



نشر سلول

اصول فیزیکی و کاربردهای کلینیکی تصویربرداری تشدید مغناطیسی

مترجم:

سپهر لطفی مرنگلو

ارشد تصویربرداری پزشکی

SANABOOK.COM



این کتاب ترجمه‌ای روان در ۱۷ فصل بر اساس کتاب MRI Basic Principles and Applications می‌باشد که در آن تمامی مباحث پایه‌ای تصویربرداری تشدید مغناطیسی با زبانی ساده و قابل فهم بیان شده است. استفاده از اشکال و نمودارهای مختلف بر اساس سکانس‌ها و تصاویر کلینیکی متناسب با آن و پرهیز از بکارگیری فرمول‌های ریاضی پیچیده که می‌تواند گاهی باعث دلزدگی در روند مطالعه شوند از جمله نکات مثبتی است که در نگارش این کتاب لحاظ شده است. نمی‌توان این نکته را انکار کرد که فرمول‌ها و روابط ریاضیاتی اصول تصویربرداری تشدید مغناطیسی را تشکیل می‌دهند و برای درک بهتر اصول آن، آشنایی مختصری از ریاضیات آن نیز لازم است لذا این مسئله به گونه‌ای استادانه بکار گرفته شده است که یادگیری اصول را برای خواننده‌ی این کتاب جذاب‌تر و قابل فهم‌تر می‌کند. از آنجایی که ذات تصویربرداری تشدید مغناطیسی برای تمامی کسانی که در حوزه‌ی تصویربرداری پزشکی فعالیت می‌کنند، جذاب است لذا خواندن این کتاب و درک تمامی فرایندهایی که در روند تشکیل تصویر دخیل هستند می‌تواند به افزایش توانمندی کارشناسان و دانشجویان مقطع کارشناسی رادیولوژی و تمامی عزیزان علاقمند به مبحث MRI کمک کند.

در پایان نیز بر خود وظیفه می‌دانم از تمامی اساتید گرانقدرم در گروه تصویربرداری پزشکی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی و گروه فیزیک پزشکی دانشگاه علوم پزشکی مشهد که از دریای علم و دانش آن‌ها بهره‌مند شدم و همچنین از دوستان و همکاران گرانقدرم جناب آقای سهند قیاسی عزیز، جناب آقای هرمز عابدی، جناب آقای دکتر مهدی حسینی و همکاران عزیزم در بیمارستان دکتر مهزاد ارومیه، بیمارستان امام خمینی ارومیه که در طول این سال‌ها با راهنمایی‌های ارزنده‌ی خود اینجانب را مورد لطف خود قرار دادند تشکر کنم. تشکر ویژه‌ای نیز از جناب آقای دکتر نصراله جباری، مدیر گروه محترم تصویربرداری پزشکی دانشگاه علوم پزشکی ارومیه دارم که با راهنمایی‌های ارزنده خود همواره اینجانب را مورد لطف قرار می‌دهند و درس‌های ارزشمندی را از ایشان آموختم.

ارادتمند شما سپهر لطفی

مردادماه ۱۴۰۰

ما همیشه در سنا سعی می‌کنیم بستری را فراهم کنیم تا نویسندگان عزیز بتوانند مطالب خشک علمی را به شیوه‌ای متفاوت بیان کنند و حرف متفاوتی برای مخاطبان خود داشته باشیم. خوشبختانه کتاب اصول فیزیکی و کاربردهای کلینیکی تصویربرداری تشدید مغناطیسی یکی از همان کتب علمی است که توسط نویسنده محترم سپهر لطفی به رشته تألیف در آمده است. اخیراً در کنار کتاب‌های سنا یک اپلیکیشن کاربردی راه‌اندازی کرده‌ایم که بتوانیم کتاب‌های صامت را به کتاب‌های حاوی صوت و تصویر تبدیل کنیم.

SANABOOK.COM

فصل ۱: تولید مغناطیس پذیری خالص

۹	میدان‌های مغناطیسی
۱۰	اسپین هسته‌ای
۱۲	مومنتم‌های مغناطیسی هسته‌ای
۱۳	فرکانس لارمور
۱۵	مغناطیس پذیری خالص
۱۷	پذیرفتاری و مواد مغناطیسی

فصل ۲: مفاهیم تشدید مغناطیسی

۱۸	القای رادیوفرکانسی
۲۰	ارزیابی سیگنال رادیوفرکانسی
۲۳	جابه‌جایی شیمیایی

فصل ۳: آسایش (Relaxation)

۲۶	زمان آسایش T_1 و اشباع
۳۰	زمان آسایش T_2 , T_2^* و اسپین اکو

فصل ۴: اصول تصویربرداری تشدید مغناطیسی (۱)

۳۶	میدان گرادیان‌ها
۳۸	انتخاب برش
۴۰	کدگذاری فرکانس یا قرائت
۴۲	کدگذاری فاز
۴۵	حلقه زنی سکansı

فصل ۵: اصول تصویربرداری تشدید مغناطیسی (۲)

۴۹	تحریک انتخابی فرکانس
۵۴	پالس‌های ترکیبی
۵۶	داده‌ی خام و ماتریس داده‌ی تصویر
۵۸	نسبت سیگنال به نویز (SNR) و مصالحه (Tradeoffs)
۵۹	دیتای خام و فضای K
۶۲	تکنیک‌های کاهش فضای K
۶۴	تکنیک‌های پر کردن سفارشی فضای K
۶۷	تکنیک‌های دیگر برای پر کردن فضای K

۶۹	کوئل آرایه‌ی فاز
۷۱	تکنیک‌های جمع‌آوری موازی

فصل ۶: سکانس‌های پالسی

۷۷	توالی‌های اسپین اکو
۸۰	سکانس‌های گرادیان اکو
۸۵	سکانس‌های تصویربرداری اکوی صفحه‌ای (EPI) Echo planar imaging
۸۷	سکانس‌های آماده‌سازی مغناطیسی

فصل ۷: پارامترهای اندازه‌گیری و کنتراست تصویر

۹۷	پارامترهای ذاتی
۱۰۰	پارامترهای غیر ذاتی
۱۰۲	مصالحه بین پارامترهای مختلف

فصل ۸: تکنیک‌های فرونشانی سیگنال

۱۰۵	پالس‌های پیش اشباع فضایی
۱۰۷	فرونشانی انتقال مغناطیسی
۱۱۰	اشباع انتخابی فرکانس
۱۱۲	تکنیک‌های فرونشانی غیراشباع

فصل ۹: آرتیفکت‌ها

۱۱۵	آرتیفکت‌های حرکتی
۱۱۹	آرتیفکت‌های حاصل از تکنیک‌ها یا پروتکل‌های مختلف
۱۳۵	آرتیفکت‌های خارجی

فصل ۱۰: تکنیک‌های کاهش آرتیفکت حرکتی

۱۴۳	بهبود پارامترهای جمع‌آوری دیتا
۱۴۴	تریگرینگ/دریچه‌گذاری
۱۴۸	جبران جریان
۱۵۰	جبران حرکت براساس تکنیک رادیال

فصل ۱۱: آنژیوگرافی تشدید مغناطیسی (MRA)

۱۵۳	تکنیک زمان پرواز در MRA
۱۵۸	MRA کنتراست فازی
۱۶۱	بیش‌ترین شدت نما (MIP)

فصل ۱۲: کاربردهای تصویربرداری پیشرفته

۱۶۴	دیفیوژن (Diffusion)
-----	---------------------

- ۱۷۰ پرفیوژن
- ۱۷۴ تصویربرداری عملکردی مغز
- ۱۷۵ تصویربرداری با استفاده از میدان‌های مغناطیسی قوی
- ۱۷۷ تصویربرداری گازهای بی‌اثر

فصل ۱۳: طیف‌سنجی تشدید مغناطیسی (MRI Spectroscopy)

- ۱۷۹ مفاهیم اضافی
- ۱۸۴ تکنیک‌های مکان‌یابی
- ۱۸۷ آنالیز طیفی و پس پردازش
- ۱۹۲ اسپکتروسکوپی با استفاده از میدان‌های قوی

فصل ۱۴: تجهیزات

- ۱۹۵ سیستم‌های کامپیوتری
- ۱۹۸ سیستم مگنت
- ۲۰۰ سیستم گرادیان
- ۲۰۲ سیستم رادیوفرکانسی
- ۲۰۵ سیستم جمع‌آوری دیتا
- ۲۰۶ خلاصه‌ای از اجزای سیستم

فصل ۱۵: مواد کنتراست

- ۲۰۹ مواد کنتراست درون وریدی
- ۲۱۶ مواد کنتراست خوراکی

فصل ۱۶: ایمنی

- ۲۱۹ میدان مغناطیسی اصلی
- ۲۲۰ کرایوژن‌ها
- ۲۲۰ گرادیان‌ها
- ۲۲۰ انباشت نیروی RF
- ۲۲۱ مواد کنتراست

فصل ۱۷: کاربردهای کلینیکی

- ۲۲۲ اصول کلی در تصویربرداری کلینیکی MRI
- ۲۲۴ ملاحظات در طراحی پروتکل
- ۲۲۵ ملاحظات که در رابطه با نواحی مختلف بدن باید در نظر گرفته شود
- ۲۴۱ توصیه‌ها و ملاحظات رابطه با سکانس‌ها و کاربردهای کلینیکی آن‌ها

SANABOOK.COM

تقدیم به پدر و مادر و خواهر عزیزم

رسول خدا (ص): هر مؤمنی بمیرد و یک ورق کاغذ از او بماند که دانشی بر آن باشد، آن ورق روز قیامت میان او و دوزخ مائل و مانع می‌شود و فدای تبارک و تعالی به هر مرفی که در آن کاغذ نوشته شهری در بهشت به او دهد که هفت برابر دنیا باشد.

SANABOOK.COM

فصل اول

تولید مغناطیس پذیری خالص

اتاق گفتگوی

خوانندگان این فصل



ارسال نظر

برای نویسنده و ناشر



تشدید مغناطیسی (MR) یک تکنیک اندازه‌گیری برای بررسی اتم‌ها و مولکول‌ها می‌باشد. اساس این تکنیک بر پایه‌ی برهمکنش بین میدان مغناطیسی و ذراتی که دارای بار و اسپین (خاصیت گردش) هستند استوار است. از آنجا که الکترون‌ها و سایر ذرات زیر اتمی دارای خاصیت گردش (یا به بیان دقیق‌تر دارای مومنوم زاویه‌ای گردش‌اند) در تکنیک‌های تشدید مغناطیسی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. اسپین (گردش) هسته‌ای یا به بیان دقیق ترمومنوم (بردار) زاویه‌ای گردش هسته‌ای یکی از ویژگی‌های ذاتی یک اتم است که مقدار آن به ترکیب دقیق اتمی آن بستگی دارد.

تمامی عناصر موجود در جدول تناوبی به جز آرگون و سربوم دارای حداقل یک ایزوتوپ طبیعی‌اند و دارای خاصیت اسپین هسته‌ای می‌باشند، بنابراین تقریباً همه‌ی عناصر می‌توانند از نظر تشدید مغناطیسی مورد مطالعه قرار گیرند و مفاهیم پایه‌ای جذب رزونانس و آسایش (که در ادامه با آن آشنا خواهید شد) بین همه‌ی این عناصر مشترک است ولی جزئیات دقیق از یک عنصر به عنصری دیگر و سیستمی به سیستم دیگر متفاوت است.

میدان‌های مغناطیسی

میدان‌های مغناطیسی به وسیله‌ی جریان‌های الکتریکی تولید و آنها را احاطه می‌کنند. این جریان‌های الکتریکی هم شامل جریان‌های ماکروسکوپیک نظیر آنچه که درون یک سیم در جریان است و هم شامل جریان‌های میکروسکوپیک نظیر آنچه که پیرامون اتم‌های آهن در جریان‌اند می‌باشند. میدان مغناطیسی را می‌توانیم به صورت یک بردار نشان دهیم، این بدان معنا است که میدان مغناطیسی هم دارای بزرگی و هم دارای جهت می‌باشد و آن را با متغیر B نشان می‌دهیم. برای مثال میدان B را در مرکز سیم لوله‌ای که دارای جریان است فرض کنید که در جهت محور لوله (عمود بر صفحه‌ی لوله و در نتیجه عمود بر جهت

جریان) قرار دارد در این صورت بزرگی این میدان متناسب با جریان لوله می‌باشد. بزرگی میدان مغناطیسی به قدرت نیروی مغناطیسی بر روی سیم یا مواد مغناطیسی بستگی دارد و جهت میدان عمود بر جهت نیرو می‌باشد.

میدان‌های مغناطیسی در طول زمان و مکان تغییر می‌کنند و می‌توانند با میدان‌های الکتریکی ترکیب شوند و امواج الکترومغناطیسی را تولید کنند. میدان‌های مغناطیسی به خصوص آنهایی که در موج‌های الکترومغناطیسی هستند با توجه به فرکانسشان (فاصله‌ی زمانی بین دو قله‌ی متوالی) توصیف می‌شوند. در تشدید مغناطیسی میدان‌های مغناطیسی وجود دارد که در طول زمان ثابت‌اند و نیز میدان‌هایی وجود دارد که در محدوده‌ی فرکانس‌های آکوستیکی تغییر می‌کنند و همچنین میدان‌هایی نیز وجود دارد که در محدوده‌ی فرکانس‌های رادیویی تغییر می‌کنند.

اسپین (گردش) هسته‌ای

ساختار یک اتم جز اصلی یک آزمون تشدید مغناطیسی را تشکیل می‌دهد. اتم‌ها از سه ذره‌ی بنیادی تشکیل شده‌اند که عبارت‌اند از:

۱- پروتون‌ها که دارای بار مثبت هستند

۲- نوترون‌ها که بار ندارند.

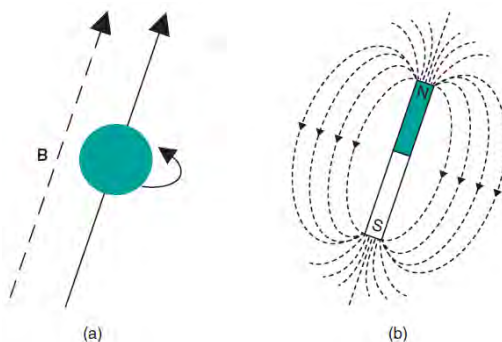
۳- الکترون‌ها که دارای بار منفی هستند

پروتون‌ها و نوترون‌ها در داخل هسته یا مرکز یک اتم قرار دارند بنابراین هسته‌ها از نظر بار مثبت هستند. الکترون‌ها در لایه‌ها یا اربیتال‌هایی که هسته را احاطه می‌کنند قرار دارند. واکنش شیمیایی خاص هر عنصر به تعداد مشخص هریک از این ذرات بستگی دارد. عناصر را معمولاً بر اساس دو ویژگی عدد اتمی و عدد جرمی طبقه‌بندی می‌کنند.

عدد اتمی تعداد پروتون‌های موجود در هسته می‌باشد و اولین شاخصه‌ی تمایز بین اتم‌ها می‌باشد. همه‌ی اتم‌های یک عنصر دارای عدد اتمی یکسانند و واکنش‌های شیمیایی یکسانی را از خود نشان می‌دهند.

به مجموع تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها وزن اتمی (عدد جرمی) می‌گویند. اتم‌هایی با عدد اتمی یکسان و وزن اتمی متفاوت ایزوتوپ نامیده می‌شوند. ایزوتوپ‌های یک عنصر دارای واکنش‌های شیمیایی یکسان می‌باشند ولی از نظر شدت و سرعت باهم متفاوت‌اند.

یک سوم خاصیت هسته مربوط به گردش یا اندازه‌ی حرکت زاویه‌ای گردش ذاتی می‌باشد. از دید کلاسیکی یک هسته‌ی دارای خاصیت گردش را می‌توانیم این‌گونه در نظر بگیریم که همیشه با یک سرعت ثابت حول یک محور در حال گردش است و این محور گردش عمود بر جهت گردش می‌باشد. شکل (۱.۱)



شکل ۱-۱- با توجه به شکل (a) یک هسته‌ی با بار مثبت در حال گردش یک میدان مغناطیسی یا مومنتوم مغناطیسی به موازات محور چرخش تولید کرده است که این جهت‌گیری در راستای محور چرخش قابل قیاس است با یک آهنربای مغناطیسی شکل (b) که در آن میدان مغناطیسی از قطب N به S جهت‌گیری کرده‌اند.

اسپین را با I نشان می‌دهند و مقادیر گسسته‌ای را به آن نسبت می‌دهند که این مقادیر به عدد جرمی و عدد اتمی یک هسته‌ی خاص بستگی دارد. این مقادیر برای I می‌تواند صفر یا عددی صحیح یا عدد کسری باشد. اگر هسته‌ای فاقد اسپین باشد یعنی مقدار $I = 0$ باشد بدان معنی است که دارای عدد اتمی و عدد جرمی زوج می‌باشد به‌عنوان مثال کربن 12 دارای ۶ نوترون و ۶ پروتون است یا اکسیژن 16 که دارای ۸ پروتون و ۸ نوترون است دارای $I = 0$ می‌باشند در نتیجه یک چنین هسته‌هایی هیچ برهمکنشی با میدان مغناطیسی ندارند و در نتیجه نمی‌توان از آنها در تشدید مغناطیسی استفاده کرد. اگر هسته‌ای دارای عدد اتمی فرد و عدد جرمی زوج باشد در این صورت مقدار I برای آن مقدار صحیح خواهد بود ($I = 1, 2, 3$) به‌عنوان مثال ^2H دارای ۱ پروتون و ۱ نوترون است و یا ^6Li دارای ۳ پروتون و ۳ نوترون است. اگر هسته‌ای دارای عدد جرمی فرد باشد در این صورت مقدار I برای آن کسری خواهد بود. جدول ۱-۱ فهرستی شامل فهرستی از اسپین‌ها و ترکیبات ایزوتوپ عناصر مختلف است که به فراوانی در محیط‌های بیولوژیکی یافت می‌شوند.

جدول ۱-۱- فهرستی از عناصر فراوان در محیط‌های بیولوژیکی و مشخصات آن‌ها

اسامی عناصر	تعداد پروتون	تعداد نوترون	I	ضریب ژیرومغناطیس	فراوانی	در ۱۰۵ فصل
¹ H, protium	1	0	1/2	42.5774	99.985	63.8646
² H, deuterium	1	1	1	6.53896	0.015	9.8036
³ He	2	1	1/2	32.436	0.000138	48.6540
⁶ Li	3	3	1	6.26613	7.5	9.39919
⁷ Li	3	4	3/2	16.5483	92.5	24.8224
¹² C	6	6	0	0	98.90	0
¹³ C	6	7	1/2	10.7084	1.10	16.0621
¹⁴ N	7	7	1	3.07770	99.634	4.6164
¹⁵ N	7	8	1/2	4.3173	0.366	6.4759
¹⁶ O	8	8	0	0	99.762	0
¹⁷ O	8	9	5/2	5.7743	0.038	8.6614
¹⁹ F	9	10	1/2	40.0776	100	60.1164
²³ Na	11	12	3/2	11.2686	100	16.9029
³¹ P	15	16	1/2	17.2514	100	25.8771
¹²⁹ Xe	54	75	1/2	11.8604	26.4	17.7906

هسته ¹H دارای یک پروتون تنها می‌باشد و بنابر دلایل مختلفی برای مطالعه‌ی بدن به‌وسیله‌ی تکنیک‌های تشدید مغناطیسی انتخاب شده است. دارای اسپین ½ است و فراوان‌ترین ایزوتوپ هیدروژن می‌باشد. و در بین عناصر طبیعی همان‌طور که در جدول هم مشاهده می‌کنید دارای بزرگ‌ترین پاسخ نسبت به میدان مغناطیسی می‌باشد و از آنجا که بافت‌های بدن انسان از مواد مختلفی نظیر چربی و آب تشکیل شده‌اند و در همه‌ی این مواد هیدروژن موجود است، در نتیجه سیگنال MR قابل توجهی از بافت‌های طبیعی به دلیل وجود ¹H قابل تولید است.

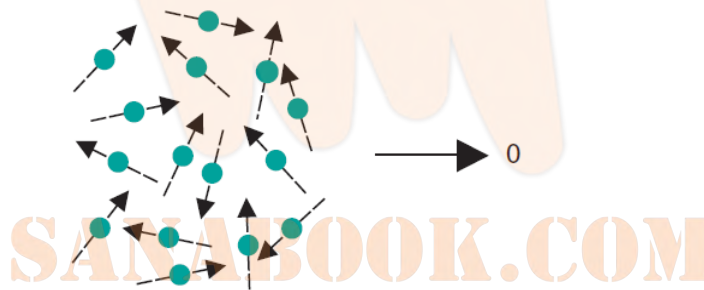
مومنتوم‌های (بردارهای) مغناطیسی هسته‌ای

همان‌طور که می‌دانید هسته محل تجمع پروتون با بارهای مثبت است زمانی که این بارهای مثبت به دلیل اسپین هسته‌ای می‌چرخند یک مومنتوم مغناطیسی حول هسته ایجاد می‌کنند و مومنتوم مغناطیسی ایجاد شده به موازات محور گردش جهت‌گیری می‌کند و از آنجا که اسپین هسته‌ای از نظر بزرگی ثابت است در نتیجه مومنتوم مغناطیسی حاصل از آن نیز از نظر بزرگی ثابت است. وجود این مومنتوم برای تشدید مغناطیسی (MR) ضروری است. مقایسه‌ی این موضوع با یک میله‌ی مغناطیسی به درک بهتر ما کمک می‌کند. یک میله‌ی مغناطیسی را که دارای دو قطب N و S است را تصور کنید و میدان مغناطیسی حاصل از آن دارای بزرگی و نیز جهت‌گیری می‌باشد. محور چرخش یک هسته‌ی دارای اسپین را می‌توان به یک بردار که هم جهت‌گیری مشخص دارد و نیز دارای بزرگی می‌باشد تشبیه کرد. این جهت‌گیری اسپین هسته‌ای و تغییراتی که در آن به واسطه‌ی دستکاری‌های آزمایشگاهی که هسته را دستخوش تغییر قرار می‌دهند اساس سیگنال‌های تشدید مغناطیسی (MR) را تشکیل می‌دهد.

به‌طور کلی اندازه‌گیری‌های تشدید مغناطیسی به جای یک اسپین بر روی مجموعه‌ی کل اسپین‌ها انجام می‌پذیرد. بنابراین لازم است که این مجموعه را هم به‌صورت اسپین‌های مستقل از هم در نظر بگیریم (یک تصویر میکروسکوپی) و هم به‌صورت یک واحد (یک تصویر ماکروسکوپی). در بسیاری از مفاهیم هردو تصویر یکسانند با این تفاوت که یک تصویر میکروسکوپی کامل‌تر می‌باشد. تبدیل بین دو تصویر میکروسکوپی و ماکروسکوپی نیازمند مبانی مکانیک آماری می‌باشد. درحالی‌که دانستن این تبدیل برای فهم کامل رویدادهای تشدید مغناطیسی لازم است ولی فهم ماهیت این تبدیل فراتر از بحث این کتاب می‌باشد هرچند تصاویر ماکروسکوپی برای درک بسیاری از مفاهیم ارائه شده در این کتاب کافی است ولی در بعضی مواقع که آوردن تصاویر میکروسکوپی لازم بوده از این تصاویر استفاده شده است.

فرکانس لارمور

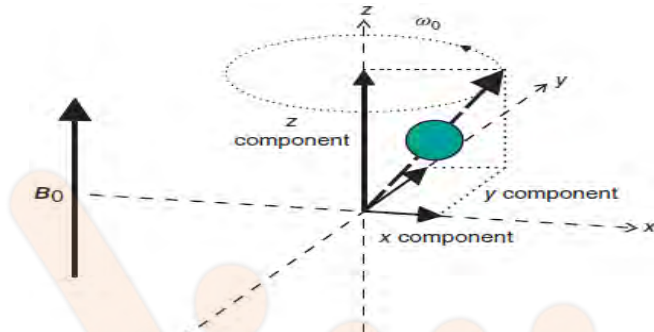
یک حجم دلخواه از یک بافت حاوی اتم‌های هیدروژن (پروتون) در غیاب میدان مغناطیسی خارجی را در نظر بگیرید. هریک از پروتون‌ها دارای بردار اسپین (مومنوم مغناطیسی) با بزرگی برابر هستند. تمام بردارهای اسپین مجموعه به‌صورت تصادفی و در تمام جهات جهت‌گیری کرده‌اند. توزیع پیوسته‌ای از جهت‌گیری‌های اسپین‌ها وجود دارد. حاصل جمع برداری این بردارهای اسپین در کل بدن برابر صفر است این بدان معنی است که هیچ مغناطیس‌پذیری خالصی در بافت دیده نمی‌شود. (شکل ۱-۲)



شکل ۱-۲- تصاویر ماکروسکوپی (سمت راست) و میکروسکوپی (سمت چپ) کل اسپین‌ها در غیاب میدان مغناطیسی خارجی. در غیاب میدان مغناطیسی خارجی اسپین‌ها به‌طور تصادفی جهت‌گیری کرده‌اند. (سمت چپ) و حاصل جمع برداری اسپین‌ها صفر شده است (سمت راست)

اگر یک بافت در داخل یک میدان مغناطیسی قرار بگیرد در این صورت هر یک از پروتون‌ها در جهت عمود بر میدان می‌چرخند یا در حول میدان مانند فرفره (حرکت تقدیمی) پیشروی می‌کند. بردارهای اسپین مربوط به پروتون‌ها به‌طور جزئی از محور میدان مغناطیسی منحرف می‌شوند ولی هر محور حرکت تقدیمی (حرکت فرفره‌ای) به موازات میدان B_0 می‌باشد. حرکت تقدیمی دارای سرعت ثابت بوده و در اثر برهمکنش میدان مغناطیسی با بار مثبت در حال گردش هسته اتفاق می‌افتد. به‌طور قرار دادی جهت میدان مغناطیسی B_0 و محور حرکت تقدیمی در سیستم مختصات دکارتی را در جهت محور z در نظر می‌گیرند. هرچند در همه‌جا این قرارداد رعایت نمی‌شود ولی بیش‌تر از این حالت استفاده می‌گردد.

حرکت هر پروتون را می‌توان با استفاده از مختصات عمود (X, Y) و موازی (Z) نسبت به میدان مغناطیسی B_0 توصیف کرد. در غیاب سایر برهمکنش‌ها مختصات عمودی یا عرضی غیر صفر هستند ولی با گذشت زمان با حرکت تقدیمی پروتون‌ها به صورت گردشی تغییر می‌کنند این در حالی است که مختصات طولی یا موازی با گذشت زمان ثابت است. (شکل ۳-۱)



شکل ۳-۱- در داخل یک میدان مغناطیسی یک پروتون به صورت تقدیمی پیشروی می‌کند یا در حول میدان مغناطیسی می‌چرخد. محور حرکت تقدیمی به موازات میدان مغناطیسی اصلی B_0 می‌باشد. مؤلفه‌ی z بردار اسپین (تصویر اسپین به سمت محور z) مطلوب می‌باشد زیرا بزرگی و جهت آن با حرکت پروتون تغییر نمی‌کند. مؤلفه‌های x و y با گذشت زمان به لحاظ فرکانسی تغییر می‌کنند که مقدار این فرکانس همان‌طور که در معادله ۱-۱ نیز آمده است با B_0 متناسب است.

سرعت یا فرکانس حرکت تقدیمی با قدرت میدان مغناطیسی متناسب است و در معادله‌ی زیر که با عنوان معادله‌ی لارمور شناخته می‌شود بیان گردیده است.

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

معادله ۱-۱

که ω_0 فرکانس لارمور برحسب مگاهرتز (HZ) می‌باشد و B_0 قدرت میدان مغناطیسی برحسب تسلا (T) می‌باشد که پروتون‌ها تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند و γ نیز یک ثابت بنام نسبت ژیرو مغناطیسی می‌باشد که واحد آن مگاهرتز بر تسلا (MHz/T) می‌باشد و این نسبت برای هسته‌های مختلف متفاوت است. مقادیر مربوط به γ و ω در ۱/۵ تسلا برای هسته‌های مختلف در جدول ۱-۱ آمده است.

تصویر دیگری نیز وجود دارد که تحت عنوان نمای چرخشی مرجع یا دستگاه مختصات چرخشی شناخته می‌شود و غالباً در تشدید مغناطیسی از آن استفاده می‌گردد که یک نمای مناسب برای توصیف اشیایی است که دارای حرکت چرخشی می‌باشند و هرگاه با توجه به فریم چرخشی مرجع به شی‌ی دارای حرکت چرخشی نگاه کنیم در این صورت سیستم مختصات حول یک محور می‌چرخد و این در حالی است که دو محور دیگر با زمان تغییر می‌کنند. با انتخاب محور و سرعت چرخش مناسب برای محور مختصات جسم در حال چرخش ساکن به نظر می‌رسد.

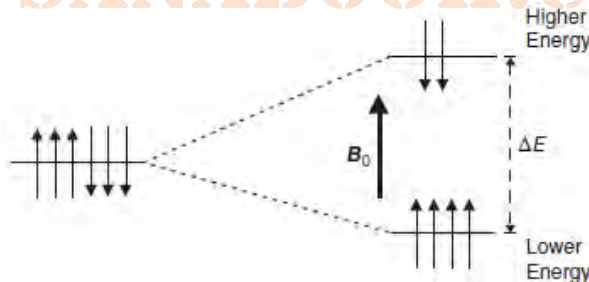
برای آزمایشات تشدید مغناطیسی در یک فریم چرخشی مناسب از محور z به موازات میدان B_0 به عنوان محور گردش استفاده می‌شود و محورهای X و Y نیز با فرکانس لارمور (ω) می‌چرخند. در این روش اسپین دارای حرکت تقدیمی در فضای محورهای مختصات ثابت X, Y, Z ساکن دیده می‌شود. صرف‌نظر

از اینکه سیستم مختصاتی به کاررفته ساکن است یا چرخشی M_0 دارای دامنهی ثابت بوده و به موازات میدان مغناطیسی اصلی می‌باشد. در این کتاب نیز در تمامی مباحث مربوط به حرکت پروتون‌ها از فریم چرخشی مرجع که دارای محور چرخشی به موازات میدان B_0 می‌باشد استفاده شده است.

مغناطیس‌پذیری خالص

اگر جمع‌برداری بر روی بردارهای اسپین در داخل میدان مغناطیسی اعمال شود در این صورت حاصل جمع برداری برای پروتون‌های داخل میدان مغناطیسی کمی متفاوت‌تر از جمع برداری پروتون‌های خارج میدان مغناطیسی خواهد بود. در جهت عمود بر میدان B_0 با وجود حرکت تقدیمی هراسپین جهت‌گیری اسپین‌ها به صورت تصادفی توزیع شده است (محدوده‌ی کاملی از مقادیر X و Y هم مثبت و هم منفی را پوشش می‌دهد) مثل حالتی که در خارج از میدان مغناطیسی قرار دارند؛ بنابراین در جهت عمود بر میدان B_0 هیچ مغناطیس‌پذیری خالصی وجود ندارد اما در جهت موازی میدان B_0 نتیجه به گونه‌ای دیگر است؛ زیرا یک جهت‌گیری نسبت به محور تقدیمی پروتون‌ها وجود دارد که با زمان ثابت است. یعنی یک برهمکنش یا جفت‌شدگی ثابت و غیر صفر بین پروتون‌ها و میدان B_0 وجود دارد که برهمکنش زیمان نامیده می‌شود. این جفت‌شدگی به جای محدوده‌ی پیوسته‌ای از اعداد مقادیر گسسته و محدودی از اعداد را برای مؤلفه‌ی Z ایجاد می‌کند.

هسته‌ی 1H فقط دارای دو مقدار برای مؤلفه‌ی Z می‌باشد یکی در جهت موازی B_0 و دیگری در جهت مخالف یا غیر موازی با B_0 . این جفت‌شدگی همچنین باعث اختلاف انرژی (ΔE) بین دو جهت‌گیری می‌شود که متناسب با مقدار B_0 می‌باشد. شکل (۴-۱) و همین اختلاف انرژی باعث می‌شود مقادیر Z مثبت نسبت به مقادیر Z منفی به‌طور جزئی بیش‌تر شوند که با جزئیات در پایین به آن اشاره شده است. اگر جمع برداری بر روی پروتون‌های این مجموعه اعمال گردد در این صورت جمع برداری مؤلفه‌های X و Y صفر خواهد شد ولی یک مؤلفه‌ی مثبت و غیر صفر Z را نیز خواهیم داشت که درواقع همان مغناطیس خالص M_0 می‌باشد. از طرفی چون محور Z محور چرخش می‌باشد در نتیجه M_0 با زمان تغییر نمی‌کند.

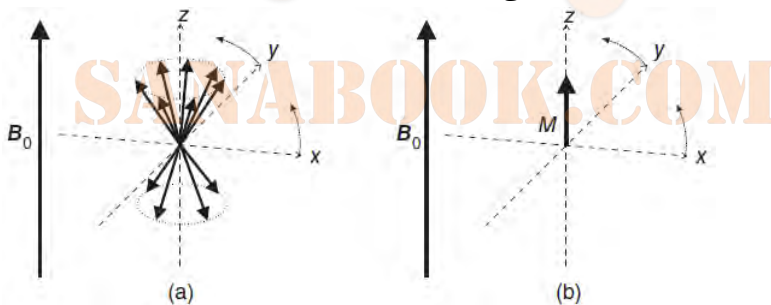


شکل ۴-۱- دیاگرام زیمان. در غیاب یک میدان مغناطیسی (سمت چپ) یک مجموعه از اسپین‌ها در قالب مؤلفه‌های Z خواهیم داشت که به لحاظ انرژی باهم برابرند و در نتیجه ردیف بین اسپین‌های جهت بالا و اسپین‌های جهت پایین تفاوتی وجود ندارد و هیچ کدام نسبت به دیگری برتری ندارند؛ اما در حضور یک میدان مغناطیسی (سمت راست) اسپین‌های که جهت روبه بالا دارند دارای انرژی کم‌تر و تعداد بیش‌تر نسبت به اسپین‌هایی هستند که جهت رو به پایین دارند. تفاوت انرژی ΔE بین دو سطح متناسب با B_0 است.

نتیجه‌ی برهمکنش زیمن این است که اسپین‌های دو جهت یعنی اسپین‌های موازی (که به آنها اسپین‌های جهت بالا نیز می‌گویند) و اسپین‌های غیر موازی (که به آنها اسپین‌های جهت پایین نیز می‌گویند) دارای تفاوت انرژی خواهند بود. اسپین‌هایی که در جهت موازی میدان B_0 اند دارای انرژی پایین‌تری نسبت به اسپین‌های غیر موازی نسبت به میدان B_0 می‌باشند؛ و برای یک مجموعه از پروتون‌ها تعداد پروتون‌هایی که در جهت موازی با میدان B_0 هستند بیش‌تر از تعداد آنهاست که در جهت غیر موازی می‌باشند یعنی این که یک پلاریزاسیون باقی‌مانده از اسپین‌ها در جهت موازی با میدان القا شده است. شکل (۵-۱) تعداد دقیق پروتون‌ها در هر سطح انرژی با استفاده از یک تابع توزیع که توزیع بولتزمن نامیده می‌شود محاسبه می‌گردد.

$$N_{UPPER} / N_{LOWER} = e^{-\Delta E / KT} \quad \text{معادله ۱-۲}$$

با توجه به معادله K ثابت بولتز من می‌باشد که مقدار آن $1/381 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ و N_{UPPER} تعداد پروتون‌های دارای انرژی بالا و N_{LOWER} تعداد پروتون‌های دارای انرژی پایین می‌باشد از آنجا که تفاوت بین سطوح انرژی به قدرت میدان B_0 بستگی دارد در نتیجه هر تعداد دقیق پروتون‌های هر سطح نیز به میدان B_0 بستگی دارد و هرچه میدان B_0 بیش‌تر شود اختلاف بیش‌تر می‌شود. برای مجموعه‌ای از پروتون‌ها در بدن در دمای 310 کلوین و در 5.1 تسلا در حدود 10^6 پروتون دارای انرژی کم‌تری نسبت به 10^{25} پروتون داخل بافت‌ها هستند. این تعداد نابرابر پروتون‌ها از نظر انرژی به این معنی است که جمع برداری اسپین‌ها غیر صفر و در طول میدان مغناطیسی می‌باشد. به عبارتی دیگر بافت در حضور میدان مغناطیسی B_0 پلاریزه یا مغناطیسی شده است به اندازه‌ی M که در واقع همان مغناطیس پذیری خالص می‌باشد. جهت گیری این مغناطیس پذیری خالص در جهت مشابه با B_0 می‌باشد و در غیاب سایر برهمکنش‌ها نسبت به زمان ثابت می‌ماند. شکل (۵-۱).



شکل ۵-۱- تصاویر میکروسکوپی (a) و ماکروسکوپی (b) از مجموعه‌ای از اسپین‌ها در حضور میدان مغناطیسی خارجی. هر پروتون حول میدان مغناطیسی می‌چرخد. با به کارگیری فریم چرخشی مرجع با سرعت ثابت ω مجموعه‌ی پروتون‌ها ساکن به نظر می‌رسند. درحالی که مؤلفه‌های z یکی از دو مقدار (یک مثبت و یک منفی) هستند. مؤلفه‌های x و y می‌توانند هر مقداری باشند مثبت یا منفی. اسپین‌ها شروع به گشتن به دور دو مخروط می‌کنند یکی با مؤلفه‌ی z منفی و دیگری با مؤلفه‌ی z مثبت. از آنجا که تعداد اسپین‌های بیش‌تری در مخروط بالا وجود دارد یک جمع بردار غیر صفر برای M که همان مغناطیس پذیری خالص است خواهیم داشت که دارای بزرگی ثابت بوده و به موازات M_0 است.

پذیرفتاری و مواد مغناطیسی

برای بسیاری از مواد (مثل بافت‌های بیولوژیکی) بزرگی و جهت M متناسب با B است.

معادله ۱-۳

$$M = \chi B$$

که χ پذیرفتاری مغناطیسی حجم یا به بیان ساده‌تر پذیرفتاری مغناطیسی می‌باشد. این آرایش برای M به گونه‌ای که در طول میدان مغناطیسی مرتب شده است و هیچ مؤلفه عرضی نیز ندارد به منزله‌ی یک آرایش نرمال و متعادل برای پروتون‌ها می‌باشد. این آرایش از اسپین‌ها دارای کم‌ترین میزان انرژی می‌باشد و درواقع یک آرایش برای پروتون‌هایی است که تمایل به آشفتگی (مثل جذب انرژی) دارند M یا مغناطیس‌پذیری خالص منبع سیگنال‌های موردنیاز برای کلیه‌ی آزمایشات تشدید مغناطیسی است. هرچه قدر قدرت میدان مغناطیسی بیشتر باشد درنتیجه مقدار M نیز بیش‌تر خواهد بود و سیگنال قوی‌تری تولید می‌شود.

پذیرفتاری مغناطیسی درواقع پاسخ یک ماده به میدان مغناطیسی بکار رفته است. هرچند که موشکافی کامل منشأ این پاسخ فراتر از حد این کتاب است ولی به بیان سه سطح از این پاسخ که در تشدید مغناطیسی با آن روبرو هستیم می‌پردازیم. این پاسخ‌ها عبارتند از:

۱- پاسخ دیا مغناطیس که در همه‌ی مواد یافت می‌شود و ناشی از الکترون‌های اطراف هسته است. این پاسخ بسیار ضعیف است (χ بسیار کوچک و منفی است) به جز برای سوپر کندانسورها (ابرساناها). این پاسخ دیامغناطیس باعث تولید یک نیروی دافعه‌ی جزئی می‌شود و تنها پاسخ برای بسیاری از مواد از جمله بافت می‌باشد.

۲- پاسخ پارامغناطیسی از نظر اندازه بزرگ‌تر از یک پاسخ دیا مغناطیسی است. اما این پاسخ هم ضعیف است (χ کوچک ولی مثبت است) و در تمامی مولکول‌هایی که دارای الکترون‌های جفت نشده می‌باشند یافت می‌شود. این مواد در معرض میدان مغناطیسی خارجی مرتب می‌شوند و نیروی جاذبه‌ی متوسط تولید می‌کنند.

۳- پاسخ فرومغناطیسی که در موادی یافت می‌شود که دارای χ بزرگ و مثبت هستند. اتم‌ها در مواد فرو مغناطیسی با هم دیگر ردیف می‌شوند و تشکیل یک حوزه‌ی مغناطیسی بزرگ را می‌دهند. ردیف‌های این حوزه‌های مغناطیسی یک نیروی جاذبه‌ی قوی در پاسخ به میدان مغناطیسی خارجی تولید می‌کنند. این مواد پس از بین رفتن اثر میدان مغناطیسی خارجی خاصیت مغناطیسی دائمی خواهند داشت. مواد دیا مغناطیسی و پارامغناطیسی را می‌توان در داخل یا نزدیک اسکنر نگه داشت ولی مواد فرومغناطیسی را نباید در اتاق اسکن نگهداری کنیم.