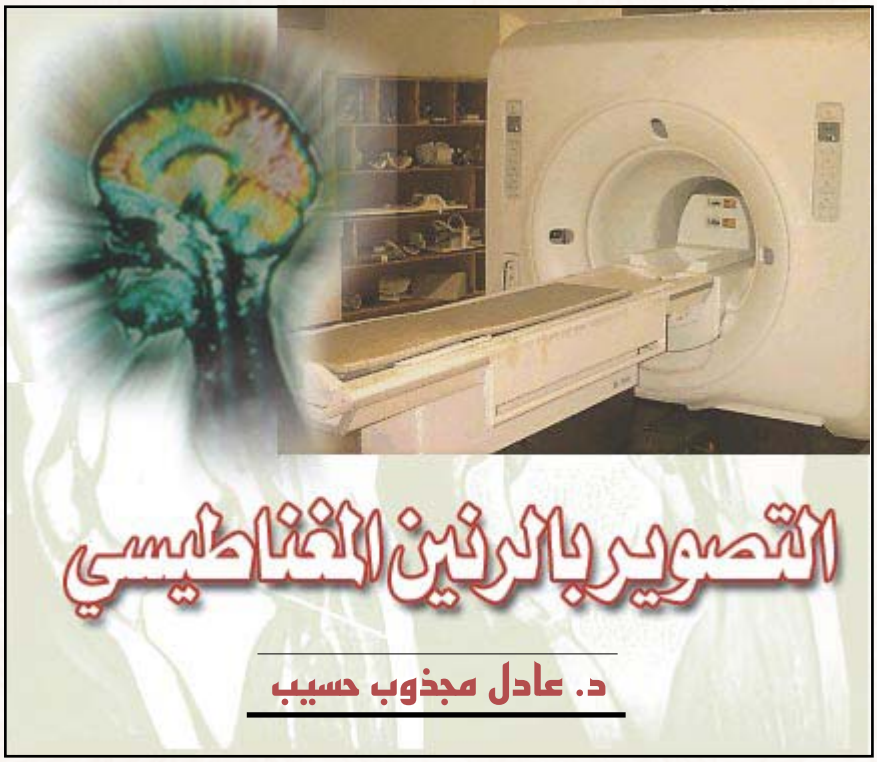


التصوير بالرنين المغناطيسي

د. عادل مجذوب حسيب

شهد الثالث من يوليو عام ١٩٧٧م تَمَكُنْ العالم و الطبيب " ريموند داماديان" (Raymond Damadian) ورفاقه من التقاط أول صورة تشخيصية بالرنين المغناطيسي لأحد المرضى، و بالرغم من أن تلك الصورة لم تكن عالية الوضوح وأستغرق الحصول عليها ما يزيد عن خمس ساعات إلا أنها كانت تمثل فتحاً جديداً في عالم الطب، وتتويجاً لجهود متوالية استغرقت أكثر من سبع سنوات لبناء الجهاز. وقد أطلق "داماديان" وزملاؤه على هذا الجهاز أسم " العنيد " تعبيراً عن كفاحهم المتواصل لتحقيق غاياتهم ضد كل تشاؤم كان يشكك في إمكانية الحصول على مثل هذه الصورة. وربما كانت هذه التسمية استشرافاً لمستقبل هذا الجهاز وأمثاله من الأجهزة التي تطورت بخطى وئيدة واثقة لتساعد على كشف الأمراض ولتنتشر بألالاف في المستشفيات في مستهل القرن الحادي والعشرين.

كان الحدث المذكور واحداً من سلسلة طويلة من الأحداث العلمية التي تعكس التداخل بين المجالات العلمية المختلفة، وبصورة خاصة المعرفة الفيزيائية في تطوير أساليب تشخيص الأمراض ومداواتها. ولعل من أبرزها الاستفادة من الأشعة الكهرومغناطيسية، مثل: الأشعة السينية، أشعةالليزر، أشعة جاما، وغيرها من الإشعاع في الطب. وقد ظهر الرنين المغناطيسي، مستخدماً أشعة الراديو الكهرومغناطسية والمجالات المغناطيسية القوية، كواحد من أفضل الأساليب التشخيصية في نهاية القرن العشرين. وقد كان المدخل إلى الاستعمالات الإشعاعية هو اكتشاف **رونتجين** في السنوات الأخيرة من القرن التاسع عشر الأشعة التي أسماها الأشعة السينية(لأنه لم يكن يعرف هويتها في البداية) والتي استطاع أن يدرسها ويصنفها بعد ذلك ضمن الأشعة الكهرومغناطيسية ويطورها للاستخدام في التصوير الإشعاعي لأول مرة في بداية القرن العشرين.

لفت اكتشاف **رونتجين** الأنظار إلى الإمكانات الهائلة التي يتيحها استخدام الإشعاع غير المرئي في النظر إلى داخل الجسم البشري والتعرف على تركيبه السوي منه أو المصاب بالعطب. فقد تمكن بذلك من تصوير العظام بكفاءة عالية والحصول على صورللمناطق الأخرى من الجسم، عن طريق إمرار حزمة من الاشعة السينية عبر الجسم وإلتقاط المتبقي منها مما لم يمتصه الجسم على أفلام حساسة توضح كثافة الامتصاص الذي تم في كل مكان مر عليه الإشعاع. وقد لاقت أجهزة **رونتجين** رواجاً واسعاً في مجال الطب وأمتد استخدامها إلى الأجهزة الأمنية في المطارات وغيرها، إلا أن هذه الأشعة كانت ولازالت كالمداواة بما يسبب الداء، فمن المعلوم أن الإكثار منها خطر يؤدي إلى أثار مستعصية وخبيثة مثل السرطان وتلف الحيامن والأجنة، وذلك لكونها "أشعة مؤينة"، بمعنى أن التردد الذي تصدر به موجاتها يمثل كمية من الطاقة الضوئية (الفوتونية)، والتي يمكن حسابها بعلاقة "**بلانك**"، وهي أكبر من الطاقة اللازمة لتفكيك الروابط الكيميائية لمعظم الجزيئات، ومن الطاقة اللازمة لانتزاع الإلكترونات من الذرات، مما يؤدي إلى ظهور الجذور الحرة الضارة بالخلية الحية أو إلى تعديل الشفرة الوراثية الموجودة فيها والتي تتحكم بأسلوب تجددها وتكاثرها. وهذا يشير إلى أن التعرض للأشعة السينية يحمل مخاطر محسوبة في كل الحالات، ولذلك تولد حماس كبير عندما تم تطويع الموجات فوق السمعية للحصول على صور للجسم البشري، وهذه في طبيعتها تختلف اختلافاً بيناً عن الأشعة الكهرومغناطيسية، حيث أنها موجات ميكانيكية و لا تحمل طاقة فوتونية، وكان الأمل أن تعطي صوراً واضحة وضوح صور الأشعة السينية،

ولكن لأسباب تتصل بطبيعتها الأساسية فإنها لا تعطي إلا صوراً ضئيلة الوضوح. ونظراً لأنها أكثر أماناً من الأشعة السينية بالنسبة للخلايا نشطة النمو (مثل تلك التي تكون الأجنة) فإن استعمال الموجات فوق السمعية في التصوير قد شاع في الاستخدام للكشف عن المراحل المختلفة للحمل.

وقد حاول المستخدمون للأشعة السينية تحسين الصور التي يتم التقاطها لأجزاء الجسم التي لا تحتوي على كثافة مادية عالية بحقن المرضى بمواد كيميائية تساعد على إظهار الصورة، سميت هذه المواد "بعوامل التباين(contrast agents)، ووجدت استعمالات واسعة عند تصوير الأحشاء وبعض الأجزاء الأخرى التي يكثر فيها الماء. إن مثل هذه الأساليب تستخدم في التصوير بالرنين المغناطيسي لزيادة وضوح الصورة، ويرتبط وضوح الصورة في آلة الأشعة السينية ارتباطاً مباشراً بالكثافة المطلقة للمادة في كل مكان من الجسم، ولذلك تبدو فيها صور العظام واضحة بصورة مميزة عن الخلفية المكونة من الأنسجة الأخرى. وقد ساعد على استخدام الأشعة السينية في الطب ظهور الحاسبات الآلية بعد منتصف القرن العشرين، حيث تمت الاستفادة منها في الحصول على الصور المقطعية بطريقة المسح المتواصل (Computerized Tomography scanner-CT)، وقد ظهر ذلك كأسلوب بديل لتصوير الامتصاص المتباين المباشر، ومهد هذا بدوره لاستعمالات الرنين المغناطيسي المبنية بصورة كاملة على استخدام الحاسبات الآلية، فكلا الأسلوبين يعتمد على الحصول على صور كثيرة من زوايا عديدة لمواقع مختلفة داخل الجسم، ثم تجميع هذه الصور لتكوين صورة مركبة عالية الوضوح تعكس شدة الامتصاص الكهرومغناطيسي عند كل نقطة من الجسم، ويمكن تركيز عمليات التصوير على مناطق محددة داخل الجسم فتظهر صورها بتباين عال أو حتى بالإمكان معالجة الصورة وإظهار أجزاء منها بالألوان فيكون تفسيرها والاستفادة منها أسهل من الصور العادية التي يتم الحصول عليها باللونين الأبيض والأسود.

نظريات وتطبيق الرنين النووي المغناطيسي

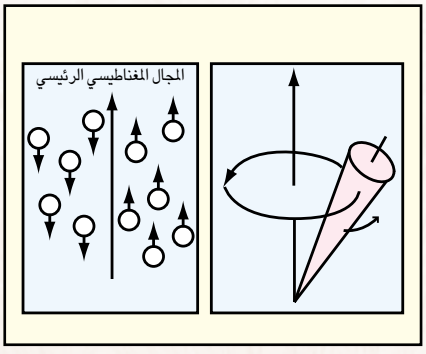
يوضح التاريخ الموجز للنظريات والتطبيقات للتصوير بالرنين المغناطيسي أن الأبحاث العملية في هذا المجال قد بدأت في فترة ما بعد الحرب العالمية الثانية حينما استطاع العلماء الاستفادة من منجزات الهندسة الحربية في الرادار وفي تعقب الطائرات، وفي أيجاد أساليب أفضل لتوليد الأشعة الكهرومغناطيسية وصنع كاشفات عالية الحساسية لها. إلا أن الأفكار النظرية الخاصة بالرنين المغناطيسي قد سبقت ذلك بما يزيد عن عشر سنوات، وقد كانت نتاجاً مباشراً لنظريات ميكانيكا الكم التي ازدهرت في العشرينيات والثلاثينيات من القرن. وقد سبق العالم **داماديان** الذي بنى أول جهاز للتصوير بالرنين المغناطيسي عشرات العلماء الذين شاركوا نظرياً وتجريبياً في اكتشاف الأسس النظرية والظواهر العلمية التي ينبني عليها جهاز الرنين المغناطيسي، وتم ذلك كله في نفس الوقت الذي حدثت فيه الثورة الإلكترونية بتصنيع الترانزيستور والدوائر الإلكترونية المتكاملة، وكلها مجالات في دراسة فيزياء الجوامد وخواصها أو في تفاعل الإشعاعات مع المادة، وهذه بدورها تعتمد على التردد والطول الموجي للإشعاع وكمية الطاقة التي يحملها كل فوتون محمول عبر هذه الموجات.

وقد كانت أول دراسة فيزيائية تجريبية على الرنين المغناطيسي هي التي أجراها العالم الروسي **زافيوسكي** (Zaviosky) في عام ١٩٤٤م، وبرهن بها أن بالإمكان الحصول على رنين مغناطيسي للإلكترونات، أي ما يسمى بالرنين الإلكتروني البارامغناطيسي(EPR). تلا ذلك - بسرعة - حصول الأمريكيان **بلوخ** (Bloch) و **برسل** (Purcell)، كل على حدة، في عام ١٩٤٦م على الرنين المغناطيسي لنوى الذرات (NMR). وهي أساليب طيفية لدراسة المادة حيث توضع العينات في مجال مغناطيسي قوي قبل أن يمرر عليها إشعاع كهر ومغناطيسي ذو تردد متغير، ثم البحث عن الترددات التي يحدث لها أعلى امتصاص للإشعاع، ولذلك هي في الواقع عملية توافق بين شدة المجال وقيمة التردد تعرف في الفيزياء بإسم الرنين (resonance)، ويلاحظ أن الامتصاص لا يتم إلا إذا استوفيت شروط معينة للرنين. وفق معادلة بسيطة تعطي العلاقة بين التردد (f) والحث المغناطيسي(magnetic induction) والذي يتناسب مع شدة المجال المغناطيسي وهي كالتالي :

$$hf = \gamma B$$

حيث (B) الحث المغناطيسي و (h) ثابت بلانك و(γ)ثابت تناسب.

وتوضح هذه العلاقة أن بعض النوى تمتص الفوتونات عندما تجد نفسها في المجال المغناطيسي ذي الشدة المناسبة. وتقاس شدة المجال بوحدة "الجاوس" وإذا علمنا أن شدة المجال المغناطيسي للكرة الأرضية هي نصف جاوس فإن الشدة المناسبة للمغناطيس المستعمل في الرنين المغناطيسي هي عشرون ألف جاوس، أي بما يزيد عن شدة مجال الكرة الأرضية بأربعين ألف مرة.



● شكل (١) إستجابة البروتونات للمجال المغناطيسي الخارجي.

● آلية الإمتصاص بالرنين المغناطيسي

يمكن شرح آلية امتصاص النوى للفوتونات بالرنين المغناطيسي عند وضعها في المجال المغناطيسي، بأن بعض النوى تتصرف وكأنها مغناطيس صغير، بحكم أنها ثنائية القطب المغناطيسي، وتعد نواة الهيدروجين من أبرز هذه المغانط الصغيرة وأشدها استجابة للمجالات المغناطيسية الخارجية، حيث تتكون من بروتون واحد وتتواجد في كل جزئ مائي، وعند وضع هذه النوى في مجال مغناطيسي فإنها تميل للإتجاه في اتجاه المجال وتبدأ في حركة طوافية (Precessional motion) حول اتجاه المجال كما هو موضح في شكل (١)، فإذا سلط عليها إشعاع كهرومغناطيسي امتصت منه الفوتونات وحولت اتجاهها للدوران حول المجال المغناطيسي في اتجاه معاكس لاتجاهها الأول، وتكون بذلك في حالة طاقة عالية لا تلبث أن تفقد معظمها في زمن معين يعرف بزمن "الاسترخاء"، وهو الزمن الذي تعود بعده النواة إلى حالتها الأولى. ولا تزيد أزمنة الاسترخاء في غالبية الأحوال على بضعة أجزاء من الثانية. ويمكن الآن رصد عمليات الإمتصاص والإسترخاء بدقة عالية، لذلك تعد عملية رصد ومتابعة الاسترخاء أساس التصوير بالرنين المغناطيسي، مما يجدر ذكره أن زمن الاسترخاء يتغير بتغير نوع وكثافة الأنسجة. حيث تدل السرعات المختلفة للإمتصاص عند الاسترخاء على نوع وكثافة الأنسجة التي تحمل الماء ـ يتضمن الهيدروجين ـ فكلما كان زمن الاسترخاء أطول فإن ذلك يعني أن الأنسجة تحتفظ بالطاقة التي أكتسبتها لمدة أطول، لذلك فإن معدلات فقد الطاقة أو نقلها إلى جارات النوى من جزيئات وغيرها هي التي تحدد نوع الخلايا التي تحيط بالجزيء. ونظراً لان الجسم البشري يحتوي على نسبة عالية من ذرات الهيدروجين، فإن هذه النسبة ـ بالتأكيد ـ تتيح لنا تصويراً جيداً لجميع أنسجة وخلايا الجسم. ويمكن القول أن التصوير بالرنين المغناطيسي أصبح أسلوب ممتاز للحصول على صور ذات نوعية عالية من داخل الجسم البشري خاصة وأنه مر بمراحل تطوير متعددة يمكن توضيحها في الجدول (١).

الفتـــرة	ماتـــم فيهـــا
١٩٤٦م	تجارب **فيلكس بلوخ (Felix Bloch)** و **أدوارد برسل (Edward Purcell)**، بصورة مستقلة ، منحا بموجبها جائزة نوبل عام ١٩٥٢م.
١٩٥٠–١٩٧٠م	تطوير دراسة الخواص والتحليل الكيميائي والفيزيائي للذرات والجزيئات بالرنين المغناطيسي.
١٩٧٠م	بداية المسح التصويري (CT-scanners) بمساعدة الحاسب الآلي لتصوير كيفية توزع الجزيئات المغناطيسية في الأنسجة.
١٩٧١م	**ريموند داماديان (Rayond Damadian)** يوضح أن زمن الاسترخاء يختلف باختلاف أنواع الأنسجة السرطانية مما حفزه ليبدأ في تصميم جهاز للتصوير بالرنين المغناطيسي.
١٩٧٣م–١٩٧٥م	منح **ريتشارد أرنيست (Richard Ernst)** جائزة نوبل، لتطويره الأساليب الرياضية (تحويلات **فورييه**) والرقمية للحصول على الصورة بواسطة المسح المتصل.
١٩٧٧م	حصول **ريموند داماديان** على صورة كاملة للجسم البشري، حيث استغرقت الصورة حوالي خمس ساعات.
١٩٨٠م	تطوير نظم التصوير بواسطة **بيتر ما نسيفيلد (Peter Mansfield)** بالحصول على الصورة في خمس دقائق، ومن ثم في خمس ثوان.
١٩٨٧م	الحصول على صورة دورة ضخ الدم للقلب البشري، وكانت بداية التصوير المغناطيسي الوظيفي (functional MRI).
١٩٩٤م–٢٠٠٠م	استخدام الأساليب الإلكترونية المتقدمة والحاسبات الآلية المطورة مع علم الرياضيات الرقمية للحصول على صورة مستمرة (video image) لمتابعة أنشطة الجسم الحيوية والوظيفية.

● جدول(١) تاريخ تطور التصوير بالرنين المغناطيسي.

● آلية التصوير بالرنين المغناطيسي

بالرغم من أن التصوير بالرنين المغناطيسي قد يبدو عملية معقدة إلا أن بالإمكان تبسيطها عبر النقاط التالية:-

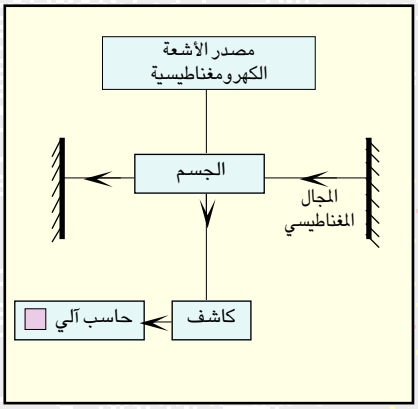
١- يشمل جسم الإنسان البلايين من ذرات الهيدروجين، بدرجات متفاوتة من الكثافة، في كل مكان من الجسم.

٢- عند وضع هذه الذرات في مجال مغناطيسي، تحت ظروف معينة، فإنها تستطيع أن تمتص الموجات اللاسلكية في المجال الكهرومغناطيسي.

٣- يُوضع جسم الإنسان في المجال المغناطيسي ويتم في نفس الوقت توجيه الموجات اللاسلكية نحو جسمه من ناحية وقياس الإمتصاص الذي يحدث لها من الناحية الثانية، وقد يقاس أيضاً الزمن الذي يصاحب تغير شدة الإمتصاص.

٤- بتوجيه الموجات نحو مناطق محددة من الجسم يمكن تسجيل الإمتصاص عند كل منطقة على حدة، حيث تعتمد شدة

● جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي.



● كيفية عمل جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي.

الإمتصاص على كثافة ذرات الهيدروجين في كل مكان من الجسم، وتعتمد الكثافة على طبيعة الخلايا والأنسجة المكونة لكل جزء من الجسم.

٥- يتم تخزين آلاف القياسات في زمن وجيز للمناطق المراد تصويرها في الحاسب الآلي، ثم يعاد ترتيبها وإعادة إبرازها كصورة توضح تباين الكثافة في الأنسجة المختلفة.

٦- بما أن رصد كثافة الإمتصاص يمكن أن يتم عند سطح الجسم أو داخله ـ حسب الحاجة ـ لذلك يمكن السيطرة على مصدر الإشعاع اللاسلكي وتوجيهه إلى الأماكن التي يتم امتصاصه (جزئياً) فيها.

٧- يتم المسح التصويري (Mapping) باستعمال الحاسبات الآلية ـ بطريقة شبيهة بما يتم في عمليات الاستشعار عن بعد ـ بالحصول على صورة لكل نقطة في الجسم المراد تصويره وتجميع النقاط المصورة (بالآلاف أو بالملايين في وقت وجيز) في مخزون إلكتروني بالحاسب ـ تسمى كل وحدة من الصورة (Pixel) ـ ليعاد إبرازها للعرض جنباً إلى جنب لإعطاء الصورة الأصلية.

وتجري عملية المسح عادة على سطح مستو وباختيار نقطة واحدة منه يحدد مكانها بالأحداثيات الثنائية (X,Y)، وبعد مسح جميع النقاط في سطح واحد يمكن الإنتقال إلى السطح الذي يليه في عمق الجسم، وبذلك يتم الحصول على صورة ثلاثية الأبعاد داخل الجسم ـ تسمى عادة بالشريحة (Slice) ـ حيث يمكن تصوير أي عدد من الصور لأي جسم ثلاثي الأبعاد.

وفي حالة الرنين المغناطيسي فان الصورة عبارة عن تغيرات شدة الإمتصاص للأشعة الكهرومغناطيسية عند كل نقطة في كل سطح أو شريحة.

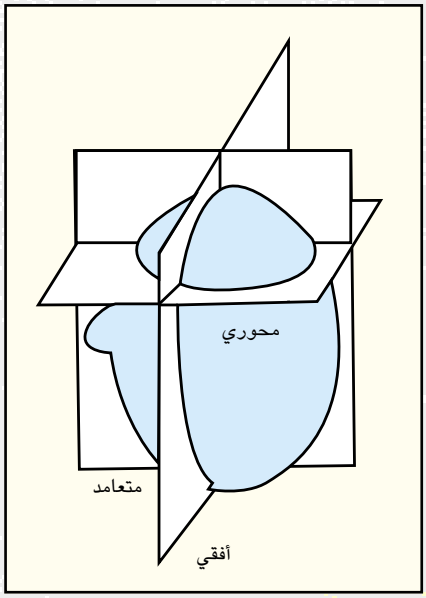
مزايا التصوير بالرنين المغناطيسي

تلاحقت التطورات التي تلت التصميم العملي لأول جهاز تصوير بالرنين المغناطيسي في عام ١٩٧٧م بسرعة كبيرة واستفادت كثيراً من تطور الحاسبات الآلية وتطور الإلكترونيات، مما أدى إلى انتشارها بصورة مذهلة، وذلك لتميزها بما يلي:

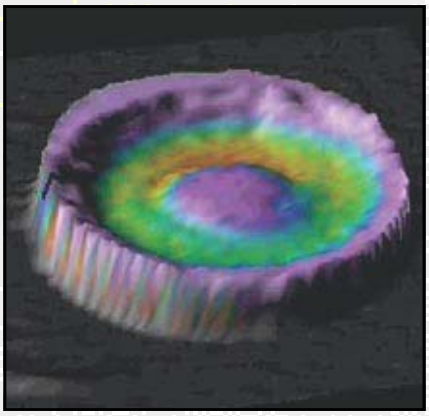
ـ يمكن أن تلتقط الصور لأي مكان من الجسم وبأي اتجاه أثناء وجود المريض داخل جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي دون لمس أو تحريك جسم المريض بأي شكل من الأشكال، ولذلك يمكن تصوير الرأس، الصدر البطن أو القدمين في أي مكان.

ـ التصوير بسرعة عالية تقارب سرعات التصوير بكاميرا الفيديو.

ـ الحصول على ما يسميه الأطباء بالمقاطع المحورية والأفقية (axial and coronal) والمستويات المتعامدة عليها والتي تستعمل لتحديد اتجاه التصوير في الجسم.وهذه



● إتجاهات التصوير بالرنين المغناطيسي.



● صورة مجهرية لخلية.

الإمكانية يتميز بها التصوير بالرنين المغناطيسي عن التصوير بالأشعة السينية الذي يتطلب تغيير وضع المريض كلما كانت هناك حاجة للتصوير في اتجاه آخر.

ـ لا تمثل أجهزة خطرة ولا تسبب أذى في الظروف العادية للمريض أو العاملين في المستشفيات.

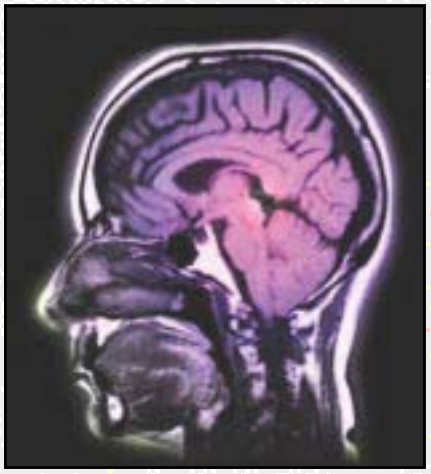
ـ تمتاز الأجهزة الحديثة بأن التقاط الصور بها لاتسبب ضيقاً أو أذى للمريض.

ـ لا يحتاج المريض في معظم الحالات إلى درجة كبيرة من الإعداد قبل عمل الصور ماعدا بعض الحالات الخاصة التي يتم فيها تجهيزه بجرعات من مواد تساعد على زيادة تباين الصورة ووضوحها، وتحقن هذه المواد أو تعطى بالفم، وهي غير ضارة وغير مؤلمة.

ـ يمكن الآن استخدام التصوير بالرنين المغناطيسي ـ إضافة إلى الصور الساكنة داخل جسم الإنسان ـ لمتابعة نشاط أعضاء معينة من الجسم تحت مايسمى بالتصوير الوظيفي بالرنين المغناطيسي (Functional Magnetic Resonance Imaging- FMRI) مثل: ضخ الدم عبر القلب، أو التنفس في الرئة، أو حتى متابعة نشاط المخ في حالات التفكير المختلفة، أو الاستجابة للمؤثرات الخارجية، أو النشاط العضلي.

ـ الحصول على صور مجهرية دقيقة (Microscopic MRI) مثل صور البكتيريا والفيروسات.

ـ يمكن ربطها مع الأجهزة المكبرة للصورة والأجهزة التي تستخدم الإلكترونات في المجاهر الخاصة مما يساعد الباحثين على

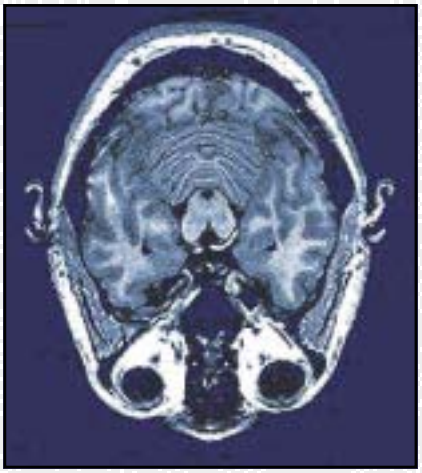


● صورة جانبية للرأس.

الحصول على صور دقيقة بأساليب عديدة توفر لهم ثروة من المعلومات عن طبيعة المواد التي يدرسونها.

التطبيقات الطبية للرنين المغناطيسي

تعتمد التطبيقات الطبية التي تستخدم التصوير بالرنين المغناطيسي بصورة أساسية على وضوح الأسلوب للتصوير ومرونته العالية، بالإضافة إلى السلامة عند التعرض أو استعمال أجهزة المغناطيس. وليس هناك ثمة خطر يرتبط باستخدام هذه الأجهزة إلا أن تكون هناك بعض المواد الفلزية أو المغناطيسية في جسم المريض نتيجة لعمليات طبية سابقة، مثل وضع المسامير لربط العظام أو وجود منظم لضربات القلب. وفي هذه الحالات يجب دراسة حالة المريض بعناية قبل تعريضه للمجال المغناطيسي العالي الذي تستخدمه أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي.



● صورة محورية للرأس بمنطقة الدماغ.

وبالرغم من ارتفاع أسعار الأجهزة إلا أن معظم المستشفيات الآن قد حصلت عليها أو تسعى للحصول عليها، ولا يكاد يخلو مستشفى في دول العالم المتقدم منها. ويرى كثير من الباحثين أن هذه الأجهزة أدوات تشخيصية ضرورية ولا غنى عنها في الطب الحديث، ويتزايد بخطى حثيثة استعمالها كأجهزة لدراسة النواحي الوظيفية (الفيزيولوجية) في الجسم البشري في كثير من المستشفيات ومراكز الأبحاث.

ويمكن تلخيص التطبيقات الطبية الأساسية الهامة التي تستدعي استعمال التصوير بالرنين المغناطيسي فيما يلي :

١ـ دراسة الأورام في المخ والغدد وغيرها من الأنسجة النشطة التي تتضرر كثيراً من الأشعة المؤينة مثل الأشعة السينية.

٢ـ دراسة التهابات المخ والعمود الفقري والفواصل بين العظام.

٣ـ دراسة الروابط الممزقة في الرسغ والركبة والكاحل والقفص الصدري والكتف.

٤ـ تقدير كميات الأنسجة المختلفة ، الصلبة واللينة منها، وتحديد كميات الماء فيها.

٥ـ التعرف على أمراض العظام وطبيعة نموها.

٦ـ متابعة حركة الدم في الأوردة والشرايين وتشخيص الجلطات في مراحلها المكبرة.

٧ـ دراسة التنفس عبر الرئة وكفاءة عملية الإستفادة من الأكسجين.

٨ ـ التعرف المبكر على مرض تدهور العضلات أو تأخر نموها.

مستقبل الرنين المغناطيسي

لا يزال التصوير بالرنين المغناطيسي يافعاً حيث لا يزيد عمره الفعلي في المستشفيات عن بضعة عشر عاماً، ولا زالت هناك مساعي علمية ونظرية حثيثة لتطويره ليصبح أكثر فعالية وفائدة، وليصبح أقل تكلفة وأصغر حجماً ليكون في متناول الجميع، ولن يستغرق الأمر طويلاً (إن شاءالله) لكي تصبح صورة الرنين المغناطيسي هي الصورة المفضلة على صورة الأشعة السينية في معظم الحالات الطبية، و ستكون هي الصورة التي سيطلبها الطبيب لتعاونه في تشخيص الحالة والصورة التي يطمئن لها المريض ولا يخشى من مضاعفات جانبية من تأثيراتها.

● صورة جانبية للعمود الفقري.

● صورة مجهرية لركبة مريضة (أ) وأخرى سليمة (ب).