فهرست مطالب

پیشگفتار مترجم ۷

پیشگفتار مولف برای چاپ پنجم ۸

کلمات اختصاری ۹

فهرست اصطلاحات ۱۲

فصل اول: اصول پایه ۱۵

مقدمه	۱۵	حرکت تقدیمی و فرکانس تقدیمی (لارمور)	۲۴
ساختار اتمی	۱۶		
حرکت در اتم	۱۶	فاز حرکت تقدیمی	۲۷
هسته‌های فعال MR	۱۸	تشدید	۲۸
هسته هیدروژن	۱۹	سیگنال MRI	۳۳
هم‌راستایی	۲۰	سیگنال فروپاشی القایی آزاد (FID)	۳۴
بردار مغناطیسی خالص (NMV)	۲۲	پارامترهای زمان‌بندی پالس	۳۵

فصل سوم: وزن تصویر و کنتراست ۳۷

مقدمه	۳۷	آسایش در بافت‌های مختلف	۴۵
کنتراست تصویر	۳۷	کنتراست T1	۴۸
آسایش	۳۸	کنتراست T2	۵۲
بازیابی T1	۳۹	کنتراست چگالی پروتون	۵۳
فروپاشی T2	۴۰	وزن‌دهی	۵۳
مکانیسم‌های کنتراست	۴۴	مکانیسم‌های دیگر کنتراست	۶۳

فصل سوم: توالی پالس اسپین-اکو ۶۹

مقدمه	۶۹	بازیافت معکوس (IR)	۸۹
RF دوباره هم‌فازکننده	۷۰	بازیافت معکوس با تاو کوتاه (STIR)	۹۳
اسپین-اکوی معمولی	۷۵	بازیافت معکوس با تضعیف مایع (FLAIR)	۹۵
اسپین-اکوی سریع یا توربو (FSE/TSE)	۷۸		

فصل چهارم: توالی‌های پالس گرادیان اکو ۹۹

مقدمه	۹۹	گرادیان اکوی ناهمدوس یا تخریب شده	۱۱۸
زاویه چرخش متغیر	۱۰۰	گرادیان اکو با اکوی معکوس	۱۲۲
گرادیان دوباره هم‌فازکننده	۱۰۱	گرادیان اکوی متعادل‌شده	۱۲۷
وزن‌دهی در توالی‌های پالس گرادیان اکو	۱۰۴	گرادیان اکوی سریع	۱۳۰
گرادیان اکوی همدوس یا بازگشتی	۱۱۵	تصویربرداری اکو صفحه‌ای	۱۳۰

فصل پنجم: کدگذاری فضایی	۱۳۵		
مقدمه	۱۳۵	کدگذاری فرکانس	۱۴۷
مکانیسم گرادیان‌ها	۱۳۶	کدگذاری فاز	۱۵۰
محورهای گرادیان‌ها	۱۴۰	جمع‌بندی همه با هم - زمان‌بندی توالی پالس	۱۵۶
انتخاب برش	۱۴۲		

فصل ششم: فضای k	۱۶۱		
مقدمه	۱۶۱	بخش ۳: چند واقعیت مهم درباره فضای k!	۱۸۴
بخش ۱: فضای k چیست؟	۱۶۲	بخش ۴: توالی‌های پالس چگونه فضای k را پر می‌کنند؟	۱۹۷
بخش ۲: داده‌ها چگونه به‌دست می‌آیند و تصاویر چگونه از این داده‌ها ساخته می‌شوند؟	۱۶۸	بخش ۵: روش‌های مختلف پر کردن فضای k	۱۹۹

فصل هفتم: بهینه سازی پروتکل	۲۰۹		
مقدمه	۲۰۹	زمان تصویربرداری	۲۳۶
نسبت سیگنال به نویز (SNR)	۲۱۰	موازنه‌ها	۲۳۶
نسبت کنتراست به نویز (CNR)	۲۲۵	توسعه و اصلاح پروتکل	۲۳۹
قدرت تفکیک فضایی	۲۳۱		

فصل هشتم: آرتیفکت‌ها	۲۴۱		
مقدمه	۲۴۱	آرتیفکت سایه	۲۷۳
نگاشت نابجای فاز	۲۴۲	آرتیفکت Moiré	۲۷۴
الایزینگ	۲۵۲	زاویه جادویی	۲۷۵
آرتیفکت جابه‌جایی شیمیایی	۲۵۹	ایرادات تجهیزات	۲۷۶
حذف سیگنال ناهم‌فاز	۲۶۳	آرتیفکت‌های جریان	۲۷۷
آرتیفکت پذیرفتاری مغناطیسی	۲۶۷	آنژیوگرافی وابسته به جریان (بدون کنتراست)	۲۹۳
آرتیفکت بریده‌شدگی	۲۶۹	تصویربرداری خون سیاه	۲۹۸
تداخل-تحریک / تداخل-سیگنال	۲۷۰	MRA با کنتراست فاز	۳۰۰
آرتیفکت زیپ	۲۷۲		

فصل نهم: ابزار و تجهیزات	۳۰۵		
مقدمه	۳۰۵	سیستم شیم	۳۲۱
خاصیت مغناطیسی	۳۰۶	سیستم گرادیان	۳۲۳
پیکربندی‌های سیستم	۳۰۹	سیستم RF	۳۲۹
سیستم مگنت	۳۱۱	سیستم انتقال بیمار	۳۳۵
محافظ مگنت	۳۱۹	سیستم رایانه و رابط کاربر گرافیکی	۳۳۶

فصل دهم: ایمنی MRI	۳۳۹		
مقدمه (و سلب مسئولیت)	۳۳۹	میدان‌های مغناطیسی گرادیان متغیر با زمان	۳۵۵
تعاریف مورد استفاده در ایمنی MRI	۳۴۰	مخلوط‌های سرمازا	۳۵۸
تاثیرات روان‌شناختی	۳۴۲	نکات ایمنی	۳۶۰
میدان ایستا متغیر با مکان	۳۴۳	منابع اضافی	۳۶۱
میدان‌های الکترومغناطیسی (رادیویی)	۳۴۹		

پیشگفتار مترجم

امروزه تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI) یکی از فعال‌ترین و هیجان‌انگیزترین حوزه‌ها در علم، فناوری و پزشکی بوده است و داده‌های مهمی را در زمینه‌های مختلف به ویژه تشخیص پزشکی ارائه می‌دهد. همچنین اخیرا MRI، به عنوان یکی از معتبرترین ابزارهای ارزیابی اعصاب روانشناختی جایگاه ویژه‌ای کسب کرده است. بنابراین ضرورت کسب آگاهی نسبت به این روش تصویربرداری در میان دانشجویان رشته‌های مختلف مرا بر آن داشت که کتاب حاضر را که یکی از معتبرترین و پرفروش‌ترین کتاب‌ها در زمینه MRI در دنیا است را ترجمه کنم.

ویژگی کتاب حاضر نسبت به کتاب‌های مشابه در زمینه فیزیک MRI، این است که مفاهیم پیچیده و دشوار MRI به ساده‌ترین شکل ممکن توضیح داده شده است و استفاده از تشبیه‌های ملموس و انیمیشن‌ها در سراسر کتاب فهم پیچیدگی‌های فیزیک MRI را بسیار ساده‌تر کرده است. هم‌چنین ارائه نکات تصویربرداری در کتاب، تئوری را به عمل پیوند داده است تا دانشجویان هر چه بیش‌تر و بهتر با نکات عملی و کاربردی دستگاه آشنا شوند. با توجه به این‌که دانشجویان علوم پزشکی علاقه چندانی به ریاضیات ندارند، به‌نظر می‌رسد این کتاب برای آن‌ها بسیار مفید باشد. امید است که ترجمه این کتاب، گام مهمی در راستای آشنایی دانشجویان و متخصصین رادیولوژی با اصول و تکنولوژی‌های جدید MRI بردارد.

در این کتاب سعی شده است برگردان فارسی واژه‌ها و اصطلاحات تا حد امکان به معادل‌های مرسوم نزدیک باشد. با این حال، ممکن است بعضی از واژه‌ها ناآشنا باشند و به همین دلیل در بسیاری از موارد، واژه اصلی انگلیسی به صورت زیرنویس آورده شده است. در ضمن در واژه‌نامه انتهای کتاب، بسیاری از واژه‌ها و اصطلاحات کتاب به‌خوبی تعریف شده است که پیشنهاد می‌شود حتما مطالعه گردد.

برای دسترسی به انیمیشن‌های کتاب می‌توانید به وب‌سایت پشتیبانی کتاب که آدرس آن در انتهای هر فصل آورده شده است، مراجعه کنید. نحوه دسترسی در انتهای فصل اول توضیح داده شده است.

از این کتاب با اطمینان خاطر می‌توان برای تدریس به دانشجویان کارشناسی تکنولوژی پرتوشناسی، پزشکی هسته‌ای، کارشناسی‌ارشد و دکتری فناوری تصویربرداری پزشکی، فیزیک پزشکی، دکتری علوم اعصاب و دستیاران رادیولوژی استفاده کرد.

در پایان مراتب قدردانی و سپاس خود را از جناب آقای امامی زاده، مدیریت فرهیخته و هوشمند انتشارات رویان پژوه ابراز می‌نمایم.

دکتر گلشن محمودی

زمستان ۱۴۰۲

پیشگفتار مولف برای چاپ پنجم

برند MRI کاربردی هم‌چنان با قدرت در حال رشد است. ویرایش چهارم MRI کاربردی یکی از پرفروش‌ترین کتاب‌های دنیا است و به چندین زبان ترجمه شده است. در زمان نگارش، ۲۶ سال است دوره آموزشی MRI کاربردی برگزار می‌گردد. دوره را به بیش از ۱۰۰۰۰ نفر در بیش از ۲۰ کشور ارائه کرده‌ایم و یک جامعه آنلاین MRI کاربردی بزرگ و رو به رشد داریم. خوانندگان و نمایندگان دوره ما شامل متخصصان مختلفی مانند پرتوکاران، تکنولوژیست‌ها، رادیولوژیست‌ها، رادیوتراپیست‌ها، دام‌پزشکان، تکنولوژیست‌های پزشکی هسته‌ای، دانشجویان رادیولوژی، دانشجویان تحصیلات تکمیلی، دانشجویان پزشکی، فیزیک‌دانان و مهندسان هستند.

فروش منحصر به فرد MRI کاربردی به دلیل رویکرد همیشه کاربرپسند آن به فیزیک بوده است. مفاهیم دشوار به ساده‌ترین شکل ممکن توضیح داده می‌شوند و به‌وسیله نمودارها، تصاویر و انیمیشن‌های واضح پشتیبانی می‌شوند. پزشکان بالینی معمولا علاقه‌ای به صفحات ریاضی ندارند و فقط می‌خواهند بدانند که اساسا چگونه کار می‌کند. ما معتقدیم که MRI کاربردی بسیار محبوب است، زیرا به زبان شما صحبت می‌کند بدون این‌که بیش از حد ساده باشد.

این ویرایش پنجم تغییرات اساسی چشم‌گیری داشته است و به طور خاص از نقاط قوت برند MRI کاربردی استفاده می‌کند. ما بین کتاب و دوره هم‌افزایی ایجاد کرده‌ایم تا بتوانند به بهترین نحو از یادگیری شما حمایت کنند. ما در این ویرایش به طور هدف‌مند بر روی فیزیک و مفاهیم اساسی تمرکز می‌کنیم. مهم است که اصول اولیه را به‌درستی درک کنید، زیرا آن‌ها زمینه‌های تخصصی بیش‌تری از عمل را تشکیل می‌دهند. فصل‌های کاملا جدیدی در مورد تجهیزات و ایمنی MRI، و فصل‌های تجدیدنظر شده و گسترده‌شده در توالی‌های پالس گرادیان اکو، فضای k، آرتیفکت‌ها و آنژیوگرافی وجود دارد. نکات و قیاس‌های یادگیری بسیار محبوب از ویرایش‌های قبلی گسترش یافته و تجدیدنظر شده است. هم‌چنین یک واژه‌نامه جدید، تعداد زیادی نمودار و تصاویر جدید، و پیشنهاداتی برای مطالعه بیشتر برای کسانی که مایل به کاوش عمیق در فیزیک هستند، وجود دارد. وب سایت شامل سوالات جدید و انیمیشن‌های اضافی اضافه شده است. ما همچنین برخی رابطه‌های ریاضی را در این نسخه گنجانده‌ایم، اما نگران نباشید: آن‌ها فقط برای کسانی هستند که روابط ریاضی را دوست دارند و معنای آن‌ها را به سبک کاربر پسند توضیح می‌دهیم.

با این حال، احتمالا مهم‌ترین تغییر در این ویرایش قرار دادن نکات تصویربرداری است. در سراسر کتاب، توجه شما به نحوه کاربرد تئوری در عمل جلب می‌شود. نکات تصویربرداری به طور خاص برای هشدار دادن به شما در مورد آنچه که در "پشت صحنه" اتفاق می‌افتد، هنگام انتخاب یک پارامتر در پروتکل تصویربرداری استفاده می‌شود. امیدواریم این به شما کمک کند تا میان تئوری و عمل ارتباط برقرار کنید. فیزیک به صورت مجزا برای پزشک بالینی ارزش کمی دارد. آن‌چه مهم است نحوه به کارگیری این دانش است. ما از فلسفه MRI کاربردی حمایت می‌کنیم که فیزیک لازم نیست دشوار باشد، و امیدواریم که خوانندگان ما، قدیم و جدید، این تغییرات را مفید بدانند. ریچارد فاینمن، که یکی از بهترین معلمان فیزیک در تمام دوران به شمار می‌رود، به دلیل توانایی خود در انتقال درک عمیق خود از فیزیک به صفحه‌ای با وضوح و حداقل هیاهو مشهور بود. او معتقد بود که پیچیده‌تر کردن فیزیک بیش از حد لازم نیست.

آرزوی ما این است که ویرایش پنجم MRI کاربردی از طرز تفکر او تقلید کند. ما امیدواریم که بسیاری از طرفداران MRI کاربردی در سراسر جهان هم‌چنان از آن لذت ببرند و از آن بیاموزند. یک تشکر بزرگ از شما برای حمایت مداوم و خواندن شاد!

کاترین وستبروک- جان تالبوت

نوامبر ۲۰۱۷، انگلستان

فصل اول

اصول پایه

مقدمه	۱۵	حرکت تقدیمی و فرکانس تقدیمی (لارمور)	۲۴
ساختار اتمی	۱۶		
حرکت در اتم	۱۶	فاز حرکت تقدیمی	۲۷
هسته‌های فعال MR	۱۸	تشدید	۲۸
هسته هیدروژن	۱۹	سیگنال MRI	۳۳
هم‌راستایی	۲۰	سیگنال فروپاشی القایی آزاد (FID)	۳۴
بردار مغناطیسی خالص (NMV)	۲۲	پارامترهای زمان‌بندی پالس	۳۵

پس از مطالعه این فصل، شما قادر خواهید بود:

- *ساختار اتم را توصیف کنید.*
- *مکانیسم‌های هم‌راستایی و حرکت تقدیمی را توضیح دهید.*
- *مفهوم تشدید و تولید سیگنال را درک کنید.*

مقدمه

اصول پایه تصویربرداری تشدید مغناطیسی[1] (MRI)، اساس درک بیشتر این موضوع پیچیده را تشکیل می‌دهد. فهم این ایده‌ها پیش از پرداختن به موضوعات پیچیده‌تر در این کتاب بسیار مهم است.

اساسا دو راه برای توضیح اصول MRI وجود دارد: به شکل کلاسیک و از طریق مکانیک کوانتومی. **نظریه کلاسیک**[2] (منتسب به اسحاق نیوتون[3] و اغلب نظریه نیوتونی نامیده می‌شود) یک دیدگاه مکانیکی از این که جهان (و در نتیجه MRI) چگونه کار می‌کند را ارائه می‌دهد. در نظریه کلاسیک، MRI با استفاده از مفاهیم جرم، اسپین و گشتاور زاویه‌ای در یک مقیاس بزرگ توضیح داده می‌شود. **نظریه کوانتومی**[4]

1. Magnetic Resonance Imaging
2. Classical theory
3. Isaac Newton
4. Quantum theory

(منتسب به چندین نفر از جمله ماکس پلانک[1]، آلبرت انیشتین[2] و پل دیراک[3]) در یک مقیاس بسیار کوچک‌تر و زیر اتمی کار می‌کند و به سطوح انرژی پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌ها اشاره دارد. اگرچه نظریه کلاسیک اغلب برای توصیف اصول فیزیکی در مقیاس بزرگ و نظریه کوانتومی در سطح زیر اتمی استفاده می‌شود، شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد تمام اصول فیزیکی با استفاده از مفاهیم کوانتومی توضیح داده می‌شوند [۱]. با این حال، برای اهداف ما، این فصل عمدتا بر دیدگاه‌های کلاسیک متکی است زیرا درک آن‌ها به طور کلی آسان‌تر است. نظریه کوانتومی در صورت لزوم فقط برای ارائه جزییات بیشتر استفاده می‌شود.

در این فصل، به بررسی خصوصیات اتم‌ها و برهم‌کنش آن‌ها با میدان مغناطیسی و هم‌چنین مکانیسم‌های تحریک و آسایش می‌پردازیم.

ساختار اتمی

همه چیز از **اتم** ساخته شده است. دو یا چند اتم در کنار هم قرار می‌گیرند و **مولکول‌ها** را تشکیل می‌دهند. فراوان‌ترین مولکول در بدن انسان **هیدروژن** است، اما عناصر دیگری همچون اکسیژن، کربن و نیتروژن نیز وجود دارند. هیدروژن بیشتر در مولکول‌های آب (که در آن دواتم هیدروژن در کنار یک اتم اکسیژن قرار گرفته‌اند؛ H_2O) و چربی (که در آن اتم‌های هیدروژن در کنار اتم‌های کربن و اکسیژن قرار گرفته‌اند؛ تعداد اتم‌ها به نوع چربی بستگی دارد) یافت می‌شود.

اتم از یک هسته مرکزی و الکترون‌هایی که پیرامون هسته می‌چرخند، تشکیل شده است (شکل ۱-۱). هسته بسیار کوچک و در حد یک میلیونم یک میلیاردم حجم کل یک اتم است، اما جرم کل اتم را تشکیل می‌دهد. این جرم عمدتا از ذراتی به نام نوکلئون[4] تشکیل شده است که شامل پروتون‌ها و نوترون‌ها می‌باشد. اتم‌ها به دو صورت مشخص می‌شوند:

- **عدد اتمی**، که مجموع پروتون‌های هسته است. این عدد به اتم هویت شیمیایی آن را می‌دهد.
- **عدد جرمی** یا **وزن اتمی**، که مجموع تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های هسته است.

تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها در یک هسته معمولا متعادل است، به طوری که عدد جرمی عددی زوج می‌باشد، هرچند در برخی از اتم‌ها، تعداد نوترون‌ها کمی بیشتر یا کمتر از تعداد پروتون‌ها است. اتم‌های عناصری که تعداد پروتون مشابه اما تعداد نوترون متفاوتی دارند، **ایزوتوپ** نامیده می‌شوند.

الکترون‌ها ذراتی هستند که پیرامون هسته می‌چرخند. پیش از ارائه نظریه کوانتومی، مشابه چرخش سیارات پیرامون خورشید، برای حرکت الکترون‌ها نیز لایه‌هایی جداگانه در نظر گرفته می‌شد. اما طبق نظریه کوانتومی، موقعیت یک الکترون قابل پیش‌بینی نیست و به انرژی الکترون در هر لحظه از زمان بستگی دارد (این اصل عدم قطعیت هایزنبرگ[5] نام دارد).

تعدادی از ذرات اتم دارای بار الکتریکی می‌باشند. پروتون‌ها دارای بار الکتریکی مثبت، نوترون‌ها بدون بار و الکترون‌ها دارای بار الکتریکی منفی هستند. اگر تعداد الکترون‌ها با بار الکتریکی منفی با تعداد پروتون‌ها با بار الکتریکی مثبت برابر باشند، اتم از نظر الکتریکی پایدار و خنثی است. گاهی اوقات این تعادل بار الکتریکی با انرژی دادن به الکترون و خارج کردن آن از اتم تغییر می‌کند. با این کار تعداد الکترون‌ها نسبت به تعداد پروتون‌ها کمتر و سبب ناپایداری الکتریکی در اتم می‌شود. اتم‌ها در چنین حالتی یون نامیده می‌شوند و فرایند خارج کردن الکترون از اتم را **یونش**[6] می‌نامند.

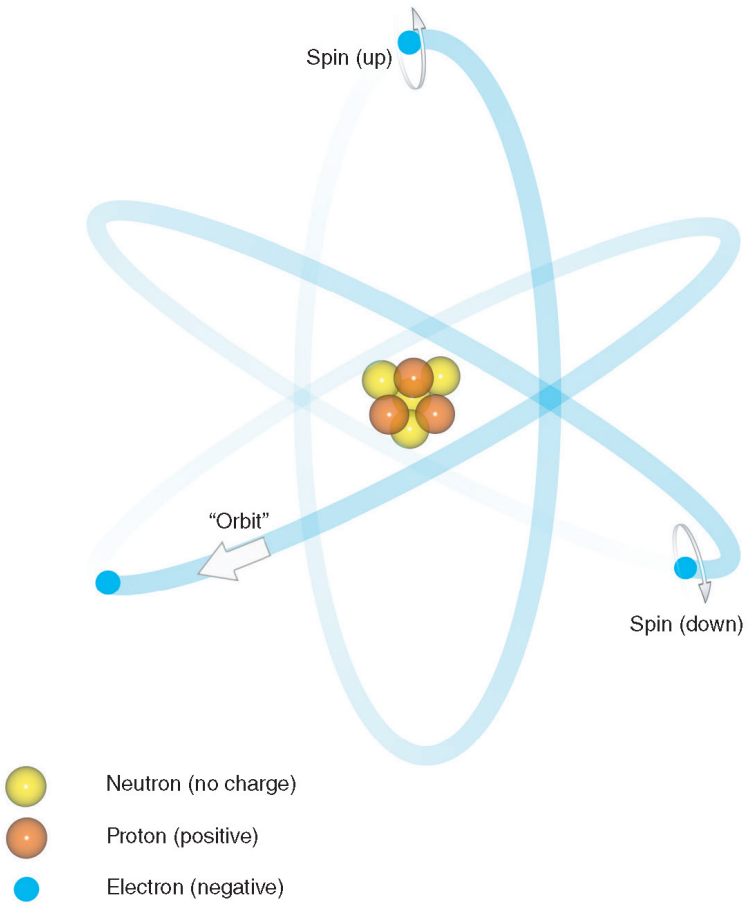
حرکت در اتم

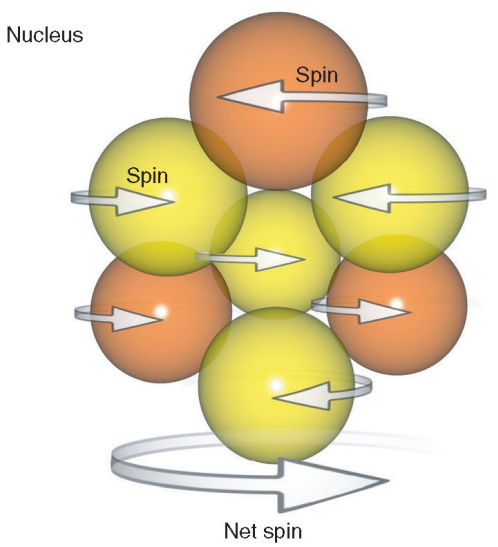
سه نوع حرکت در اتم وجود دارد (شکل ۱-۱):

- چرخش الکترون پیرامون محور خود (حرکت اسپینی)

1. Max Planck
2. Albert Einstein
3. Paul Dirac
4. Nucleon
5. Heisenberg's Uncertainty Principle
6. Ionization

- چرخش الکترون‌ها پیرامون هسته (حرکت مداری)
- چرخش هسته پیرامون محور خود (حرکت اسپینی).





شکل ۱-۱. ساختار اتم.

اصول MRI بر پایه حرکت چرخشی هسته‌های خاص موجود در بافت‌های بیولوژیکی استوار است. بسته به عدد اتمی و عدد جرمی، تعداد محدودی از مقادیر اسپین وجود دارند. اگر عدد اتمی و عدد جرمی یک هسته زوج باشند، آن هسته اسپین ندارد؛ برای نمونه شش پروتون و شش نوترون با عدد جرمی ۱۲. در هسته‌هایی که تعداد زوج پروتون‌ها و نوترون‌ها سبب ایجاد عدد جرمی زوج می‌شود، نیمی از اسپین نوکلئون‌ها در یک جهت و نیمی در جهتی دیگر می‌چرخند. بنابراین نیروهای چرخشی خنثی می‌شوند و هسته اسپین خالصی ندارد.

با این حال، در هسته‌هایی با تعداد پروتون فرد، تعداد نوترون فرد، و یا تعداد پروتون و نوترون فرد، جهت اسپین‌ها برابر و مخالف نیست و بنابراین هسته دارای اسپین خالص یا **گشتاور زاویه‌ای** است. به طور معمول، این‌ها هسته‌هایی هستند که دارای تعداد پروتون فرد (یا عدد اتمی فرد) و در نتیجه عدد جرمی فرد می‌باشند. این بدان معنا است که اسپین آن‌ها یک مقدار نیمه صحیح دارد؛ برای نمونه $\frac{۱}{۲}$ و $\frac{۵}{۲}$. با این حال، این پدیده در هسته‌هایی با تعداد پروتون و نوترون فرد که منجر به تشکیل هسته‌ای با عدد جرمی زوج می‌شود نیز رخ می‌دهد. این بدین معنا است که اسپین یک عدد صحیح کامل مانند ۱، ۲ و ۳ خواهد بود. برای نمونه، می‌توان به لیتیوم ۶ (که از سه پروتون و سه نوترون تشکیل شده است) و نیتروژن ۱۴ (شامل هفت پروتون و هفت نوترون) اشاره نمود. اگر چه این عناصر تا حد زیادی در MRI قابل مشاهده نیستند، بنابراین، به طور کلی، فقط هسته‌هایی با عدد جرمی یا وزن اتمی فرد استفاده می‌شوند. این هسته‌ها به عنوان **هسته‌های فعال MR** شناخته می‌شوند.

نکته یادگیری:

چه چیزی باعث چرخش پروتون می‌شود و چرا دارای بار الکتریکی است؟

در سطح زیر هسته‌ای، هر پروتون از کوارک‌هایی تشکیل شده است که هر کدام دارای ویژگی‌های هم‌راستایی و اسپین هستند. بار خالص و اسپین هر پروتون نتیجه ترکیب کوارک‌های آن است. پروتون از سه کوارک در حال چرخش تشکیل شده است. دو کوارک به سمت بالا می‌چرخند و دیگری به سمت پایین می‌چرخد. اسپین خالص پروتون ($\frac{۱}{۲}$) به دلیل هم‌راستایی متفاوت کوارک‌ها ایجاد می‌شود. هر کوارک با اسپین بالا دارای بار الکتریکی $+\frac{۲}{۳}$ و کوارک اسپین پایین دارای بار الکتریکی $-\frac{۱}{۳}$ است، بنابراین بار خالص پروتون برابر با ۱+ می‌شود [۲].

هسته‌های فعال MR

هسته‌های فعال MR با تمایل آن‌ها به هم‌راستا کردن محور چرخش خود با میدان مغناطیسی اعمال شده مشخص می‌شوند. هم‌راستایی آن‌ها با میدان مغناطیسی اعمال شده به دلیل داشتن گشتاور زاویه‌ای و یا اسپین می‌باشد و از آن‌جایی که دارای پروتون‌های با بار مثبت هستند، از لحاظ الکتریکی باردار می‌باشند. قانون القای الکترومغناطیس (که به وسیله مایکل فارادی[1] در سال ۱۸۳۳ بیان شد) به ارتباط میان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و حرکت اشاره دارد (در ادامه این فصل توضیح داده خواهد شد). قانون فارادی بیان می‌کند که یک میدان الکتریکی متحرک یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند و برعکس.

هسته‌های فعال MR دارای بار الکتریکی خالص (میدان الکتریکی) هستند و در حال چرخش (حرکت) می‌باشند و بنابراین یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند. در نظریه کلاسیک، این میدان مغناطیسی با یک **گشتاور مغناطیسی** نشان داده می‌شود. گشتاور مغناطیسی هر هسته دارای خواص برداری است، یعنی اندازه (یا بزرگی) و جهت دارد. گشتاور مغناطیسی کل هسته حاصل جمع برداری تمام گشتاورهای مغناطیسی پروتون‌های هسته می‌باشد.

نمونه‌های مهم هسته‌های فعال MR، به همراه عدد جرمی آن‌ها در زیر لیست شده است:

- ^{1}H (هیدروژن)
- ^{13}C (کربن)
- ^{15}N (نیتروژن)
- ^{17}O (اکسیژن)

1. Michael Faraday

- ^{19}F (فلوئور)
- ^{23}Na (سدیم)

جدول۱-۱. مشخصات عناصر متداول در بدن انسان.

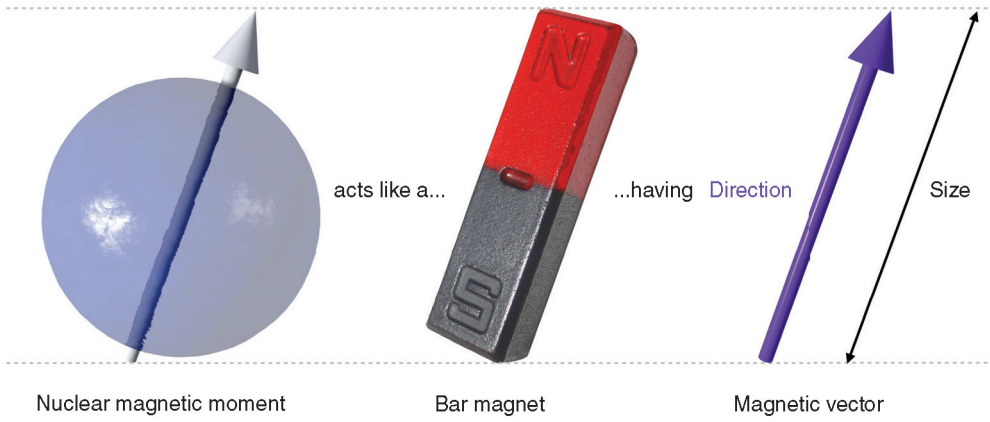
عنصر	تعداد پروتون	تعداد نوترون	اسپین هسته	درصد فراوانی%
^{1}H (پروتیوم)	۱	۰	$\frac{۱}{۲}$	۹۹/۹۸۵
^{13}C (کربن)	۶	۷	$\frac{۱}{۲}$	۱/۱۰
^{15}N (نیتروژن)	۷	۸	$\frac{۱}{۲}$	۰/۳۶۶
^{17}O (اکسیژن)	۸	۹	$\frac{۵}{۲}$	۰/۰۳۸

هسته هیدروژن

ایزوتوپ هیدروژن به نام **پروتیوم**، متداول‌ترین هسته مورد استفاده در MRI است. عدد جرمی و عدد اتمی آن برابر با ۱ است؛ بنابراین هسته از یک پروتون تشکیل شده است و نوترون ندارد. به دو دلیل از هسته هیدروژن استفاده می‌شود، اول اینکه هیدروژن در بدن انسان بسیار فراوان است و دوم به دلیل این که پروتون منفرد گشتاور مغناطیسی نسبتا بزرگی ایجاد می‌کند. این ویژگی‌ها بدین معنا است که بیشینه مقدار مغناطش ممکن در بدن به کار گرفته می‌شود.

قانون القای الکترومغناطیس فارادی بیان می‌کند که یک میدان مغناطیسی به وسیله یک ذره باردار متحرک (که میدان الکتریکی ایجاد می‌کند) ایجاد می‌شود. هسته پروتیوم از یک پروتون با بار مثبت تشکیل می‌شود که پیرامون خود می‌چرخد و در نتیجه دارای حرکت است. بنابراین، هسته دارای یک میدان مغناطیسی القا شده در فضای پیرامون خود است و مشابه یک آهنربای کوچک عمل می‌کند. آهنربای هر هسته هیدروژن یک قطب شمال و یک قطب جنوب با قدرت یکسان دارد. محور شمال-جنوب هر هسته با یک گشتاور مغناطیسی نشان داده می‌شود و در نظریه کلاسیک از آن استفاده می‌شود.

در شکل‌های این کتاب، گشتاور مغناطیسی با یک پیکان نشان داده می‌شود. طول پیکان نشان دهنده بزرگی گشتاور مغناطیسی یا قدرت میدان مغناطیسی پیرامون هسته است. جهت پیکان نیز هم‌راستایی گشتاور مغناطیسی را نشان می‌دهد (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲. گشتاور مغناطیسی هسته هیدروژن.

نکته یادگیری:

استفاده از اصطلاحات - هسته‌های فعال MRI

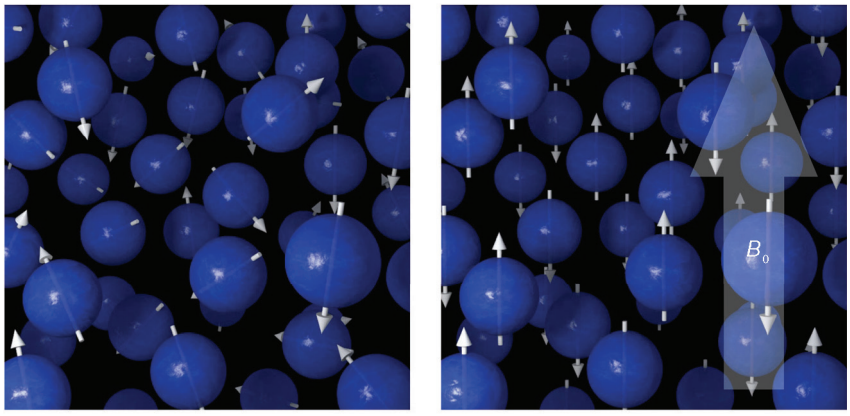
از این پس در این کتاب، زمانی که واژه‌های اسپین، هسته، یا پروتون استفاده می‌شوند، به هسته ^{1}H (پروتیوم) اشاره دارد. با این حال، مهم است که به یاد داشته باشید که انواع دیگر هسته‌های فعال MR، هنگامی که در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرند، رفتار مشابهی دارند. بعضی از این هسته‌ها مانند فسفر، سدیم، و کربن در کاربردهای خاصی از MRI استفاده می‌شوند، اما در بیشتر مواقع از پروتیوم استفاده می‌شود.

جدول۱-۲. مواردی که باید به خاطر بسپارید - اصول پایه اتم.

هیدروژن فراوان‌ترین عنصر در بدن انسان است.
هسته‌های مورد استفاده در MRI، هسته‌هایی هستند که اسپین خالص دارند.
از آن‌جایی که تمامی هسته‌ها حداقل یک پروتون با بار مثبت دارند، آن‌هایی که می‌چرخند، میدان مغناطیسی القا شده نیز در اطراف خود دارند.
پیکانی به نام گشتاور مغناطیسی، نشان دهنده میدان مغناطیسی هسته در نظریه کلاسیک است.

هم‌راستایی[1]

در غیاب میدان مغناطیسی اعمال شده، گشتاورهای مغناطیسی هسته‌های هیدروژن به صورت تصادفی جهت‌گیری کرده و هیچ اثر مغناطیسی ایجاد نمی‌کنند. با این حال، هنگامی که در یک میدان مغناطیسی خارجی ایستا و قوی (به صورت یک پیکان سفید رنگ در شکل ۱-۳ نشان داده شده است و B_0 نامیده می‌شود) قرار می‌گیرند، گشتاورهای مغناطیسی هسته‌های هیدروژن با این میدان مغناطیسی جهت می‌گیرند. این پدیده را **هم‌راستایی** می‌نامند. هم‌راستایی در ادامه با استفاده از نظریه‌های کلاسیک و کوانتومی توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱-۳. هم‌راستایی - نظریه کلاسیک.

نظریه کلاسیک از *جهت گشتاورهای مغناطیسی* اسپین‌ها (هسته‌های هیدروژن) برای نشان دادن هم‌راستایی استفاده می‌کند.

- **هم‌راستایی موازی**: هم‌راستایی گشتاورهای مغناطیسی در همان جهت میدان اصلی B_0 (که به آن اسپین-بالا[2] نیز گفته می‌شود).

1. Alignment
2. Spin-up