اصول پایه‌ای MRI (تصویربرداری با رزونانس مغناطیسی)

تصویربرداری با رزونانس مغناطیسی (MRI) یک روش پیشرفته برای تصویربرداری غیرتهاجمی از بافت‌های داخلی بدن است. این تکنیک از میدان‌های مغناطیسی و امواج رادیویی برای ایجاد تصاویری با وضوح بالا از ساختارهای بدن استفاده می‌کند. در این بخش، اصول پایه‌ای MRI شامل مفهوم میدان مغناطیسی، اصول کارکرد اسپین‌های هسته‌ای و تکنیک‌های تصویربرداری مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

1.1 میدان مغناطیسی و اثر آن بر اسپین‌ها

در ابتدا، برای استفاده از MRI، یک میدان مغناطیسی قوی در سراسر بدن بیمار ایجاد می‌شود. بیشتر اتم‌های بدن، مانند هیدروژن که در آب و چربی‌های بدن موجود است، دارای

هسته‌های با اسپین (Spin) هستند. هنگامی که بدن در معرض این میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، این اسپین‌ها به طور خودکار در جهت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند.

اسپین‌ها به طور طبیعی تمایل دارند که به حالت پایین‌ترین انرژی خود برسند. به همین دلیل، وقتی یک میدان مغناطیسی خارجی ایجاد می‌شود، اسپین‌ها یا موافق میدان قرار می‌گیرند یا مخالف آن.

1.2 پالس فرکانس رادیویی و تحریک اسپین‌ها

برای ایجاد سیگنال در MRI، از پالس‌های فرکانس رادیویی (RF) استفاده می‌شود. این پالس‌ها به طور موقت اسپین‌ها را از وضعیت تعادلی خود خارج می‌کنند. پالس RF با فرکانس خاصی که به آن "فرکانس لامور" گفته می‌شود، به

اسپین‌ها انرژی می‌دهد و آن‌ها را از جهت میدان مغناطیسی خارج می‌کند.

فرکانس لامور ($_Lf$) برای هر هسته‌ای به‌ویژه هیدروژن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$_0B \cdot \gamma = {}_Lf$$

که در آن:

- $_Lf$: فرکانس لامور
- γ: نسبت گِیروماژنتیک هسته (مقدار ثابت برای هر نوع هسته)
- $_0B$: شدت میدان مغناطیسی خارجی.

1.3 بازیابی اسپین‌ها و سیگنال MRI

بعد از اعمال پالس RF، اسپین‌ها از حالت تعادلی خود خارج

می‌شوند و سپس به تدریج به حالت تعادلی خود برمی‌گردند. زمانی که اسپین‌ها به حالت تعادلی باز می‌گردند، انرژی آزاد می‌شود که به صورت سیگنال‌های رادیویی قابل اندازه‌گیری است. این سیگنال‌ها توسط آنتن‌های گیرنده MRI دریافت می‌شوند.

زمان‌هایی که اسپین‌ها به وضعیت تعادلی باز می‌گردند، زمان‌هایی به نام **زمان آرامش طولی** ($T1$) و **زمان آرامش عرضی** ($T2$) تعریف می‌شود. این دو زمان به طور دقیق فرآیند بازیابی اسپین‌ها را توصیف می‌کنند.

زمان آرامش طولی (T1):
این زمان به مدت زمانی اطلاق می‌شود که طول می‌کشد تا اسپین‌ها به 63% از وضعیت تعادلی طولی خود برسند.

زمان آرامش عرضی (T2):
این زمان نشان‌دهنده مدت زمانی است که اسپین‌ها برای رسیدن به 37% از وضعیت تعادلی عرضی خود به زمان نیاز دارند.

1.4 تصویربرداری MRI: ترکیب داده‌ها

سیگنال‌های رادیویی که از اسپین‌ها به‌دست می‌آیند توسط سیستم رایانه‌ای تجزیه و تحلیل می‌شوند. سپس این سیگنال‌ها برای تولید تصاویر به هم ترکیب می‌شوند. در نهایت، بر اساس زمان‌های $T1$ و $T2$، تصاویر با وزن‌دهی خاص تولید می‌شوند.

تصاویر با وزن‌دهی $T1$:

این نوع تصاویر بیشتر ویژگی‌های بافت‌های چربی و مایعات را نمایش می‌دهند.

تصاویر با وزن‌دهی $T2$:

تصاویر $T2$-وزن‌دار بیشتر ویژگی‌های مایعات در بدن مانند مایع مغزی نخاعی و التهاب‌ها را بهتر نشان می‌دهند.

1.5 مراحل اصلی در MRI

1. **قرار گرفتن در میدان مغناطیسی:**

بیمار به درون یک میدان مغناطیسی قوی وارد می‌شود

که باعث هم‌جهت شدن اسپین‌ها در جهت میدان مغناطیسی می‌شود.

2. **اعمال پالس RF:**
پالس RF برای تحریک اسپین‌ها به‌کار می‌رود و آن‌ها را از وضعیت تعادلی خود خارج می‌کند.

3. **بازیابی اسپین‌ها و اندازه‌گیری سیگنال:**
اسپین‌ها به تدریج به حالت تعادلی باز می‌گردند و سیگنال‌هایی از خود تولید می‌کنند که توسط گیرنده‌های MRI ثبت می‌شود.

4. **پردازش داده‌ها:**
سیگنال‌های دریافتی توسط رایانه تجزیه و تحلیل می‌شوند و تصویری از ناحیه مورد نظر تولید می‌شود.

1.6 جدول توضیحی ویژگی‌های زمان‌های آرامش $T1$ و $T2$

ویژگی	زمان آرامش طولی ($T1$)	زمان آرامش عرضی ($T2$)
تعریف	زمان بازیابی اسپین‌ها به حالت تعادلی در جهت طولی	زمان بازیابی اسپین‌ها به حالت تعادلی در جهت عرضی
کاربرد در تصویربرداری	تصویرسازی از بافت‌های چربی و مایعات	تصویرسازی از بافت‌های با ویژگی‌های مایع مانند مغز
مقدار در بافت‌های مختلف	بافت چربی: $T1$ بیشتر، بافت آب: $T1$ کمتر	بافت چربی: $T2$ کمتر، بافت آب: $T2$ بیشتر

2. پالس فرکانس رادیویی (RF Pulse)

پالس‌های فرکانس رادیویی (RF pulses) در اساس‌نامه MRI برای تحریک اسپین‌ها و تغییر وضعیت آن‌ها در میدان مغناطیسی کاربرد دارند. این پالس‌ها معمولاً با فرکانس‌هایی در محدوده رادیویی عمل می‌کنند که به فرکانس لامور مربوط به هسته‌های خاص مانند هیدروژن همخوانی دارند.

2.1 عملکرد پالس RF

پالس RF که معمولاً با فرکانس خاص و مدت زمان مشخص به بافت بدن اعمال می‌شود، باعث می‌شود که اسپین‌ها از حالت تعادلی خود خارج شوند. وقتی اسپین‌ها در میدان مغناطیسی خارجی قرار دارند، در وضعیت پایدار خود به‌طور موازی یا مخالف با میدان مغناطیسی می‌چرخند. هنگامی که پالس RF به‌طور دقیق اعمال می‌شود، انرژی‌ای که به اسپین‌ها منتقل می‌شود آن‌ها را از وضعیت پایین انرژی خود به وضعیت بالا انرژی منتقل می‌کند و بدین ترتیب اسپین‌ها به حالت ناپایدار می‌روند.

2.2 فرکانس RF و فرکانس لامور

فرکانس RF باید با فرکانس لامور همخوانی داشته باشد تا انرژی کافی برای تحریک اسپین‌ها فراهم شود. فرکانس لامور برای هسته‌های مختلف مانند هیدروژن متفاوت است. در حالت کلی، این فرکانس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$_0B \cdot \gamma = {}_Lf$$

که در آن:

- $_Lf$ فرکانس لامور است.
- γ نسبت ژیرومغناطیسی هسته (یک ثابت برای هسته‌های مختلف).
- $_0B$ شدت میدان مغناطیسی است.

2.3 زمان پالس RF و زاویه تیلت اسپین

مدت زمان پالس RF و قدرت آن تأثیر مستقیمی بر زاویه تیلت اسپین دارند. زمانی که یک پالس RF با مدت زمان و

شدت مناسب به بافت اعمال می‌شود، اسپین‌ها در یک زاویه مشخص از جهت میدان مغناطیسی خارج می‌شوند.

- پالس 90 درجه: اسپین‌ها را به طور کامل از جهت تعادلی خود به سمت صفحه عرضی (یا صفحه عمود بر میدان مغناطیسی) می‌چرخاند.
- پالس 180 درجه: اسپین‌ها را به طور کامل از صفحه عرضی به حالت مخالف جهت تعادلی می‌چرخاند.

2.4 فرمول زاویه تیلت اسپین

اگر مدت زمان پالس RF به اندازه کافی باشد، می‌توان زاویه‌ای که اسپین‌ها نسبت به میدان مغناطیسی می‌سازند را به‌طور دقیق محاسبه کرد. زاویه تیلت اسپین (θ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta t \cdot {}_1B \cdot \gamma = \theta$$

که در آن:

- θ: زاویه تیلت اسپین.
- γ: نسبت ژیرومغناطیسی هسته.
- ${}_1B$: شدت میدان RF.
- Δt: مدت زمان اعمال پالس RF.

2.5 جدول کاربرد پالس‌های RF

نوع پالس	هدف	زاویه تیلت	کاربردها
پالس 90 درجه	تحریک اسپین‌ها به طور کامل در صفحه عرضی	90 درجه	شروع فرآیند تصویربرداری، جمع‌آوری سیگنال
پالس 180 درجه	معکوس کردن جهت اسپین‌ها	180 درجه	استفاده در اسپین اکو و بازیابی معکوس
پالس‌های کوتاه	تحریک جزئی اسپین‌ها و ایجاد سیگنال‌های جزئی	کمتر از 90 درجه	استفاده در تکنیک‌های اشباع جزئی

نتیجه‌گیری

MRI از یک سری اصول پیچیده فیزیکی برای تولید تصاویری با کیفیت بالا از ساختارهای داخلی بدن استفاده می‌کند. این اصول شامل میدان مغناطیسی، پالس‌های RF، زمان‌های آرامش $T1$ و $T2$، و تکنیک‌های مختلف تصویربرداری هستند. پالس‌های RF نقش مهمی در تحریک اسپین‌ها و ایجاد سیگنال‌های رادیویی دارند که در نهایت به تولید تصاویر دقیق از بافت‌ها منجر می‌شود.