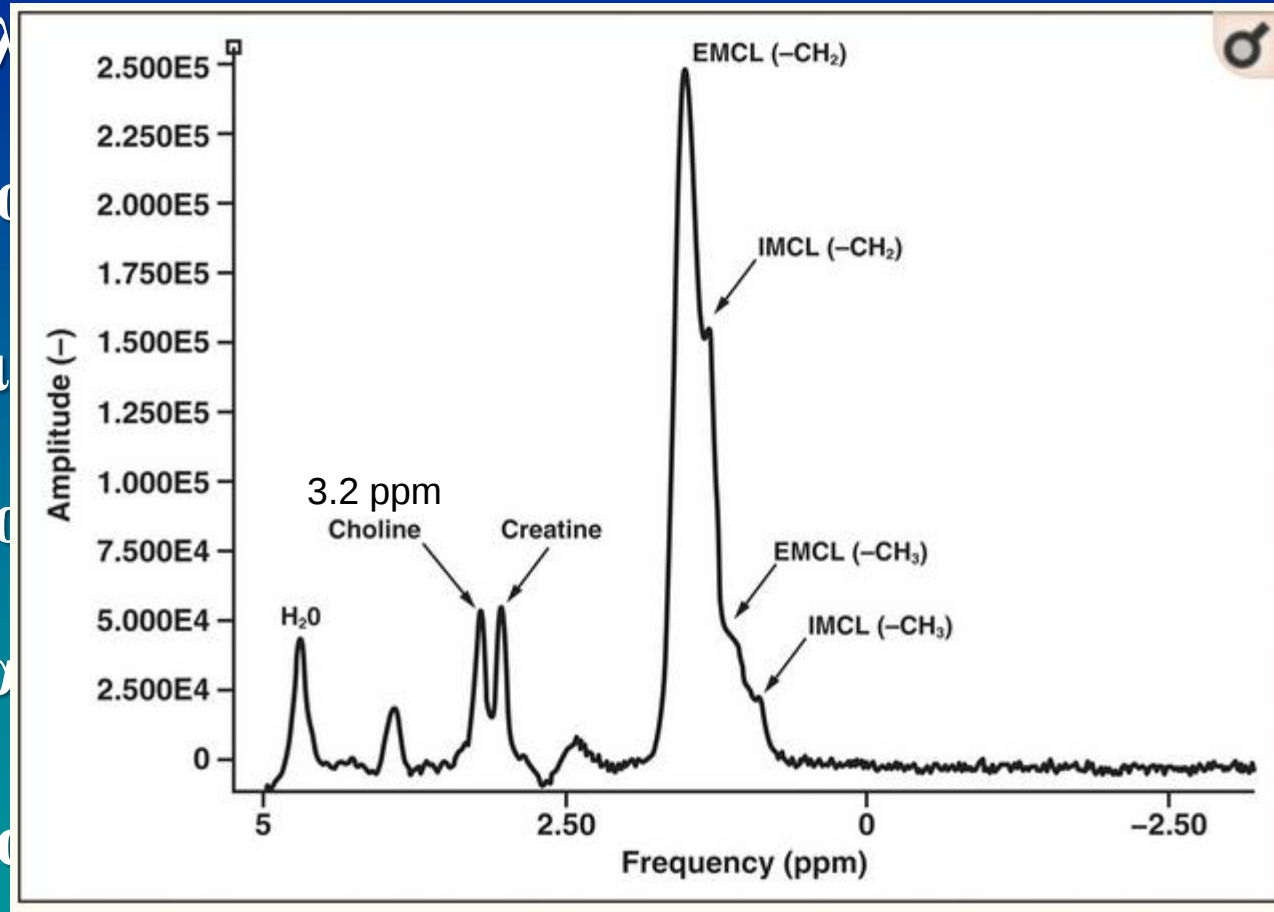
ανάπλα

✓ Αυξημ

18/19

νεοπλα

✓ In vivo



ρυθμού

ήθεια)

ηκε σε

λοήθεις

α 95%,

ειδικότητα 82%, ακρίβεια 89% ($P < .001$)

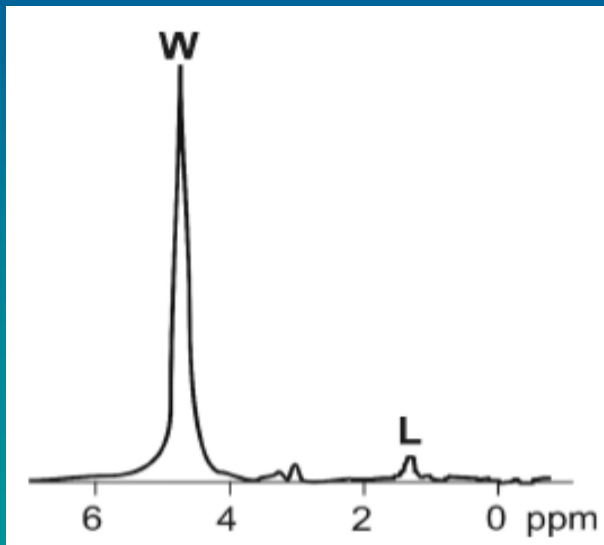
Wang, Radiology 2004

Πανεπιστήμιο Κρήτης

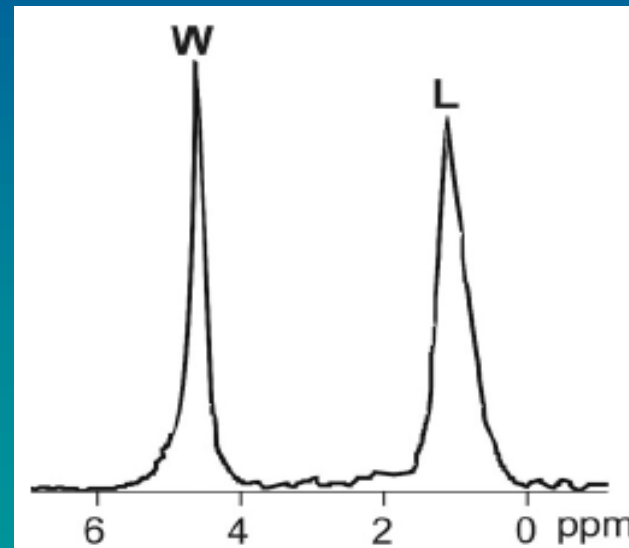
In Vivo Φασματοσκοπία (^1H) ΜΣ

- ✓ Με την χρήση της φασματοσκοπίας (^1H) ΜΣ γίνεται ποσοτικοποίηση της συγκέντρωσης των λιπιδίων στους μύες του στροφικού πετάλου για την εκτίμηση λιπώδους εκφύλισης

Pfirschmann, Radiology 04



Ασυμπτωματικός μύς



Ολική ρήξη υπερακάνθιου

In Vivo Φασματοσκοπία (^1H) ΜΣ (Οστεοπόρωση)

- ✓ Το ποσοστό του λίπους στον Οστικό Μυελό (OM) είναι σημαντικά αυξημένο στην οστεοπόρωση (65.5%) και την οστεοπενία (63.5%) σε σχέση με τις φυσιολογικές τιμές ηλικιωμένου (56.3%) και νέου (29%) πληθυσμού υγιών μαρτύρων
- ✓ Με την αύξηση του λίπους στον OM, αυξάνεται επιλεκτικά η συγκέντρωση των κορεσμένων λιπιδίων σε σχέση με τα ακόρεστα λιπίδια
 - *Yeung, JMRI 05*

Τελικά συμπεράσματα

- ✓ Η ΑΜΣ είναι σήμερα η εξέταση εκλογής στην απεικόνιση της μορφολογίας και της φυσιολογίας του ΜΣΚ συστήματος
- ✓ Προαπαιτούμενα : Ισχυρά βαθμιδωτά πηνία (Gradients), Ειδικό λογισμικό, Εξειδικευμένα πηνία
- ✓ Η μετρητική των ΧΜΑ, Η απεικόνιση της μοριακής διάχυσης, η απεικόνιση της αιματικής διήθησης και η φασματοσκοπία αποτελούν σήμερα ισχυρά κλινικά και ερευνητικά εργαλεία σε πολλές κλινικές παθολογίες του ΜΣΚ συστήματος

Νέες τεχνικές απεικόνισης ΜΣΚ στην ΑΜΣ

