الفصل الثالث

تباين الصورة
Image Contrast

ما الذي يؤثر في تباين صورة الرنين المغناطيسي وكيف نؤثر فيها ؟

بعد شرح معنى الإثارة والتراخي، يمكننا الآن الإجابة على هذا السؤال. ثلاث خواص ضمنية في أي نسيج حيوي تشارك في كثافة إشارته أو شدة إضاءته في صورة الرنين المغناطيسي، ومن ثم على تباين الصورة:

- كثافة البروتونات، بمعنى عدد المغازل القابلة للإثارة في وحدة الحجم والتي تحدد الإشارة القصوى التي يمكن الحصول عليها من أي نسيج. كثافة البروتون يمكن زيادتها أو التأكيد عليها عن طريق تقليص أو خفض معاملين الزمن الأول T1 والزمن الثاني T2. مثل هذه الصور تسمى الصور المحددة بكثافة البروتون أو ببساطة صور كثافة البروتون.

- الزمن الأول T1 للنسيج هو الزمن اللازم للمغزل المثار ليعود أو يستقر ويصبح متاحاً لإثارة تالية. الزمن الأول T1 يؤثر على شدة الإشارة بطريقة غير مباشرة ويمكن تغييره بطريقة عشوائية. الصور التي يحدد تباينها بالزمن الأول T1 أساساً تسمى صورا موزونة أو محددة بالزمن الأول T1 أو (T1W).

- الزمن الثاني T2 يحدد في الغالب سرعة تلاشي إشارة الرنين المغناطيسي MR بعد الإثارة. تباين صور الرنين المغناطيسي MR من الزمن الثاني T2 يمكن التحكم فيه عن طريق المشغل أيضاً. الصور التي يتحدد تباينها عن طريق الزمن الثاني T2 تسمى صوراً موزونة أو محددة بالزمن الثاني T2 أو (T2W).

كثافة البروتون والزمن الأول T1 و الزمن الثاني T2 هي من الخواص الضمنية لأي نسيج حيوي ويمكن أن تتغير بصورة كبيرة من نسيج لآخر. اعتماداً على أي من هذه المعاملات والذي سيتم التأكيد عليه في تتابع الرنين المغناطيسي MR، فإن الصور الناتجة ستختلف في تباينها من نسيج لآخر. إن هذا سيكون أساساً للتحديد الرائع للأنسجة الناعمة والقدرة التشخيصية لصور الرنين المغناطيسي MR : اعتماداً على الفروق النوعية بدلالة هذه المعاملات الثلاث، فإن الأنسجة التي نتخيل صعوبة تباينها في صور المسح بالـ CT يمكن تفريقها أو تميزها في صور الرنين المغناطيسي MRI بدون استخدام وسط تباين.

(١ ,٣) زمن التكرار TR والوزن الأول T1

Repetition Time (TR) and T1 Weighting

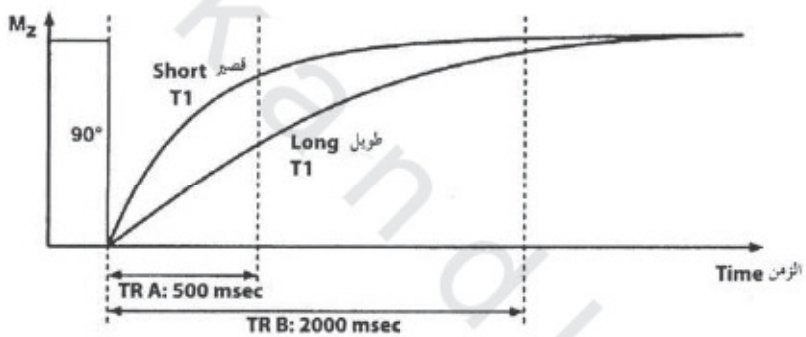
لكي نحصل على صورة الرنين المغناطيسي MRI، يجب إثارة شريحة وتسجيل الإشارة الناتجة عدة مرات. لماذا يتم ذلك، سيتم شرحه في الفصل الرابع.

زمن التكرار Repetition time (TR) هو الفترة الزمنية بين إثارتين متتاليتين لنفس الشريحة.

زمن التكرار TR هو طول فترة التراخي بين نبضتي إثارة ولذلك فإنه أساسي بالنسبة لتباين الزمن الأول T1. حينما يكون زمن التكرار TR طويلا، فإن مغازل أكثر ستدور مرة ثانية في المستوى z وستشارك في إنماء أو زيادة المغنطة الطولية. زيادة المغنطة الطولية التي يمكن إثارتها بنبضة تردد الراديو RF التالية، ستعطى إشارة رنين مغناطيسي MR يمكن تجميعها بصورة أكبر.

إذا تم اختيار زمن تكرار قليل (أقل من ٦٠٠ ملي ثانية) ، فإن تباين الصورة سيتأثر بقوة بالزمن الأول T1 (القيمة TRA في الشكل رقم ٩). تحت هذا الشرط فإن الأنسجة التي لها الزمن الأول T1 أقصر ستتراخى أسرع وتعطى إشارة أكبر عقب نبضة تردد

الراديو RF التالية (ومن ثم ستظهر مضيئة على الصورة). وعلى الجانب الآخر فإن الأنسجة التي لها الزمن الأول الزمن الأول T1 طويلة ستمر بتراخي أقل بين نبضتي تردد الراديو RF وبذلك وجود مغنطة طولية أقل عند تطبيق نبضة الإثارة التالية. لذلك فإن هذه الأنسجة ستشع إشارة أقل من الأنسجة التي لها الزمن الأول T1 أقل وستظهر بصورة أكثر إظلاما (أغمق). الصورة التي يتم الحصول عليها بزمن تكرار TR أقصر تكون موزونة بالزمن الأول T1 لأنها تحتوي غالباً على معلومات الزمن الأول T1.



الشكل رقم (٩). العلاقة بين تباين زمن التكرار **TR** والزمن الأول **T1**. عندما يكون زمن التكرار **TR** قصيراً (**A**)، فإن أي نسيج له الزمن الأول **T1** قصير سيأخذ معظم المغنطة الولية في أثناء فترة زمن التكرار **TR** وعلى ذلك سيعطى إشارة رنين مغناطيسي **MR** أكبر بعد الإثارة بالنبضة التالية، بينما النسيج الذي له الزمن الأول **T1** طويل سيعطى إشارة أصغر. عندما يكون زمن التكرار **TR** طويلاً (**B**)، فإن فروق الإشارة لا تظهر نتيجة وجود زمن كافي لزيادة المغنطة الطولية في النسيجين.

obeikandl.com

إذا تم اختيار زمن تكرار طويل نسبياً (تقريباً أكبر من ١٥٠٠ ملي ثانية)، فإن كل الأنسجة بما فيها الأنسجة التي لها الزمن الأول T1 أطول سيكون لديها زمن كافي لتعود إلى الاتزان ولذلك فإن كلها تعطى إشارات متشابهة (TRB في الشكل رقم ٩). نتيجة لذلك سيكون هناك وزن أقل للزمن الأول T1 لأن تأثير الزمن الأول T1 على تباين صورة يكون صغيراً.

لذلك، عن طريق اختيار زمن التكرار، يمكننا التحكم في درجة وزن الزمن الأول T1 في الصورة الرنين المغناطيسي MR الناتجة.

زمن التكرار TR قصير ← وزن قوي T1

زمن التكرار TR طويل ← وزن قليل T1

العلاقة بين إشارة الرنين المغناطيسي MR لنسيج معين وظهوره على صور موزونة بالزمن الأول T1 تكون كما يلي:

الأنسجة ذات الزمن الأول T1 القصير تظهر أكثر إضاءة لأنها تكتسب معظم المغنطة الطولية أثناء فترة زمن التكرار TR ولذلك فإنها تنتج إشارة MR قوية.

الأنسجة ذات الزمن الأول T1 الطويل تظهر مظلمة (غامقة) لأنها لا تكتسب معظم المغنطة الطولية أثناء فترة زمن التكرار TR ولذلك فإنها تنتج إشارة الرنين المغناطيسي MR ضعيفة.

(٢ , ٣) زمن الصدى TE والوزن الثاني T2

Echo Time (TE) and T2 Weighting

على أي حال، ما هو الصدى ؟

سنرى في الفصل الرابع أن انحدارات مختلفة يجب تطبيقها للحصول على صورة الرنين المغناطيسي MR. في الوضع الحالي يكفي أن نعرف أن هذه الانحدارات

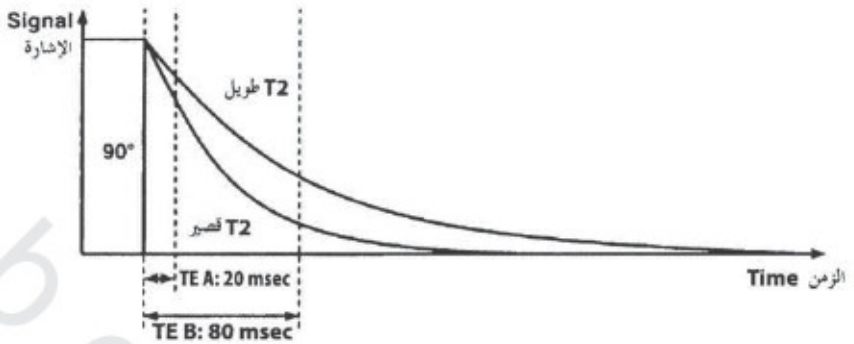
ستسبب عدم تجانس في المجال المغناطيسي ويمكن التحكم فيه وسنحتاجه لوضع نقطة الأصل لصورة الرنين المغناطيسي MR. كما أن الانحدارات ستشارك في إعادة طور المغازل. هذه التأثيرات يجب عكسها عن طريق تطبيق نبضة بؤرية قبل الحصول على إشارة رنين مغناطيسي MR معقولة. الإشارة التي يتم تطبيقها على ملف الاستقبال بعد حدوث التوافق في الطور يطلق عليها صدى المغزل ومن الممكن قياسها.

زمن الصدى TE هو الفترة الزمنية بين تطبيق نبضة الإثارة وتجميع إشارة الرنين المغناطيسي MR.

زمن الصدى يحدد تأثير الزمن الثاني T2 على تباين الصورة. يقع الزمن الثاني T2 في مدى عدة مئات من الملي ثانية ولذلك فهو أقصر بكثير من الزمن الأول T1.

إذا تم استخدام زمن صدى قصير (أقل من حوالي ٣٠ ملي ثانية)، فإن فروق الإشارة بين الأنسجة المختلفة تكون أقل (TEA في الشكل رقم ١٠) لأن زمن التراخي T2 يكون في بدايته ويكون هناك تداعي ضعيف للإشارة عند زمن تجميع الصدى. وبالتالي فالصورة الناتجة يكون لها وزن قليل للزمن الثاني T2.

إذا تم استخدام زمن صدى أكبر، في مدى الزمن الثاني T2 للأنسجة (فوق حوالي ٦٠ ملي ثانية)، فإن الأنسجة تظهر بشدة إشارة مختلفة في صورة الرنين المغناطيسي MR الناتجة (TEB في الشكل رقم ١٠): الأنسجة التي لها الزمن الثاني T2 أقصر تفقد معظم إشارتها وتظهر مظلمة في الصورة، بينما الأنسجة التي لها الزمن الثاني T2 أطول تنتج إشارات أقوى ولذلك تظهر أكثر إضاءة. وهذا يفسر سبب ظهور السوائل الدماغية التي لها الزمن الثاني T2 أطول (مثل الماء) بصورة أكثر إضاءة في الصورة الموزونة بالزمن الثاني T2 بالمقارنة بأنسجة المخ.



الشكل رقم (١٠). العلاقة بين زمن الصدى **TE** وتباين الزمن الثاني **T2**. عندما يكون زمن الصدى **TE** قصيراً جداً (**A**)، لن يكون هناك فرق تقريبا في الإشارة بين نسيجين بأزمنة T2 مختلفة، بينما ستكون هناك فروق واضحة عندما سيكون زمن الصدى **TE** أطول (**B**): النسيج الذي له الزمن الثاني **T2** أقصر يفقد الإشارة أسرع ويصبح مظلماً بينما النسيج الذي له الزمن الثاني **T2** أطول يكتسب إشارة أكثر إضاءة لفترة زمنية أطول.

عن طريق اختيار زمن صدى TE، فإن المشغل يمكنه التحكم في درجة وزن T2 في صورة الرنين المغناطيسي MR الناتجة.

زمن الصدى TE أقصر ← وزن T2 ضعيف

زمن الصدى TE أطول ← وزن T2 قوي

الشكل رقم (١٠) يبين أيضاً العلاقة بين قيم الزمن الثاني T2 للأنسجة وكيفية ظهورها على الصور الموزونة بالزمن الثاني T2.

الأنسجة التي لها الزمن الثاني T2 أقصر تظهر مظلمة أو غامقة على الصور الموزونة بالزمن الثاني T2، والأنسجة التي لها الزمن الثاني T2 أطول تظهر بصورة أكثر إضاءة على الصور الموزونة بالزمن الثاني T2.

obeikandl.com

العلاقة بين زمن التكرار TR وزمن الصدى TE وتباين الصورة الناتجة تم تلخيصها في الجدول رقم (١). الجدول رقم (٢) يبين قائمة بشدة الإشارة لأنسجة مختلفة في الصور الموزونة بالزمن الأول T1 و بالزمن الثاني T2. الجدول رقم (٣) يعطي نظرة شاملة لمعاملات التباين الضمنية لبعض الأنسجة المختارة.

الجدول رقم (١). تباين الصورة كدالة في زمن التكرار TR والزمن الثاني T2.

	زمن التكرار TR	زمن الصدى TE
الوزن بالزمن الأول T1	قصير	قصير
الوزن بالزمن الثاني T2	طويل	طويل
الوزن بكثافة البروتون	طويل	قصير

الجدول رقم (٢). شدة الإشارة لأنسجة مختلفة للصور الموزونة بالزمن الأول T1 والزمن الثاني T2.

النسيج	الصور الموزونة بالزمن الأول T1	الصور الموزونة بالزمن الثاني T2
الدهون	مضيء	مضيء
سائل مائى	مظلم	مضيء
ورم	مظلم	مضيء
نسيج ملتهب	مظلم	مضيء
عضلة	مظلم	مظلم
أنسجة موصلة	مظلم	مظلم
هيماتوما حادة	مظلم	مظلم

النسيج	الصور الموزونة بالزمن الأول T1	الصور الموزونة بالزمن الثاني T2
هيماتوما غير حادة	مضيء	مضيء
دم متدفق	لا توجد إشارة نتيجة التأثير الأظلامي للدم (المقطع ٢, ٧)	
غضروف ليفي	مظلم	مظلم
غضروف زجاجي	مضيء	مضيء
عظام مدمجة	مظلم	مظلم
هواء	لا توجد إشارة	لا توجد إشارة

الجدول رقم (٣). كثافات البروتون النسبية (٪) والأزمنة الضمنية T1 و T2 بالملي ثانية للأنسجة المختلفة.

النسيج	كثافة البروتون	T1(1.5T)	T2(1.5T)
CSF	100	> 4000	> 2000
المادة البيضاء White matter	70	780	90
المادة الرمادية Gray matter	85	920	100
أورام الأغشية السحائية Meningioma	90	400	80
النمو السرطاني Metastasis	85	1800	85
الدهون Fat	100	260	80

يمكن الحصول على تتابع صدى مغزلي SE مثالي موزون بالزمن الأول T1 باستخدام TR/TE تساوي ١٣/ ٣٤٠ ملي ثانية. يمكن الحصول على صورة رنين مغناطيسي MR بصدى مغزلي سريع وموزونة بالزمن T2 باستخدام TR/TE تساوي ١٢٠/ ٣٥٠٠ ملي ثانية. صور الرنين المغناطيسي MR التي تربط بين تأثيرات بالزمن الأول T1 و الزمن الثاني

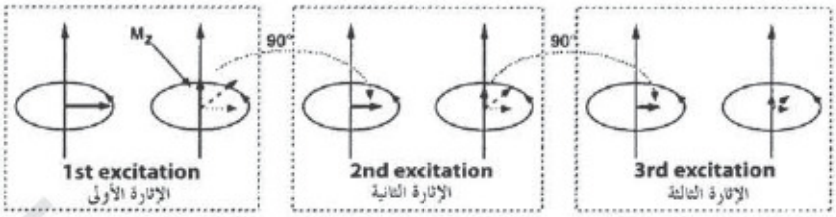
T2 تسمى بالصور الموزونة بكثافة البروتونات (PD images). الصور الموزونة بكثافة البروتونات PD التي لها زمن صدى TE حوالي ٤٠ ملي ثانية ينظر إليها أيضا على أنها صور متوسطة الوزن. حقيقة مهمة هي أن الصور الموزونة بكثافة البروتونات PD تكون نسبة الإشارة للضوضاء فيها أعلى (الفصل الخامس) من نظيرتها الموزونة بالزمن الأول T1 والزمن الثاني T2 لأن طول زمن التكرار TR يسمح باستعادة أو استعراض المغنطة الطولية بينما قصر زمن الصدى TE يقلل الإشارة نتيجة التداعي في المغنطة العكسية.

القيم المثالية للمعاملات للحصول على صور موزونة بكثافة البروتونات PD هي كمثال TR/TE تساوي ١٥/٢٠٠٠ ملي ثانية لصور كثافة البروتونات PD الموزونة بتتابع الصدى المغزلي SE و TR/TE تساوي ٤٠/٤٤٠٠ ملي ثانية للصور الموزونة بكثافة البروتونات PD الموزونة بتتابع الصدى المغزلي السريع FSE. تتابعات الصور الموزونة بكثافة البروتونات PD تكون مفيدة خاصة لتقييم الهياكل ذات الإشارات الضعيفة الشدة مثل العظام أو هياكل الأنسجة المتصلة مثل الأربطة والأوتار. الوزن بكثافة البروتونات يستخدم عادة للصور ذات التباين العالي. تتابعات الصدى المغزلي SE تفضل على تتابعات الصدى المغزلي السريع FSE للصور الموزونة بكثافة البروتونات PD لأن صور الصدى المغزلي SE تكون أقل عرضة للتشويه. في العيادات، تستخدم عادة تتابعات الصورة الموزونة بكثافة البروتونات PD لتصوير المخ، والعمود الفقري والجهاز العضلي الهيكلي.

(٣,٣) التشبع عند أزمنة التكرار القصيرة

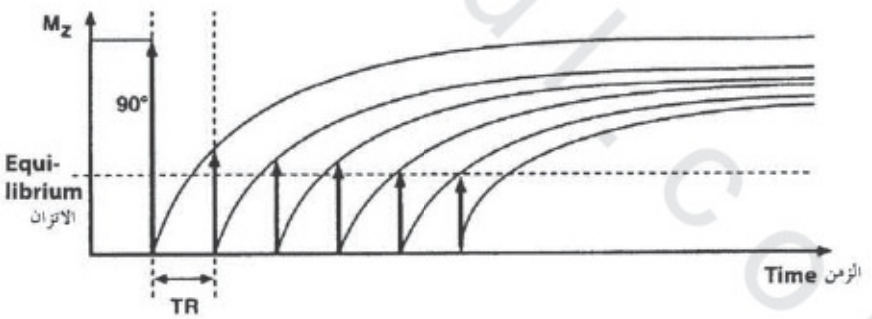
Saturation at Short Repetition Times

لقد ذكرنا في الجزء الخاص بزمن التكرار بأن هناك زمناً قليلاً لإعادة نمو المغنطة الطولية عندما يكون زمن التكرار TR قليلاً. كلما كان زمن التكرار TR قليلاً، كلما كانت مركبة المغنطة الطولية المتاحة للإثارة التالية أصغر، ومن ثم تقل إشارة الرنين المغناطيسي MR كذلك. عند تطبيق تتابع من نبضات الإثارة، فإن إشارة الرنين المغناطيسي MR تصبح أضعف وأضعف بعد كل نبضة تكرار. هذه العملية تسمى بالتشبع (الشكل رقم ١١).



الشكل رقم (١١). آلية التشبع، المغنطة الطولية M_z التي ستسترد في الفترة الزمنية والتي ستكون متاحة للإثارة التالية تتناقص بعد كل نبضة راديو RF. في المثال الموضح، يكون زمن التكرار TR قصيراً جداً بحيث أن كمية أقل قليلاً من نصف المغنطة الطولية الأصلية يمكنها أن تنمو قبل بداية نبضة الإثارة التالية.

التشبع يكون موضوعاً مهماً عند استخدام تقنيات الرنين المغناطيسي MR سريعة أو فوق السريعة. هنا تكون إشارة الرنين المغناطيسي MR ضعيفة جداً نتيجة زمن التكرار القصير جداً (الشكل رقم ١٢). سنعود لهذه الظاهرة عندما نشرح تتابعات الصدى الانحداري.



الشكل رقم (١٢). المغنطة الطولية عند زمن تكرار قصير. بعد تكرار الإثارة على فترات زمنية قصيرة جداً، فإن كمية المغنطة الطولية M_z المستعادة بعد كل نبضة تستقر عند مستوى قليل (حالة استقرار أو اتزان). في هذا الموقف، فإن كل إشارة الرنين المغناطيسي MR تتكون بعد كل نبضة إثارة ضعيفة جداً.

(٣ , ٤) زاوية الانقلاب (زاوية المقدمة) Flip Angle (Tip Angle)

إن التصوير بزاوية الانقلاب الجزئي هو تقنية يمكن استخدامها لتقليل التشبع والحصول على إشارة رنين مغناطيسي MR مناسبة على الرغم من قصر زمن التكرار. زاوية الانقلاب الصغيرة لا تحدث انحرافاً كلياً للمغنطة حتى ٩٠ درجة ولكن جزء من الـ ٩٠ درجة (مثلاً ٣٠ درجة). كنتيجة لذلك يكون هناك مغنطة عرضية أقل والإشارات المفردة ستكون أقل بينما سيكون هناك مغنطة طولية أكثر متاحة للإثارة التالية حتى لو كان زمن التكرار TR قصيراً جداً. وعلى ذلك فإن الإشارة الكلية ستكون أكبر من التي يمكن الحصول عليها مع زاوية انقلاب ٩٠ درجة. وعلى العموم، فكلما كان زمن التكرار TR قصيراً، فإن زاوية الانقلاب المطلوبة لمنع التشبع تكون أقل. زاوية الانقلاب التي تعظم الإشارة لأي زمن تكرار TR و زمن صدى TE تعرف بأنها زاوية إرنست Ernst angle.

(٣ , ٥) التشبع المسبق Presaturation

هناك اختيار آخر متاح لتعديل تباين الصورة وهو التشبع المسبق. هذه التقنية تستخدم نبضة عاكسة ابتدائية طورها ٩٠ أو ١٨٠ درجة يتم تطبيقها قبل الحصول على بيانات الصورة. يمكن ربط أو دمج نبضة التشبع المسبق مع كل نبضات التتابع الأساسية (SE, FSE, GRE, and EPI). ولكن ما هي فائدة هذه التقنية ؟

نبضات صدى الانحدار السريعة تكون في العادة محدودة بالتباين الضعيف للصورة لأن أزمنة التكرار القصيرة تؤدي إلى تشبع متجانس للأنسجة المختلفة. كما رأينا سابقاً، فإن الصور الناتجة تكون موزونة بالزمن الأول T1 ولكن ليست بهذه القوة. يمكن الحصول على وزن أقوى للزمن الأول T1 عن طريق اختيار زاوية انقلاب أكبر ولكن

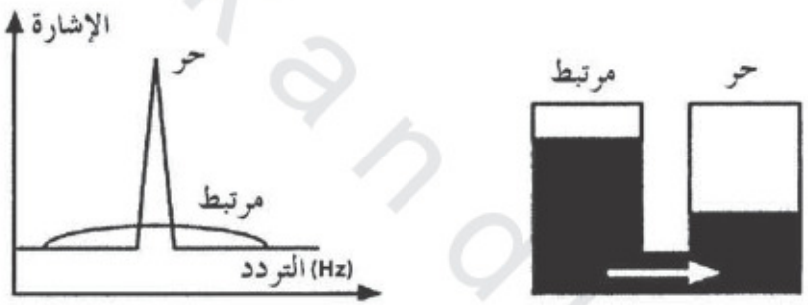
إشارة الرنين المغناطيسي MR الناتجة من الممكن أن تكون ضعيفة جداً للحصول على جودة مقبولة للصورة لأن التشبع من الممكن أن يزيد كذلك.

إن هذا يوضح لماذا تم استخدام التشبع المسبق لتحسين تباين الزمن الأول T1. يمكن الحصول على تأثير أكثر فعالية للزمن الأول T1 باستخدام نبضة عاكسة ١٨٠ درجة، أفضل من النبضة ٩٠ درجة لأن النبضة ١٨٠ درجة تعكس كل المغنطة الطولية. كنتيجة لذلك فإن تراخي T1 يبدأ عند 1- بدلاً من 0 وبذلك يتاح ضعف الكمية من المغنطة الطولية. بالإضافة لذلك، فإن المشغل يمكنه تعديل تأثير الزمن الأول T1 عن طريق تغيير الفترة الزمنية بين النبضات العاكسة ١٨٠ درجة ونبضة الإثارة (= زمن العكس، T1). الزمن الأول T1 يمكن اختياره بحيث إن مشاركة الإشارة من نسيج معين يمكن القضاء عليها عن طريق تطبيق نبضة الإثارة عندما يكون النسيج خالياً من المغنطة. لذلك، فإن قصر T1 سيخمد الإشارة من الدهون (المقطع ٥ ,٧) وطول الزمن الأول T1 للإشارة من CSF (تتابع FLAIR، المقطع ٦ ,٧). وتطبيق عملي آخر لاستخدام التشبع المسبق وهو تحسين التصوير المتأخر في مرضى الذبحة القلبية (المقطع ٨ ,١١).

(٦ ,٣) نقل المغنطة Magnetization Transfer

بدون التصريح بذلك، فإنه فيما سبق كنا نقصد البروتونات الحرة (البروتونات في الماء الحر) عندما كنا نتكلم عن البروتونات لأن هذه فقط هي التي تشارك في إشارة الرنين المغناطيسي MR. بالإضافة إلى بروتونات الماء، فإن الأنسجة الحية تحتوي أيضاً تجمعات معينة من البروتونات المرتبطة والتي تكون جزيئات ضخمة (أو ماكروية) macromolecules (في العادة بروتينات). هذه البروتونات لا يمكن إظهارها مباشرة نتيجة أن الزمن الأول T1 لها قصير جداً. إن مدى ترددات لارمور لها أوسع من ترددات بروتونات الماء. وهذا هو السبب في أن البروتونات الجزيئية الضخمة يمكن أيضا إثارتها بنبضات راديو RF لها

ترددات تختلف قليلاً من ترددات لارمور لبروتونات الهيدروجين. لذلك، فمن الممكن أن نختار إثارة الأنسجة التي لها تجمعات كبيرة من البروتونات الجزيئية الضخمة بدون التأثير المباشر على البروتونات في الماء الحر. التطبيق المتكرر لنبضات نقل المغنطة يشبع المغنطة في البروتونات الجزيئية الضخمة حيث تم نقلها إلى البروتونات الحرة القريبة. هذه العملية تكون مصحوبة بنقص في الإشارة التي يعتمد مقدارها على تركيز الجزيئات الضخمة ومدى تفاعلها مع الماء الحر والذي يعرف بنقل المغنطة (الشكل رقم ١٣). النقص في شدة الإشارة بسبب النقل المغناطيسي يكون كبيراً في الأنسجة الصلبة وصغيراً فقط في السوائل (طالما أن محتوياتها من الجزيئات الضخمة يكون قليلاً) والأنسجة الدهنية.



الشكل رقم (١٣).

لقد تم استغلال ظاهرة نقل المغنطة لتحسين تباين الصورة باستخدام تقنية معروفة بالتصوير بنقل المغنطة. تباين نقل المغنطة (MTC) يستخدم في التصوير الغضروفي حيث يستخدم لتحسين التباين بين السوائل الزلالية synovial fluids والغضاريف لأن هذه السوائل تحتوي على القليل من البرتونات المرتبطة ولذلك فإنها تُظهر نقل مغنطة قليل بينما الغضاريف تحتوي جزء أكبر من البروتونات المرتبطة ولذلك تظهر كمية أكبر من المغنطة المنقولة. في المخ، نجد أن تقنية نقل المغنطة MTC تحسن اكتشاف جروح تعزيز الجادولينيوم gadolinium.

References المراجع

1- Nessaiver M (1996) All you really need to know about MR imaging physics. University of Maryland Press, Baltimore

2- Duerk JL (1997) Relaxation and contrast in MR imaging. In: Riederer SJ, Wood ML (eds) Categorical course in physics: the basic physics of MR imaging. RSNA Publications no 19, Oak Brook

3- Elster AD, Burdette JH (2001) Questions and answers in magnetic resonance imaging, 2nd edn. Mosby, St. Louis

obeikandl.com