جودة صورة جهاز الرنين المغناطيسي اعتماداً على عزوم البروتونات

* أ.د حسن المقدم

** نبيل رومية

الملخص:

التصوير بالرنين المغناطيسي **Magnetic Resonance Imaging** ويختصر بالرمز **MRI** هو أحدى تقنيات التصوير الطبي التي لا تستخدم الأشعة السينية أو أي نوع آخر من الأشعة الضارة. ويتم ذلك بالاعتماد على دراسة الخواص المغناطيسية الموجودة أصلاً في جسم الإنسان بشكل طبيعي، ويعتبر أفضل طريقة لرؤية ما بداخل الجسم البشري وحيث له قدرة على التصوير بدقة عالية جداً وبشكل آمن بعيداً عن الإشعاعات المؤينة ومع الوقت ازداد الاهتمام بالتطبيقات اللامتناهية للرنين المغناطيسي خاصة في مجالات تصوير الدماغ، ويعتبرالرنين المغناطيسي مثال حي على القدرة الهائلة للعقل البشري في إدراك الظواهر الطبيعية وتطويعها والتحكم بها وتقويتها وتحسينها للوصول إلى نتائج يتم الإستفادة منها بأقصى حد في تحسين حياة البشر

الكلمات المفتاحية:

الرنين المغناطيسي – العزوم المغناطيسية – البروتونات – زمن الاسترخاء الأول – زمن الاسترخاء الثاني – المغنطة الطولية – المغنطة العرضية

* أ.د حسن المقدم : استاذ في كلية العلوم – جامعة البعث

** نبيل رومية : طالب مرحلة الدراسات العليا /دكتوراه/ كلية العلوم – اختصاص فيزياء المادة الكثيفة

MRI image quality based on the moments of protons

==========

*Prof: Hassan Al-Moukadam
** Nabeel Roumia

Abstract

Magnetic Resonance Imaging (MRI) is a medical imaging technique that does not use x-rays or any other type of harmful radiation. This is done based on the study of magnetic properties that are naturally present in the human body, and it is considered the best way to see what is inside the human body and where it has the ability to image with very high accuracy and safely away from ionizing radiation. With time, interest in the endless applications of magnetic resonance has increased, especially in the fields of brain imaging. Magnetic resonance is a vivid example of the tremendous ability of the human mind to perceive, adapt, control, strengthen and improve natural phenomena to reach results that can be used to the fullest extent in improving human life.

Key words: Magnetic resonance - magnetic moments - protons – first relaxation time - second relaxation time - longitudinal magnetization - tangential magnetization

*Prof: Hassan Al-Moukadam: Albaath University – Faculty of Science
** Nabeel Roumia: graduate student /Ph.D/ Albaath University – Faculty of Science condensed matter physics

مقدمة:

يُعتمد على تقنية التصوير بالرنين المغناطيسي لتصوير أمراض متنوعة تشمل أورام الدماغ والجلطات والسرطانات وأمراض القلب والجهاز الهضمي بالإضافة إلى الأربطة والأوتار والمفاصل. حيث يمكننا الحصول على صور دقيقة وتفصيلية ثنائية أو ثلاثية الأبعاد. ويتميز الرنين المغناطيسي بتصوير الأنسجة الرخوة بوضوح عالي. وهو جهاز آمن ومناسب للكبار والصغار. تم إختراع جهاز الرنين المناطيسي نتيجة لتراكم المعرفة في فهم الخواص الفيزيائية والكيميائية والهندسية بدءاً من عام 1950. لكن دخوله بشكل واضح وقوي كجهاز يستخدم في تصوير الإنسان بدءاُ من عام 1977 كان حدثاً مذهلاً في عالم الطب الحديث وشكل بعد ذلك ثورة في تقنيات التصوير الطبي.[2]

ونحن نحتاج للتصوير بهذه التقنية شيئين رئيسيين بشكل مبدئي: الأول هو الحصول على مغناطيس قوي جداً وهذا هو المكون الرئيسي في جهاز الرنين المغناطيسي بالإضافة إلى جهاز آخر يرسل موجات راديوية ويستقبل الإشارة القادمة من المريض. وسيتم مناقشة هذا الأجراء في هذا البحث.

هدف البحث:

- دراسة تحسين عمل أجهزة الرنين المغناطيسي
- دور العزوم المغناطيسية للبروتونات في عمليات التصوير
- تأثير المغنطة الأفقية والمغنطة الشاقولية على صور أجهزة الرنين المغناطيسي

مشكلة البحث:

تحسين دقة ووضوح صور الرنين المغناطيسي اعتماداً على العزوم المغناطيسية للبروتونات

مواد وطرائق البحث:

استناداً على التطور الحاصل في التصوير باستخدام أجهزة الرنين المغناطيسي والاستخدام الواسع لهذه الأجهزة في دراسة الخلايا الحية وتشخيص الأمراض، فقد تمت دراسة تأثير العزوم المغناطيسية للبروتونات بهدف الحصول على الصور بدقة عالية بما يساعد في التشخيص الدقيق للحالة الصحية المدروسة وبالتالي فتح آفاق جديدة ومفيدة في التطبيقات العملية

الخصائص المغناطيسية في جسم الإنسان:

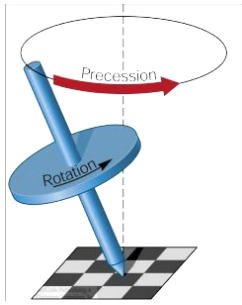
ذكرنا سابقاً أن تقنية الرنين المغناطيسي تعتمد على الخواص المغناطيسية الموجودة أصلاً في جسم الإنسان، ولكن ماهي وأين توجد الخواص المغناطيسية داخل الجسم البشري؟! الجواب هو في البروتونات الموجبة الشحنة. حيث يمكن تعزيز وتقوية هذه الخواص أكثر داخل جهاز الرنين المغناطيسي.[1]

تتواجد البروتونات في أنوية العناصر الموجودة في جسم الإنسان مثل ذرات الهيدروجين والكربون والأكسجين. ...إلخ. وبما أن جسم الإنسان يتكون من 70 بالمائة من الماء فأنه يتم اختيار بروتونات ذرة الهيدروجين لتحسين التصوير بالرنين المغناطيسي. نظراً لاعتماد إشارة الرنين المغناطيسي المستخدمة في المجال الطبي على كمية الهيدروجين الموجودة بكثرة في أغلب أنسجة الجسم ومكوناته. علماً أنه من الممكن إستخدام بروتونات ذرات أخرى كالكربون والصوديوم وهي متواجدة في جسم الإنسان إلا أنها لن تقدم صورة بجودة مقبولة على اعتبار أن الهيدروجين يتواجد في جسم الإنسان بعدد أكبر بكثير ولذلك يستخدم في الرنين المغناطيسي، ومعلوم أن جزي الماء الواحد H_2O يتكون من ذرتين هيدروجين بالإضافة إلى ذرة أكسجين.

وتجدر الإشارة إلى أنه توجد خاصيتان يمتكلهما البروتون تجعله يتصرف وكأنه مغناطيس:

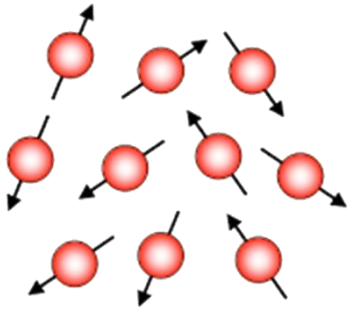
1. البروتون له شحنة موجبة
2. البروتون يتحرك حركة مغزلية تسمى السبين (اللف الذاتي)

عند وجود شحنة متحركة يتولد مجال مغناطيسي. هذا مايحدث للبروتون الموجب الشحنة عندما يتحرك بشكل مغزلي. ونحصل أيضاً على عزم المغناطيسي مرتبط بهذه الحركة الدورانية (المغزلية) للبروتون بهذا يكون سلوك البروتون الواحد وكأنه مغناطيس له قطبين شمالي وجنوبي. [2]



الشكل (1): بروتون موجب الشحنة يدور حول نفسه

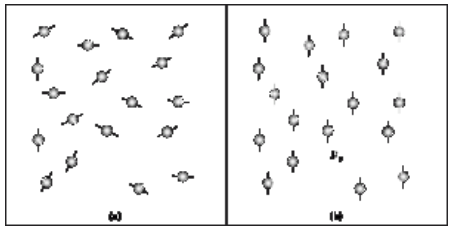
المجال المغناطيسي للبروتون محدود وصغير جداً ولكن جسم الإنسان يحتوي على العديد من بروتونات الهيدروجين خاصة أنه يتألف من 70% ماء، لكن مع ذلك لا يوجد لها أي تأثير يذكر ويعود السبب إلى أنها مبعثرة الإتجاهات في الجسم ويلغي بعضها بعضاً. يمكننا وصف ذلك بالقول أن مجموع العزم المغناطيسية للبروتونات تساوي الصفر.



الشكل (2): توجه السبينات بشكل عشوائي للبروتونات في جسم الإنسان

مما تقدم فإن البروتونات في جسم الإنسان مغانط صغيرة ولكن ليس لها أي تأثير ولا يستطاع أخذ أي إشارة للتصوير منها. لكن ماذا يحدث لهذه البروتونات المبعثرة عند خضوعها لمجال مغناطيسي خارجي $\overrightarrow{B_o}$؟

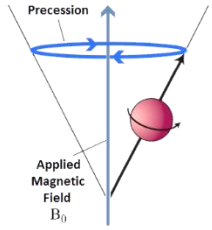
في هذه الحالة البروتونات سوف توحد اتجاهات مجالاتها المغناطيسية المتولدة المتولدة بنتيجة الحركة الدورانية (المغزلية) مع اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي، وبالتالي نحصل على متجه مغناطيسي كلي يمكن الاعتماد عليه في أخذ إشارة الرنين المغناطيسي. وسنتعرف لاحقا على كيفية أخذ الإشارة من هذا المتجه المغناطيسي.[4]



الشكل (3): تغير جهة السبينات للبروتونات عند خضوعها لحقل مغناطيسي خارجي

حركة لارمور الدورانية:

بالإضافة للحركة الدورانية للبروتونات حول المحور تتحرك أيضاً عند وضعها في مجال مغناطيسي بحركة دائرية حول خطوط المجال المغناطيسي



الشكل (4): حركة البروتون عند وضعه ضمن مجال مغناطيسي خارجي وهو يدور حول نفسه (حركة مغزلية) والدوران حول خطوط المجال المغناطيسي (حركة لارمور الدورانية)

أن سرعة حركة لارمور الدورانية للبروتون تتغير بإختلاف قوة المجال المغناطيسي، فالحركة الدورانية يزيد ترددها بزيادة شدة المجال المغناطيسي (علاقة طردية). نسمى هذا التردد بتردد لارمور. ويمكن حساب تردد هذه الحركة عند مجال مغناطيسي معين بواسطة قانون لارمور:

$$f = \gamma . B_o \qquad (1)$$

حيث: γ : هو معامل الجيرومغناطيسية

B_o: المجال المغناطيسي الخارجي المطبق

في الرنين المغناطيسي يهمنا فقط بروتونات ذرة الهيدروجين[3].

الجدول (1): قيم ثابت الجيرومغناطيسية بالنسبة لبعض العناصر

Nucleus or Particle	Gyromagnetic Ratio (γ) in MHz/Tesla
^1H	42.58
^3He	−32.43
^{13}C	10.71
^{19}F	40.05
^{23}Na	11.26
^{31}P	17.24
Electron	−27.204

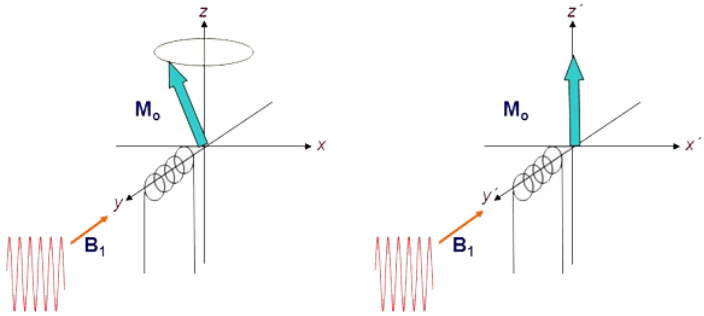
مراحل أخذ إشارة الرنين المغناطيسي؟

1- الإتزان
2- الإستثارة
3- الإسترخاء

حالة الإتزان:

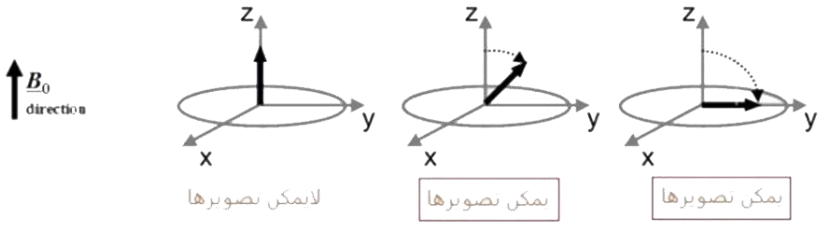
عند وضع البروتونات في مجال مغناطيسي خارجي سيكون مجموع المجالات المغناطيسية للبروتونات موازي للمجال المغناطيسي الخارجي $\overrightarrow{B_o}$ وهذا ما ندعوه بالمغنطة الطولية (Longitudinal magnetization) والتي لا يمكن أخذ أي إشارة في

هذه الحالة ولا بد لنا من استثارة البروتونات لكل تكون في اتجاه مغاير للمجال المغناطيسي الرئيسي للحصول على إشارة، كما أن البروتونات تدور حول خطوط مجالها المغناطيسي بتردد معين يعتمد على قوة المجال المغناطيسي الخارجي.[6]



الشكل (5): حالة الاتزان والمغنطة الطولية

حالة الإتزان لايمكن أخذ منها أي إشارة لأن الإشارة المغناطيسية التي نريدها تكون مطابقة لإتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. ولكي نسجل الإشارة لابد من استثارتها بحيث تبتعد عن إتجاه المجال الرئيسي[5].

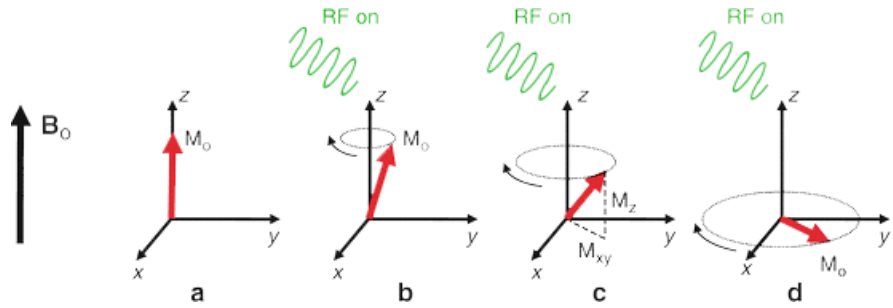


الشكل (6): توجه السبينات للبروتونات وإمكانية التقاط الصور باستخدام الرنين المغناطيسي

الاستثارة:

من خلال استخدام الموجات الراديوية (RF) وهي عبارة عن طاقة يتم إعطائها لهذه البروتونات بحيث تكون قادرة على تغيير إتجاه مجالها المغناطيسي المحصل من المغنطة الطولية إلى المغنطة العرضية

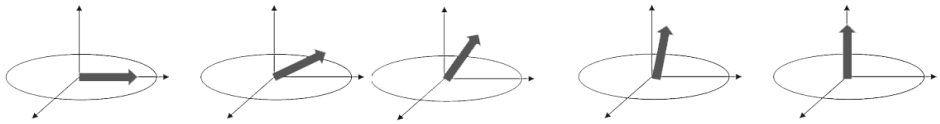
موجات الراديو يتم إرسالها بتردد محدد بحيث تستثير البروتونات التي تمتلك نفس التردد فقط في ظاهرة تسمى بالرنين .Resonance البروتونات التي ليس لها نفس تردد موجات الراديو لا يحدث لها أي إستثارة. بهذا يمكننا إستثارة البروتونات المرغوبة وذلك بمعرفة ترددها. حيث يمكن حساب تردد البروتونات بواسطة قانون لارمور ومن ثم إرسال موجات راديوية ترددها مساوي لترددها (البروتونات) لكي يتم إستثارتها[7].



الشكل (7): الانتقال من المغنطة الطولية إلى المغنطة العرضية بتأثير الأمواج الراديوية

الإسترخاء (Longitudinal relaxation):

في هذه المرحلة نحصل على إشارة الرنين المغناطيسي .حيث يتم الإسترخاء بعد إيقاف الموجات الراديوية وذلك بعودة البروتونات إلى حالة الإتزان. وهنا يتم خسارة المغنطة العرضية ويظهر تأثير المغنطة الطولية. بسبب خسارة البروتونات للطاقة التي أكتسبتها من الموجات الراديوية فتعود لحالتها الطبيعية. هذه الخسارة في الطاقة هي إشارة الرنين المغناطيسي وتسمى بـ.Free Induction Decay [8]



الشكل(8): الانتقال من المغنطة الأفقية والعودة إلى المغنطة الطولية

إن الإشارة تكون قوية عند المغنطة العرضية وتقل تدريجياً حتى تنتهي مع إكتمال المغنطة الطولية، فعند المغنطة العرضية Transverse Magnetization تكون الإشارة في أعلى مستوياتها وتتلاشى تماماً عندما تعود البروتونات إلى حالة الإتزان الكامل Longitudinal Magnetization عند المغنطة الطولية

الرنين Resonance :

الرنين هو تبادل الطاقة بين الموجات الراديوية RF والبروتونات عندما يكون لهم تردد متشابه. وإذا أختلف التردد لا يتم تبادل الطاقة. ولإثارة البروتونات المتواجدة داخل جسم المريض نرسل لها موجات راديوية .RF تحدث الإستثارة فقط للبروتونات التي لديها تردد يساوي تردد موجات الراديو. وهذا يعطينا أفضلية في إختيار أي البروتونات التي نريد إستثارتها. فإذا أردنا إستثارة بروتونات معينة فعلينا أن نحسب ترددها بواسطة قانون لارمور ومن ثم نرسل لها موجات راديو مساوية لهذا التردد. تحدث الإستثارة فقط لهذه البروتونات المتوافقة. أي أن البروتونات الأخرى لن تتأثر بموجات الراديو. والجدير بالذكر أن جهاز الرنين المغناطيسي المزود ببرنامج خاص هو من يقدم هذه الحسابات وليس تقنيي الرنين المغناطيسي[10]

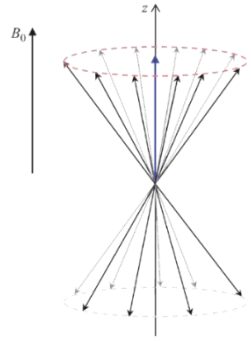
الإجراء التجريبي:

إن بروتونات الهيدروجين تكون في جسم الإنسان كمغانط صغيرة. في الوضع الطبيعي تكون إتجاهات المحصلة المغناطيسية لبروتونات الهيدروجين مبعثرة في جميع الإتجاهات مما يلغي خواصها المغناطيسية. لكن عند وضع المريض داخل جهاز الرنين

المغناطيسي تكون هذه البروتونات على إحد حالتين: إما موازية لإتجاه المجال المغناطيسي الخارجي $\overrightarrow{B_o}$ أو معاكسة له. البروتونات التي لديها طاقة منخفضة تتموضع وفق إتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. لكن البروتونات التي لديها طاقة عالية تتموضع باتجاه معاكس لإتجاه المجال المغناطيسي الخارجي وذلك لأن لديها طاقة كافية لمقاومة إتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. وفي جسم الإنسان عدد البروتونات التي لديها طاقة ضعيفة (ستصبح في إتجاه المجال المغناطيسي الخارجي) أكبر من البروتونات التي لديها طاقة عالية.[9]

لنفرض أن لدينا 12 بروتون إتجاهاتها عشوائية في جسم المريض. سبعة من هذه البروتونات لديها طاقة ضعيفة أما الخمسة الأخرى فلديها طاقة عالية. هذه البروتونات ليس لها أي تأثير في جسم الإنسان لأنها مبعثرة. عند وضعها داخل جهاز الرنين المغناطيسي فأن سبعة منها ستكون في إتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. وخمسة تكون عكس إتجاه المجال الخارجي.

خمسة من البروتونات سوف تلغي تأثير خمسة من البروتونات في الإتجاه المعاكس. يتبقى بروتونان في إتجاه المجال المغناطيسي الخارجي سوف يكون مجموع محصلاتها عبارة عن متجه مغناطيسي يكون في إتجاه المجال المغناطيسي الخارجي وهذا ما يعرف بالمغنطة الطولية.



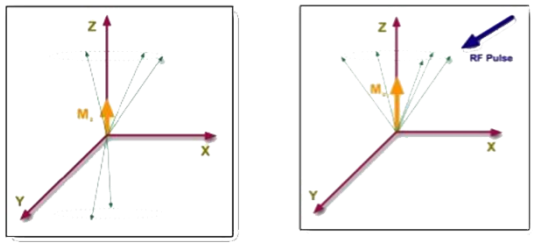
الشكل (9): محصلة العزوم للبروتونات في جسم الإنسان

يتم إرسال موجات راديوية RF فتحصل حالة الإستثارة وتنتقل المغنطة الطولية إلى المغنطة العرضية. تسمى موجات تردد الراديو بإسم (90 degree RF pulse) ذلك لأنها تجعل المغنطة الطولية تتحرك بزاوية 90 درجة لكي نحصل على المغنطة العرضية[11]

وتجدر الإشارة إلى أنه في الرنين المغناطيسي يوجد نوعان فقط من الموجات الراديوية 90 درجة أو 180 درجة. ويمكن معرفة وظيفتها من إسمها. فالأول يحرك المغنطة الطولية بزاوية 90 درجة (هذا ماسنركز عليه الآن) والآخر بزاوية 180 في الجهة المعاكسة (له إستخدامات أخرى قد اتطرق إليها لاحقاً). توجد أيضاً موجات راديوية بزوايا أكبر من 180 ولكن ليس لها أي إستخدام يستفاد منه في الرنين المغناطيسي في المجال الطبي وتستخدم في المجالات البحثية.[12]

تلاشي المغنطة الطولية وتكون المغنطة العرضية:

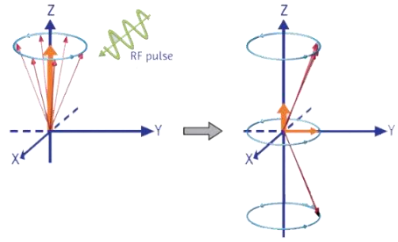
لنفرض أنه لدينا خمس بروتونات بدلاً من سبعة كما في المثال السابق في حالة الإتزان وتُكون جميعها المغنطة الطولية. ولكن طاقتها ضعيفة، لذلك هي تكون مع إتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. وعند تعرضها للأمواج الراديوية تكتسب البروتونات هذه الطاقة الإضافية بحيث إثنان منهما يصبح له طاقة كبيرة بحيث يستيطعان أن يكونوا في عكس إتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. لنلاحظ أيضاً في الصورة التي في الأسفل تراجع قوة المغنطة الطولية. فلم يعد يصنع المغنطة الطولية خمس بروتونات، بل ثلاث بروتونات فقط.[14]



الشكل (10): تغير المغنطة عند تعرض البروتونات للأمواج الراديوية

نلاحظ أن المغنطة الطولية قد تناقصت لكنها لم تزل موجودة! أيضاً المغنطة العرضية لم تنشأ بعد رغم أننا أرسلنا الموجات الراديوية، هذا يعني أن الطاقة المقدمة لم تكن كافية للحصول على المغنطة العرضية.

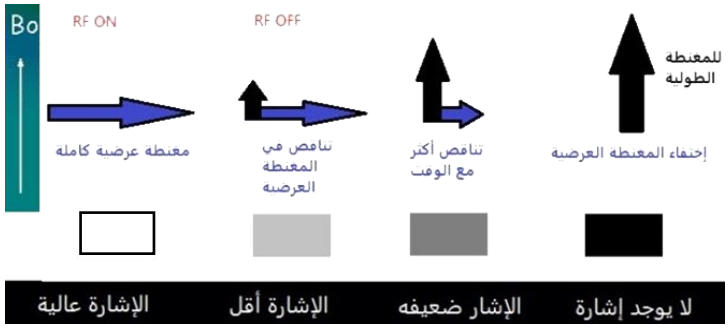
للموجات الراديوية لها تأثير آخر على البروتونات بالإضافة إلى إعطائها للطاقة. فإن التأثير الآخر هو جعل البروتونات تتحرك في نفس الطورأي تتحرك بشكل متماثل ومتناغم مع بعضها البعض. وهذا التأثير يكون على كلا البروتونات التي مع أو التي بعكس أتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. وهنا نلاحظ أنه البروتونات لم تغير اتجاه مجالاتها المغناطيسية بشكل منفرد نحو المغنطة العرضية. وإنما الذي تغير هو مجموع المحصلة المغناطيسية وبالتالي نحصل على المغنطة العرضية، وفي الرنين المغناطيسي نتعامل فقط مع المحصلة المغناطيسية لجميع المجالات المغناطيسية للبروتونات.[15]



الشكل (11): تلاشي المغنطة الطولية ونشوء المغنطة العرضية بسبب موجات الراديو

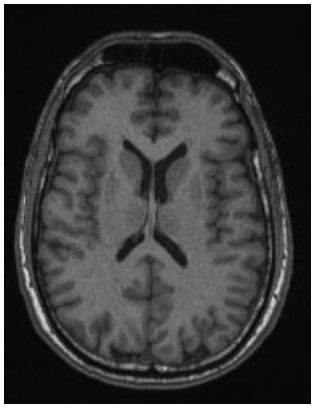
إن إشارة الرنين المغناطيسي تحدث عند الإسترخاء مع خسارة طاقة الموجات الراديوية المكتسبة، عندما يتم إيقاف الموجات الراديوية تخسر البروتونات التي أكتسبت الطاقة وتعود إلى وضعها الطبيعي في حالة الإتزان.

في الرنين المغناطيسي نستطيع تصوير أو إلتقاط المغنطة العرضية فقط لأننا لا نستطيع تمييز إشارة الرنين المغناطيسي الموافقة لإتجاه المجال المغناطيسي الرئيسي . كما أن مستقبل الإشارة يستقبل الإشارة فقط من المغنطة العرضية، وكلما كانت المغنطة العرضية أكبر تكون الإشارة المستقبَلة أكبر والعكس صحيح حيث تتناقص الإشارة مع تناقص المغنطة العرضية حتى تتلاشى كلياً.



الشكل (12): تدرج الألوان في جهاز الرنين المغناطيسي

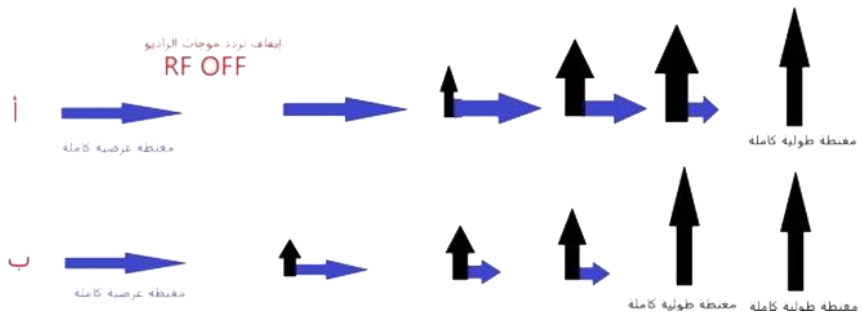
كما نعلم أن صورة الرنين المغناطيسي هي تدرج بين اللونيين الأبيض والأسود. اللون الأبيض في الصورة يعني أن الإشارة قوية واللون الأسود يعني عدم وجود الإشارة. إن تدرج الطيف الرمادي بين الأبيض والأسود يعكس قوة الإشارة. كلما كانت الأشارة أقوى كانت أقرب إلى اللون الأبيض[16].



الشكل (13): اللون الأبيض في الصورة يعني أن الإشارة عالية (مغنطة عرضية) أما اللون الأسود يعني عدم وجود إشارة (مغنطة طولية) وتدرج اللون الرمادي يعكس باقي الأنسجة

الانتقال بين المغنطة العرضية والمغنطة الطولية له زمن معين. يختلف بإختلاف نوع وبنية النسيج المدروس. بعض الأنسجة يحدث الانتقال فيها بسرعة والبعض الآخر يحدث الانتقال فيها ببطء.

لنفرض أنه لدينا نسيجين مختلفين أحدهما له زمن انتقال بطيء (أ) والآخر له زمن انتقال سريع (ب) كما هو موضح في الشكل

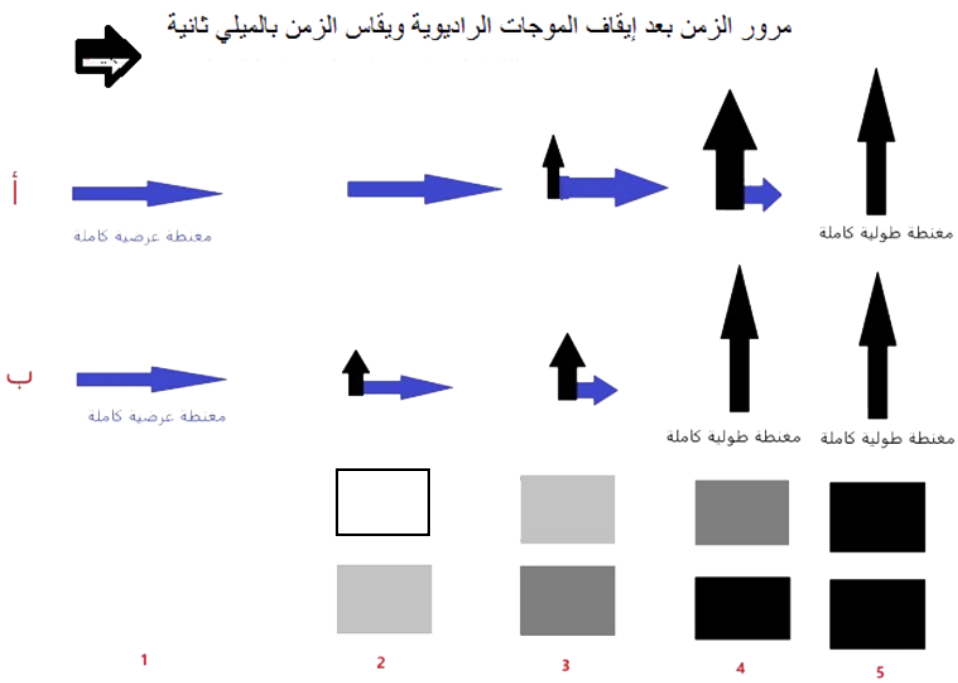


الشكل (14): اختلاف أزمنة الانتقال باختلاف نوع الأنسجة

نلاحظ أن النسيج (ب) قد عاد إلى حالة الإتزان بشكل أسرع من النسيج (أ).

لكن كيف يمكننا تطبيق ذلك على صور الرنين المغناطيسي؟

لنفرض أننا أخترنا التصوير عند زمن محدد بعد إيقاف الموجة الراديوية ويسمى عادة بزمن الصدى: (time to echo) وبالتالي يمكننا التحكم بزمن الصدى للحصول على الصورة الأمثل التي نريدها. على سبيل المثال لو أخترنا أوقات أخرى لحصنا على الصور التالية:



الشكل (15): اختلاف الصورة الناتجة باختلاف زمن الإيقاف

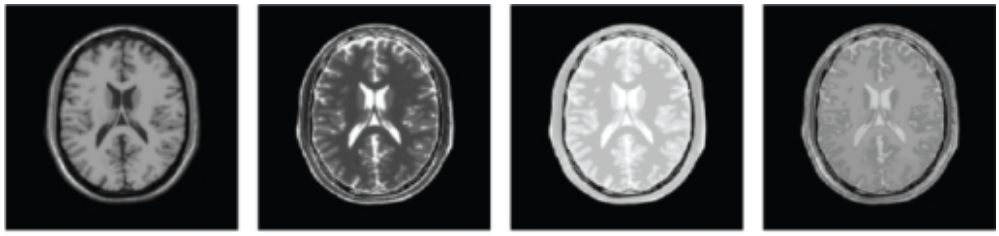
في الصورة الأولى كان التصوير والمغنطة العرضية في أوجها بالنسبة للنسيجين لذلك كلاهما يظهر باللون الأبيض في الصورة وهذا يعطينا صورة غير مرغوبة لعدم وجود تباين بين الأنسجة وعدم وضوح مكونات النسيج وبالتالي نستنتج إنه للحصول على صورة جيدة لا بد من الإنتظار لوقت معين (نستطيع تحديده بحسب نوع الصورة التي نريدها) وبالتالي لا بد من الإنتظار لوقت معين نسميه وقت الصدى وإلا لن نحصل على التباين بين الأنسجة.[18]

في الصورة الثانية حصلنا على بعض التباين بين النسيجين عند إختيار قيمة صغيرة لزمن الصدى ونلاحظ الوضع نفسه تقريباً في الصورة الثالثة والرابعة

في الصورة الخامسة عندما يكون زمن الصدى طويل جداً تتلاشى المغنطة العرضية تماماً ولم يعد بإمكاننا الحصول على أي إشارة.

وبالتالي بإختلاف زمن التصوير يمكن أن نحصل على صور متعددة وبالتالي نستطيع إختيار الوقت المناسب لكي يكون السائل النخاعي الشوكي في الدماغ CSF أبيض وأنسجة الدماغ سوداء وتسمى هذه الصورة (صورة الزمن الثاني الموزونة) الصورة الثانية من اليسار ادناه،

أو العكس عندما تكون السوائل في الدماغ سوداء بينما نسيج الدماغ أبيض تسمى هذه (صورة الزمن الأول الموزونة)الصورة الأولى على اليسار، لأن إختلاف انواع الصور يمكننا من تشخيص أمراض مختلفة قد لا تظهر في أحد الصور وتكون واضحة في الأخرى.



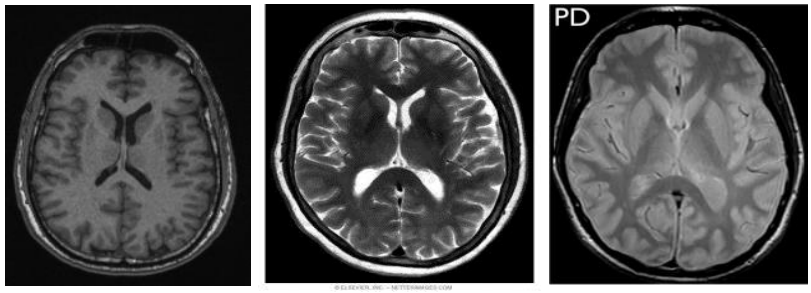
الشكل (16): اختلاف صورة النخاع الشوكي باختلاف زمن الإيقاف

ومن الحالات التي يجب الإشارة إليها أيضاً في هذه الدراسة:

- ظاهرة زمن الإسترخاء الأول T1-Relaxation
- صورة الزمن الأول الموزونة T1-wighted image
- ظاهرة زمن الاسترخاء الثاني T2-Relaxation
- صورة الزمن الثاني الموزونة T2-wighted image
- صورة كثافة البروتون Proton Density image
- مبدئياً يمكننا القول بأنه يوجد ثلاث أنواع رئيسية في صور الرنين المغناطيسي:

1. صورة الزمن الأول الموزونة T1-Weighted Image
2. صورة الزمن الثاني الموزونة T2-Weighted Image

3. صورة كثافة البروتون الموزونة Proton Density Weighted Image



الشكل (17): الاختلاف في الصور التي تم النقاطها حسب تغير العوامل المؤثرة

نلاحظ اختلاف الألوان في هذه الصور بسبب اختلاف العوامل ومكونات الصورة . نلاحظ أنه في الصورة التي على اليمين أنه لا يمكننا مشاهدة السائل النخاعي الشوكي CSFوتم تضعيف الإشارة الخارجة منها، أما نظيرتها التي في المنتصف فتوضح جميع السوائل بما فيها الـ CSF باللون الأبيض. هذا بسبب أن الأمراض تختلف مكوناتها ولذلك للتشخيص الكامل لا بد من أخذ عدة أنواع من الصور. وهذا لا يحدث في أنواع الأشعة الأخرى، هذا ما يجعل جهاز الرنين المغناطيسي مميز وكأنه أكثر من جهاز.[20]

يوجد ثلاث عوامل رئيسية بالإضافة إلى عوامل اخرى تتحكم في التباين في صور الرنين المغناطيسي وكل صور الرنين المغناطيسي لا بد أن توجد فيها هذه الخصائص، لكن بنسب مختلفة. هذه الخواص الثلاثة هي صفات داخلية تتعلق بالبروتونات وتختلف بإختلاف بروتونات نسيج عن آخر. ومن هذه الخصائص

1. زمن الإسترخاء الأول T1-Relaxation Time
2. زمن الاسترخاء الثاني T2-Relaxation Time
3. كثافة البروتونات في النسيج Proton Density

ملاحظة: يوجد اختلاف بين ظاهرة الزمن الأول T1-Relaxation وصورة الزمن الأول الموزونة .T1-weighted image مع العلم أنه يوجد علاقه بينهما، ولكنهما ليس نفس الشئ. كذلك نفس الإختلاف ينطبق على ظاهرة الزمن الثاني وصورة الزمن الثاني الموزونة.[21]

إن جميع صور الرنين المغناطيسي لا بد أن يكون فيها جميع هذه الخصائص لكن تختلف النسبة. هذه الخصائص كلها تتعلق ببعضها البعض ويرتبط حدوث احدها بحدوث الآخر لكن يمكننا بتغيير عدة عوامل أن نغير في النسب بين ظاهرة وأخرى. على سبيل المثال، إذا أردنا أن نأخذ صورة الزمن الأول الموزونة فإننا نستطيع تغيير بعض العوامل لزيادة ظاهرة الزمن الأول في الصورة وإضعاف ظاهرتي الزمن الثاني وكثافة البروتون وهكذا.

- الصورة الموزونة ويتحكم فيها بشكل رئيسي ظاهرة الزمن الأول.
- صورة الزمن الثاني الموزونة ويتحكم فيها بشكل رئيسي ظاهرة الزمن الثاني
- صورة كثافة البروتون الموزونة ويتحكم فيها بشكل رئيسي عدد البروتونات في النسيج

ماهو سبب تسمية الصور بالموزونة weighted ؟

إن أي نوع من الصور تتجمع فيه جميع الخصائص الثلاثة لكن أحدها يكون بنسبة أكبر. ويمكن التحكم بذلك بعدة عوامل وكأننا نستخدم ميزان لإختيار الصورة التي نريد. من خلال التحكم بوقت هذه العوامل يُمكننا من زيادة تأثير أحد هذه الظواهر في الصورة وتضعيف الظاهرتين الباقيتين

العوامل الرئيسية التي تتحكم في التباين في صور الرنين المغناطيسي:

- زمن التكرار : TR repetition time المقصود هنا هو تكرار الموجات الراديوية وهذا يعني وقت الإنتظار بين الموجات الراديوية المطبقة، وهذا يدل على أنها ليست موجة واحدة فقط بل سلسلة موجات متعاقبة، هذا يمكننا من التحكم بالصورة

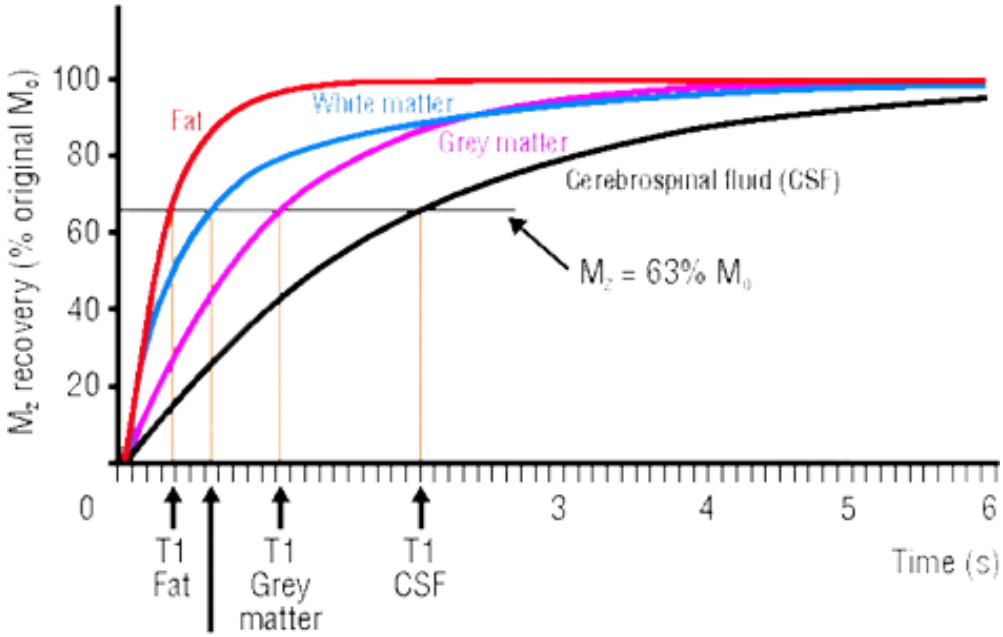
- زمن الصدى .TE echo time هو الوقت الذي نصور فيه (وقت التصوير ويسمى هنا الصدى، لأننا نحن نعطي موجات راديوية ثم ترتد لنا عند الإسترخاء ونصورها) المقصود هنا مدة وقت الإنتظار بعد إرسال الموجة الراديوية لكي نأخذ الصورة.

ظاهرة زمن الإسترخاء الأول T1-Relaxation :

ينتج هذا الإسترخاء نتيجة انتقال الطاقة من البروتونات إلى محيطها وهذا ما يسمى Spin-Lattice Energy Transfer.وعندما تخسر البروتونات الطاقة يحدث ضعف تدريجي في المغنطة العرضية حتى تختفي بشكل كامل مع إكتمال تشكل المغنطة الطولية. هذا يعني الرجوع لحالة الإتزان. وتختلف سرعة الانتقال من المغنطة العرضية إلى المغنطة الطولية بين الأنسجة. لكن في الرنين المغناطيسي يكون الماء water و الدهن fat هما طرفا نقيض وكل ما عداهما يكون في المنتصف. لذلك يظهر الاهتمام بالفرق في وقت الإسترخاء بين الماء والدهن.

يكون زمن الإسترخاء بالنسبة للبروتونات في الدهن خلال ظاهرة زمن الإسترخاء الأول قصير. أي يحدث إسترخاء بسرعة (مما يعني حدوث تلاشي للمغنطة العرضية بشكل سريع). أما الماء فهو على العكس تماماً. فالوقت الذي تستغرقه بروتونات الماء للإسترخاء في ظاهرة الزمن الأول يعتبر طويل أي تستغرق بروتونات الماء وقت طويل للعودة إلى المغنطة الطولية

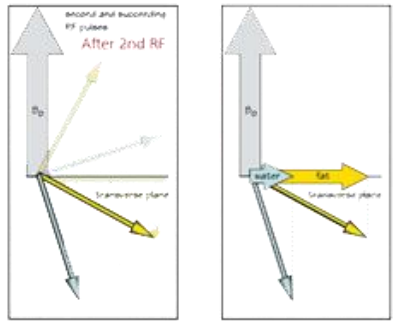
بعد إثارة البروتونات الموجودة في الدهن والماء بواسطة الموجات الراديوية تصبح جميعها في المغنطة العرضية بشكل كامل. وبعد إيقاف الموجات الراديوية تعود البروتونات الموجودة في الدهن بشكل اسرع من البروتونات الموجودة في الماء إلى المغنطة الطولية.[22]



الشكل (18): مخطط يوضح قيم زمن الاسترخاء T_1 لبعض المكونات الأساسية للخلايا الحية في الجهاز العصبي لجسم الإنسان

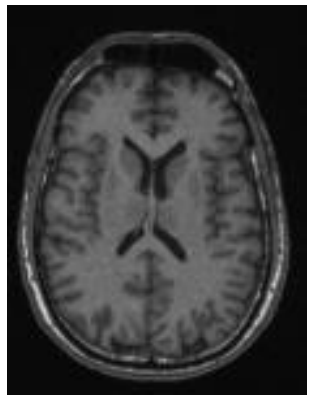
صورة الزمن الأول الموزونة T1-weighted images ؟

بما أننا نريد أن نستفيد من الفرق في المغنطة العرضية بين الدهن والماء وتمثيل ذلك على صورة الزمن الأول الموزونة. فإننا لو انتظرنا وقتاً طويلاً سنزيد من ظاهرة الزمن الثاني في الصورة (يكون ذلك من خلال تكرار إرسال الموجة الراديوية بعد زمن معين نسميه زمن التكرار TR وفي هذه الحالة علينا أن لا ننتظر طويلاً لإرسال الموجة الراديوية الثانية، لأنه لو انتظرنا طويلاً سيعود كلاهما للمغنطة الطولية وسيتلاشى الفرق بين الدهن والماء. لهذا السبب يكون وقت التكرار TR متحكماً في ظاهرة الزمن الأول لذلك ننتظر وقت قصير ونرسل الموجة الراديوية الثانية.[24]



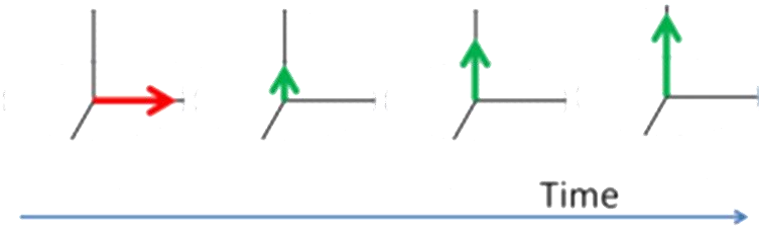
الشكل (19): إبعاد الماء عن الدهون نتيجة تأثير الموجة الراديوية الثانية
حيث يكون الدهن أقرب إلى المغنطة العرضية والماء أبعد عنها

بما أن الإشارة من الطبقة الدهنية أكبر، فإنه يظهر على صورة الزمن الأول الموزونة باللون الأبيض. أما الماء فيكون لونه أسود في الصورة لأنه بعيد عن المغنطة العرضية. ولو أخذنا صورة الزمن الأول الموزونة على الدماغ فإن نسيج الدماغ (المادة الدهنية) يكون أبيض اللون أما السائل النخاعي الشوكي CSF (مكونه الأساسي هو الماء) فيكون أسود اللون، تتميز هذه الصورة بأنها صورة تشريحية لأنها توضح المكونات بشكل واضح. مثلاً في الدماغ المادة الرمادية تكون لونها في الصورة رمادي. أما المادة البيضاء فتكون بيضاء في الصورة) .



الشكل (20): صورة توضيحية للنخاع الشوكي بعد التحكم بزمن الاسترخاء

تعتمد ظاهرة الزمن الأول على عودة المغنطة الطولية إلى وضعية الإتزان وعلى الرغم أن المغنطة الطولية هي المهمة في الزمن الأول، إلا أن الإشارة التي نلتقطها هي المغنطة العرضية، كلاهما مرتبط بالآخر لكن التوقيت يختلف . (مع وجود الموجات الراديوية تكون المغنطة الطولية تقريباً صفر. بعد إيقاف الموجات الراديوية تعود المغنطة الطولية بشكل تدريجي حتى تظهر بشكل كامل عند وصولها لحالة الإتزان كما في الصور ادناه.[25]



الشكل (21): عودة المغنطة الطولية تدريجياً حتى تظهر بشكل كامل عند حالة الإتزان

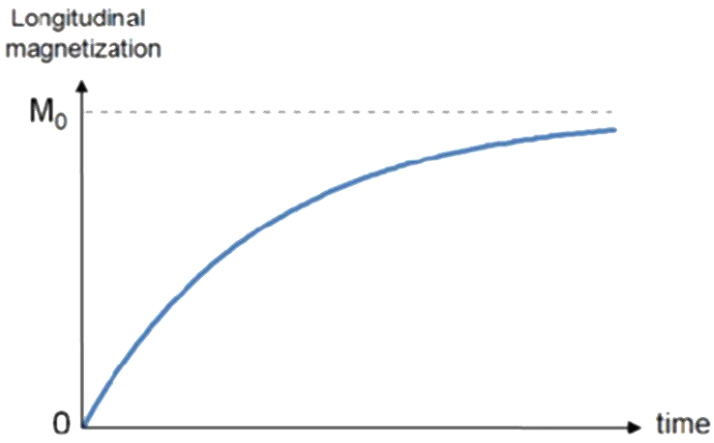
تعطى العلاقة التي تعبر عن المغنطة الطولية بتابعية الزمن:

$$M_z(t) = M_0\left[1 - exp\left(-\frac{t}{T_1}\right)\right] \qquad (2)$$

حيث M_O : التمغنط الأساسي للبروتون

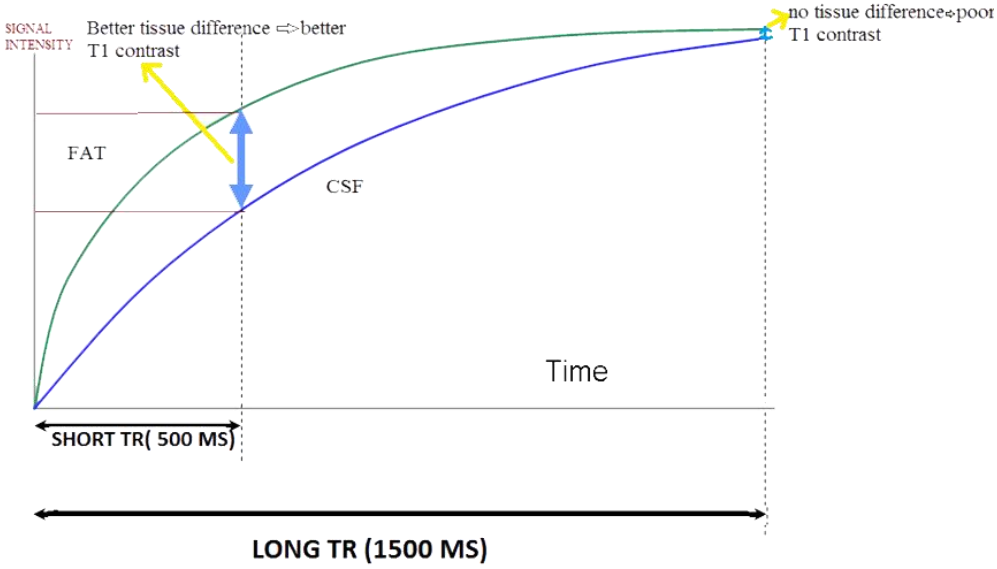
T_1 : زمن الاسترخاء الأول وهو الزمن الموافق للتمغنط عندما يصبح 0.63 من قيمته الأصلية

والتي يعبر عنها بيانياً بالشكل التالي

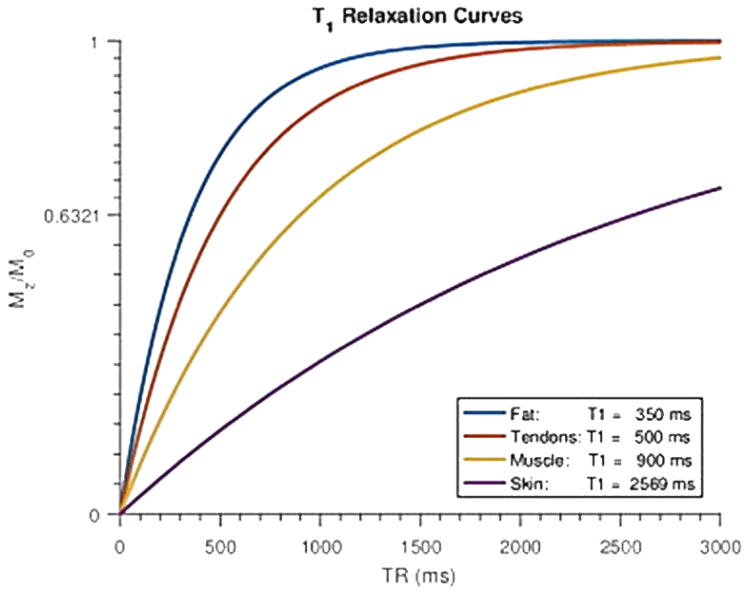


الشكل (22): العلاقة الأسية بين المغنطة الطولية والزمن ويظهر فيها زمن الاسترخاء الأول

وإذا ما أخذنا في الإعتبار الدهن والماء:



الشكل (23): العلاقة الأسية بين المغنطة الطولية والزمن يظهر فيها زمن الاسترخاء الأول للدهن والماء



الشكل (24): العلاقة الأسية بين المغنطة الطولية والزمن ويظهر فيها زمن الاسترخاء الأول لعينات مختلفة من الخلايا الحية

ونلاحظ من المخطط البياني اختلاف قيم زمن الاسترحاء الأول لكل من الدهن والأوتار الرابطة والعضلات والجلد

الدهن	350 m.s
الأوتار الرابطة	500 m.s
العضلات	900 m.s
الجلد	2569 m.s

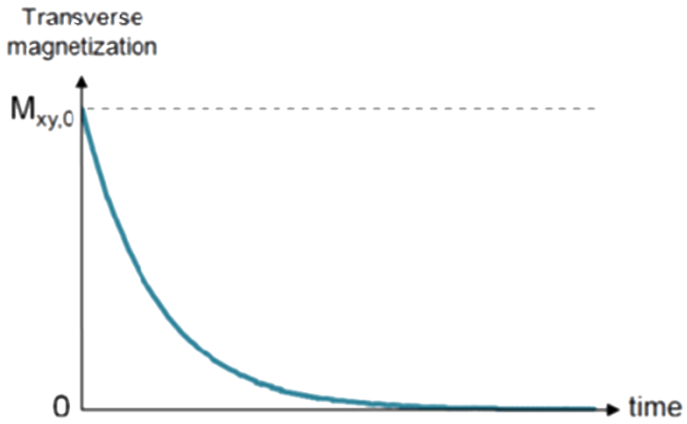
ظاهرة زمن الاسترخاء الثاني T2-Relaxation :

أما بالنسبة لظاهرة الزمن الثاني فإنها تعتمد على تلاشي ونقصان في المغنطة العرضية نتيجة لتقديم البروتونات المدروسة الطاقة إلى البروتونات المجاورة لها ويمكن تسميتها

(استرخاء السبينات) في ظاهرة إسترخاء الزمن الثاني (كما في ظاهرة الزمن الأول) تحدث خسارة الطاقة للبروتونات المجاورة نتيجة لفقد البروتونات خاصية الدوران في نفس الطور ويكون زمن خسارة البروتونات للطاقة بالنسبة للدهون قصير. أما بالنسبة للماء فيكون الزمن طويل.

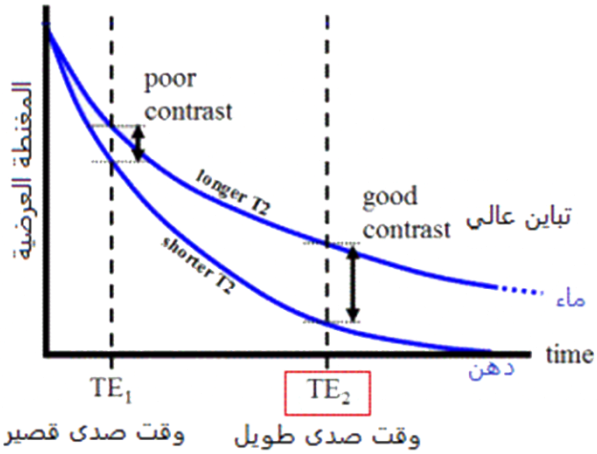
يمكننا رسم العلاقة بين المغنطة العرضية والزمن في ظاهرة إسترخاء الزمن الثاني كالتالي:

$$M_{x,y,o}(t) = M_{x,y,o} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \qquad (3)$$



الشكل (25): العلاقة بين المغنطة العرضية والزمن ويظهر فيها زمن الاسترخاء الثاني

أما للمقارنة بين الدهن والماء فإن العلاقة تكون كالتالي:



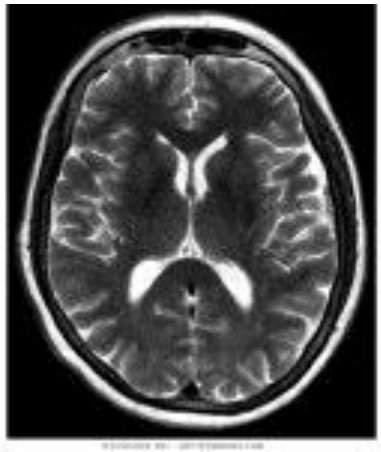
الشكل (26): العلاقة الأسية بين المغنطة العرضية والزمن ويظهر فيها زمن الاسترخاء الثاني للماء والدهن

في صورة زمن الاسترخاء الثاني نختار زمن صدى طويل حيث نحصل على تباين بين النسيجين

هذا يعني أن المغنطة العرضية للدهن تتلاشى بشكل أسرع من المغنطة العرضية للماء في ظاهرة الزمن الثاني. بصيغة أخرى، بروتونات الماء تستغرق وقت أطول لتقديم الطاقة للبروتونات المجاورة مقارنة بالدهن.

صور الزمن الثاني الموزونة T2-weighted image :

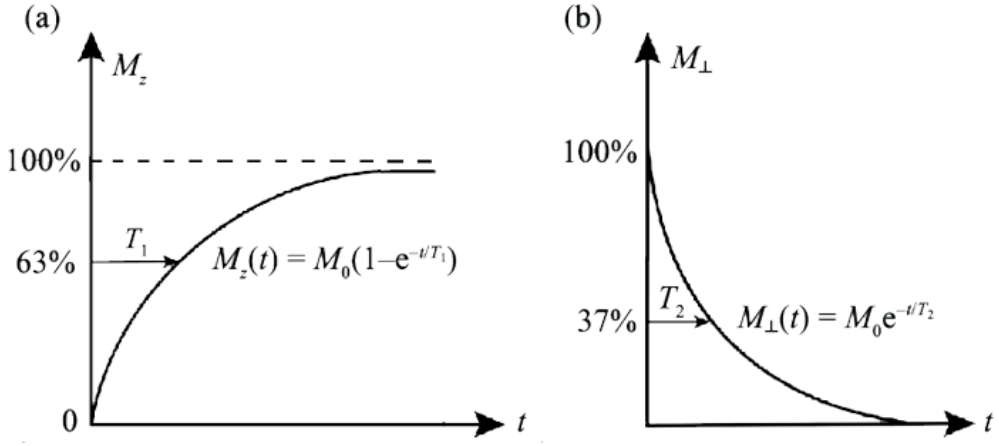
العامل المتحكم في صورة الزمن الثانية الموزونة هو وقت الصدى لا بد أن يكون طويل بحيث يكون هناك تباين بين الماء والدهن في الصورة. فلو اخترنا وقت صدى قصير يكون التباين قليل بين الدهن والماء. نلاحظ في الرسم البياني اعلاه أن الإشارة في الماء هي أعلى من الإشارة من الدهن. وهذا ما يعطينا صورة الزمن الثاني الموزونة. الماء يكون أبيض والدهن اسود.



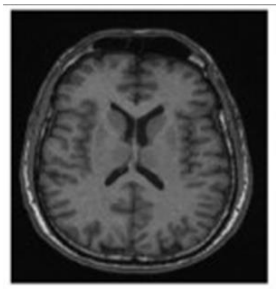
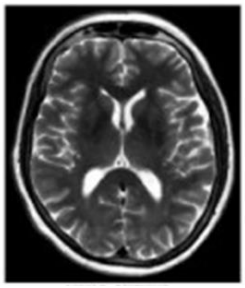
الشكل (27): صورة الزمن الثاني الموزونة. الماء يكون أبيض والدهن اسود

تجدر الإشارة إلى أننا لو أخترنا زمن تكرار قصير فإننا سنسمح بخواص ظاهرة الزمن الأول بالظهور على صورتنا، وبالتالي عندما نريد الحصول على صورة الزمن الثاني الموزونة نتبع الخطوات التالية:

1- نختار زمن صدى طويل فهو العامل المتحكم في ظاهرة الزمن الثاني.
2- نختار وقت تكرار طويل لكي نتفادى أو نخفف من ظاهرة الزمن الأول.



الشكل (28): مقارنة بين تحديد زمن الاسترخاء الأول وزمن الاسترخاء الثاني

	صورة الزمن الأول الموزنة	صورة الزمن الثاني الموزنة
شكل الصورة		
زمن التكرار TR	قصير هو العامل المتحكم في الزمن الأول	طويل لكي نقلل من ظاهرة الزمن الأول في الصورة
زمن الصدى TE	قصير لكي نقلل من ظاهرة الزمن الثاني في الصورة	طويل هو العامل المتحكم في الزمن الثاني
بعض خصائص الصورة	الماء يكون غامق الدهن يكون فاتح	الماء يكون فاتح الدهن يكون غامق
تشتهر بـ	صورة التشريح	صورة الأمراض
ظاهرة الاسترخاء	ظاهرة زمن الاسترخاء الأول أكبر	ظاهرة زمن الاسترخاء الثاني أكبر

الشكل (29): الفرق بين صورة الزمن الأول الموزونة وصورة الزمن الثاني الموزونة

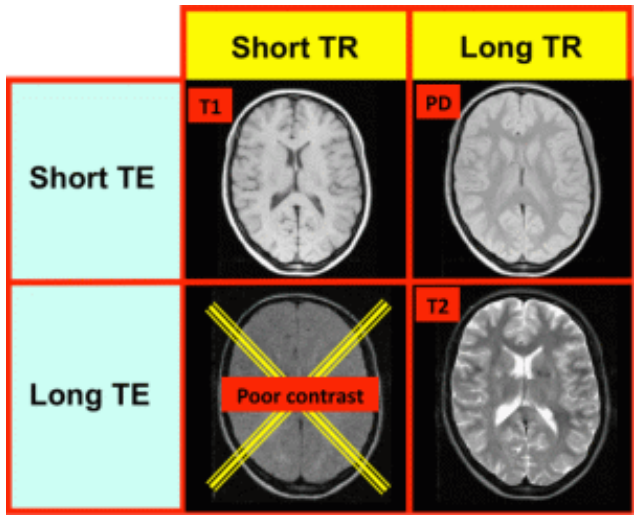
صورة كثافة البروتون الموزونة Proton Density Weighted Image :

نريد صورة تعطي الفرق في الخواص بين كثافة البروتونات في الأنسجة. للحصول على هذه الصورة لا بد من إختيار زمن التكرار TR وزمن الصدى TE المناسب لكي

نقلل من تأثير ظاهرة الزمن الأول وظاهرة الزمن الثاني في الصورة. بحيث تكون الصورة معتمدة بشكل كبير على كثافة البروتونات في الأنسجة.

وللحصول على ذلك نختار زمن تكرار TR طويل، وزمن صدى قصير. الأول لتقليل تأثير ظاهرة الزمن الأول والثاني لتقليل تأثير ظاهرة الزمن الثاني. فتظهر الأنسجة قليلة الكثافة في البروتونات غامقة أو سوداء. أما الأنسجة كثيرة البروتونات فتكون بلون فاتح أو بيضاء.

يمكن تلخيص الأفكار السابقة بالمخطط التالي الذي يوضح التحكم في العوامل:



الشكل (30): العوامل المؤثرة للحصول على الصورة الأفضل في أجهزة الرنين المغناطيسي

النتائج والمناقشة:

- يتم تحسين أداء التصوير بالرنين المغناطيسي بهدف أن تكون الصورة واضحة باعتماد إشارة الرنين المغناطيسي من البروتونات المتواجدة في الهيدروجين حصراً وذلك لأن ذرة الهيدروجين تمتلك بروتون واحد فقط من جهة، ومن جهة أخرى وجود كمية كبيرة من الهيدروجين في الجسم، هذه الحالة التي تكون فيها المغنطة طولية في إتجاه المجال المغناطيسي الخارجي تسميها بحالة الإتزان. لايمكن اعتماد إشارة هذه الحالة ولابد من إستثارة البروتونات باتجاه مغاير للمجال المغناطيسي الرئيسي للحصول على إشارة يعتمد عليها والتي نسميها حالة الإستثارة
- يتم التأثير بالموجات الراديوية على البروتونات وإعطاء بعضها الطاقة تجعلها قادرة على الدوران باتجاه يعاكس المجال المغناطيسي المطبق، وبالتالي تلاشي للمغنطة الطولية وظهور المغنطة العرضية، وكلما زادت المغنطة العرضية كانت إشارة الرنين المغناطيسي أقوى وزاد اللون الأبيض في الصورة، وبالعكس كلما كانت ضعيفه كلما زاد اللون الأسود في الصورة، مع التأكيد على القدرة على اختيار زمن التكرار TR وزمن الصدى TE بحيث نتحكم بقوة الإشارة وشدتها وبالتالي يمكننا من رؤية التباين بين الأنسجة المختلفة.
- عند تحديد زمن الاسترخاء الأول وبعد إيقاف الموجات الراديوية نلاحظ عودة البروتونات المتواجدة في الدهون إلى حالة الإتزان بشكل سريع. أما البروتونات التي تتواحد في الماء فتعود بشكل بطئ.وهنا يكون فيها الدهن باللون الأبيض، أما الماء فيكون باللون الأسود.
- من أجل تحديد زمن الاسترخاء الثاني نلاحظ تناقص المغنطة العرضية. بعد إيقاف الموجات الراديوية حيث تفقد البروتونات خاصية الدوران بنفس الاتجاه ويكون زمن الاسترخاء الثاني (زمن خسارة البروتونات للطاقة) بالنسبة للدهون قصير وبالنسبة للماء

طويل. وفي هذه الحالة يكون فيها الماء باللون الأبيض، أما الدهن فيكون باللون الأسود.

- للحصول على أوضح الصور في الرنين المغناطيسي يتم اختيار زمن تكرار TR طويل، وزمن صدى TE قصير. الأول لتقليل تأثير زمن الاسترخاء الأول والثاني لتقليل تأثير زمن الاسترخاء الثاني. فتظهر الأنسجة ذات الكثافة البروتونية المنخفضة غامقة أو سوداء. أما الأنسجة ذات الكثافة البروتونية المرتفعة فتكون بلون فاتح أو بيضاء.

المراجع:

[1]: Elizabeth A. Moore, MRI From Picture to Proton – second edition – CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS (2006)

[2]: Hoffmann et al. Radiation Oncology – MR-guided proton therapy: a review and a preview – journal biomed central (2020)

[3]: Joseph J Shaffer – Proton Exchange Magnetic Resonance Imaging: Current and Future Applications in Psychiatric Research – National Library of Medicine (2020)

[4]: Puyang Wang – Improving Amide Proton Transfer-weighted MRI Reconstruction using T2 weighted Images – Springer Professional (2016)

[5]: Jinyuan Zhou Improving Amide Proton Transfer-weighted MRI Reconstruction using T1-weighted Images – Conference on Medica Springer (2015)

[6]: Quan, T.M., Nguyen-Duc, T., Jeong, W.K.: Compressed sensing mri reconstruction using a generative adversarial network with a cyclic loss. Transactions on Medical Imaging (2018)

[7]: Huang, J., Chen, C., Axel, L.: Fast multi-contrast mri reconstruction. Magnetic resonance imaging 32(10), 1344-1352 Journal of Physics: Conference Series (2014)

[8]: Dr Jeremy Jones – Longitudinal and transverse magnetization – Nature Reviews Materials (2021)

[9]: G. Brix – Basics of Magnetic Resonance Imaging and Magnetic Resonance Spectroscopy – Acta Materialia (2008)

[10]: Thomas T. Liu – MRI in Systems Medicine – La Jolla, CA, 92093–IEEE Journal of Photovoltaics (2018)

[11]: Michael E. Hayden, Pierre–Jean Nacher – History and physical principles of MRI ffal–01191404f–Magnetochemistry (2016)

[12]: Mispelter J, Lupu M, Briguet – NMR Probeheads for Biophysical and Biomedical Experiments. Imperial College Press, London (2006)

[13]: Wolf S, Diehl D, Gebhardt M, Mallow J, et al. SAR Simulations for High–Field MRI: How Much Detail, Effort, and Accuracy Is Needed? Magn. Reson. Med. 69:1157–1168 – IEEE Magnetics Letters (2013)

[14]: Hidalgo–Tobon S – Theory of gradient coil design methods for magnetic resonance imaging. Concepts in Magnetic Resonance Part A 36A:223–242 – Materials and Energy (2010)

[15]: Rosen, B. R., & Savoy, R. L – fMRI at 20: has it changed the world? NeuroImage, 62(2), 1316–1324 – Functional Differential Equations (2012)

[16]: Lundervold, A. S., & Lundervold, A. An overview of deep learning in medical imaging focusing on MRI. Zeitschrift fur medizinische Physik, 29(2), 102–127 – Advanced Functional Materials (2019)

[17]: Kansagra, A. P., & Wong, E. C – Mapping of vertebral artery perfusion territories using arterial spin labeling MRI. Journal of magnetic resonance imaging : JMRI, 28(3), 762–766. (2008)

[18]: Feng, L. Benkert, T., Block, K. T. Sodickson, D. K . Otazo, R. & Chandarana, H – Compressed sensing for body MRI. Journal of magnetic resonance imaging : JMRI, 45(4), 966–987– Advanced Electronic Materials (2017)

[19]: Edelman, R. R., & Koktzoglou, I. Noncontrast MR angiography: – An Journal of magnetic resonance imaging : JMRI, 49(2), 355–373 (2019)

[20]: Atle Bjørnerud – The Physics of Magnetic Resonance Imaging – FYS–KJM 4740 – The Physics of MRI (2006)

[21]: Ibrahim SI, Abdel Lateef MF, Khalifa HMS, Abdel Monem AE. Phytoremediation of atrazine–contaminated soil using Zea mays (maize) – Materials Research Express (2018)

[22]: Oliver Strbak – Longitudinal and Transverse Relaxivity Analysis of Native Ferritin and Magnetoferritin at 7 T MRI (2022)

[23]: Elizabeth N. York – Quantitative magnetization transfer

imaging in relapsing–remitting multiple sclerosis: a systematic review and meta–analysis – Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2012)

[24]: Bennett, K.M.; Shapiro, E.M.; Sotak, C.H.; Koretsky, A.P. Controlled aggregation of ferritin to modulate MRI relaxivity. Biophys. J, 95, 342–351– IEEE Electron Device Letters (2008)

[25]: J. M. Higbie, L. E. Sadler, S. Inouye, A. P. Chikkatur – Direct Nondestructive Imaging of Magnetization in a Spin (2015)