

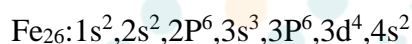
## تغییر خواص مغناطیسی

پیچیده‌ترین تاثیر اندازه ذرات، بر خواص مغناطیسی ماده است. در این بخش ابتدا برای درک بهتر اثر اندازه ذره بر خواص مغناطیسی، با برخی مفاهیم اولیه خواص مغناطیسی آشنا شده و سپس به صورت مختصر به خواص مغناطیسی نانومواد می‌پردازیم.

### ۱- میدان مغناطیسی

میدان مغناطیسی یک میدان نیروست، مثل میدان جاذبه‌ی زمین. درست همان‌طور که یک جسم در محدوده میدان جاذبه زمین، جذب زمین می‌شود، یک قطعه‌ی مغناطیسی نیز در میدان مغناطیسی یک آهن‌ربا، جذب آهن‌ربا می‌شود. این خاصیت مغناطیسی در آهن‌ربا به علت وجود دو قطب‌های مغناطیسی است (یعنی یک آهن‌ربا متشکل از آهن‌رباهای ریز است). علت به وجود آمدن دو قطب‌های مغناطیسی، حرکت الکترون‌ها است. برای درک بهتر انواع حرکت‌های الکترون، بهتر است قدری راجع به ساختمان اتم صحبت شود.

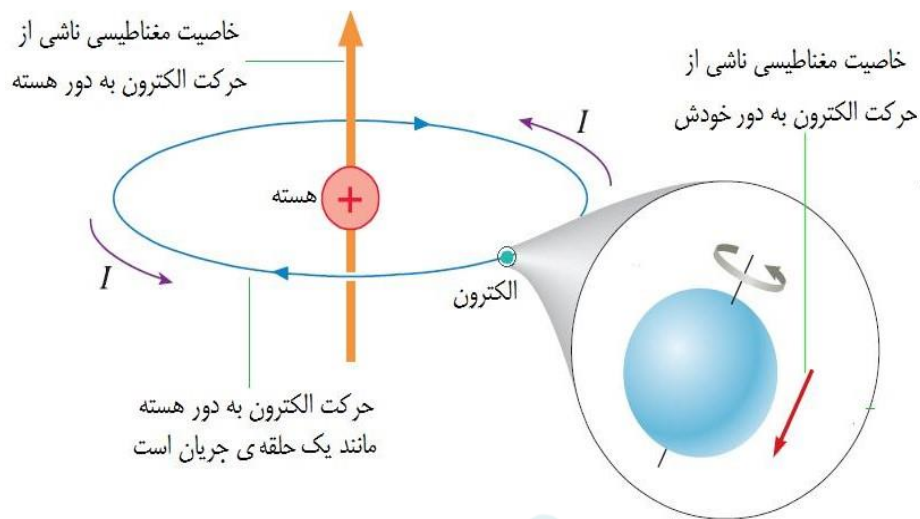
اتم شامل مجموعه‌ای از ذرات باردار مثبت (پروتون‌ها) در هسته و مجموعه‌ای از ذرات باردار منفی (الکترون‌ها) در پوسته است (نوترون در ایجاد خاصیت مغناطیسی تاثیری ندارد). الکترون‌ها در مدارهایی حلقوی به نام اوربیتال دور هسته می‌چرخند. در زیر مثالی برای  $Fe_{26}$  آورده شده است:



اوربیتال‌ها به ترتیب با نام‌های  $K, L, M$  و  $N$  و غیره شناخته می‌شوند. در هر اوربیتال اتم‌ها در لایه‌های  $d, s, p$  و  $f$  به دور هسته می‌چرخند. جهت چرخش الکترون به دور هسته را «اسپین» می‌گویند. چرخش الکترون به دور هسته برداری به نام «گشتاور» ایجاد می‌کند. قانون دست راست می‌گوید اگر چهار انگشت در جهت چرخش الکترون‌ها خم بشوند، انگشت شصت دست راست، جهت نیرویی را نشان می‌دهد که در اثر تغییر بردار حرکت الکترون تولید می‌شود. مجموعه‌ی خطوط این بردارهای گشتاور، یک میدان مغناطیسی را به وجود می‌آورد. یعنی وقتی یک جسم در فاصله نزدیک چنین قطعه‌ای قرار بگیرد، این مجموعه از نیروها بر آن وارد می‌شود و به اصطلاح آن را یا به طرف خود جسم می‌کشد (جاذبه) و یا هل می‌دهد (دافعه).

لازم به ذکر است دو نیرو در یک راستا، ولی در خلاف جهت هم، همدیگر را خنثی می‌کنند. بنابراین، اگر در یک لایه مانند  $s$  که در آن دو الکترون در خلاف جهت هم دور هسته می‌چرخند -- هر دو الکترون وجود داشته باشند، دو بردار نیرو در خلاف جهت تولید می‌شوند که همدیگر را خنثی می‌کنند. از این رو، اگر جسمی در نزدیکی آنها قرار بگیرد، یک نیرو آن را می‌کشد و یک نیرو آن را هل می‌دهد و در کل هیچ نیرویی بر آن وارد نمی‌شود. پس ماده‌ی مورد نظر، با یک اوربیتال پُر (دارای تعداد الکترون‌های زوج در لایه‌ی آخر که برای  $Fe_{26}$ ، اوربیتال  $d$  لایه‌ی آخر است) دارای خاصیت مغناطیسی نخواهد بود.

اما یک راه دیگر هم برای ایجاد خاصیت مغناطیسی در ماده وجود دارد. در این روش، خاصیت مغناطیسی ناشی از نوع دیگری از حرکت الکترون در اتم است. چون الکترون‌ها به جز حرکت اوربیتالی (چرخش به دور هسته که در بالا توضیح داده شد) می‌توانند مثل کره‌ی زمین به دور خود نیز بچرخند. در این حالت نیز همان بردار گشتاور ایجاد می‌شود و اگر تعداد الکترون‌ها در لایه‌ی آخر زوج باشد، دوباره نیروهای به وجود آمده همدیگر را خنثی می‌کنند. خاصیت مغناطیسی ناشی از هر دو نوع حرکت الکترون‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

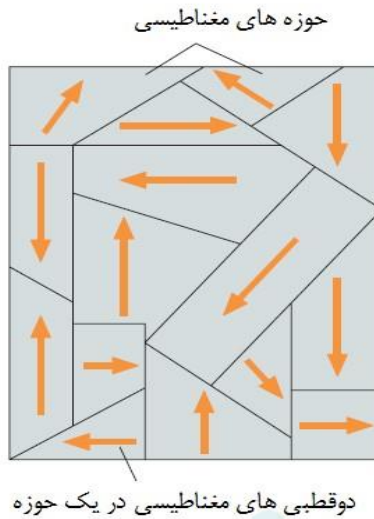


شکل ۱: خاصیت مغناطیسی مواد ناشی از حرکت الکترون‌ها به دور هسته و دور خود

جامداتی که در آنها لایه‌ی  $d$  در حال پر شدن است، دارای خاصیت مغناطیسی خواهند بود، اما این خاصیت مغناطیسی فقط ناشی از چرخش الکترون‌های لایه‌ی آخر ( $26 \text{ Fe}$ ) است. زیرا لایه  $d$  به هسته نزدیک است و جاذبه‌ی هسته به الکترون‌های این لایه اجازه نمی‌دهد که به دور خود بچرخند. اما در جامداتی که لایه‌ی  $f$  در حال پر شدن است، چون فاصله‌ی لایه از هسته زیاد است، الکترون‌ها هم می‌توانند به دور خودشان و هم به دور هسته بچرخند. پس دو بردار نیرو ناشی از دو نوع حرکت به وجود می‌آید و واضح است که خاصیت مغناطیسی بسیار بیشتر از حالت قبل خواهد شد. البته به این موضوع هم باید توجه کرد که جهت چرخش به دور هسته (حرکت اوربیتالی) و چرخش به دور خود (حرکت وضعی) برای یک الکترون در خلاف هم هستند.

## ۲- حوزه‌های مغناطیسی

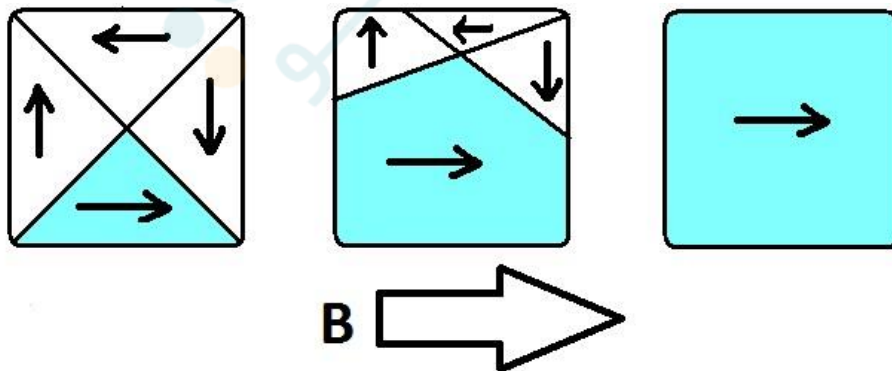
یک ماده‌ی مغناطیسی، مجموعه‌ای از حوزه‌های مغناطیسی است. حوزه‌ی مغناطیسی، ناحیه‌ای است که درون آن همه‌ی الکترون‌های لایه‌های منفرد در یک جهت به دور هسته و به دور خود می‌چرخند. یعنی یک ماده‌ی چند حوزه‌ای مجموعه‌ای از حوزه‌هاست که در هر حوزه الکترون‌ها در جهتی خاص به دور هسته می‌چرخند و مشخص است که هر چرخش الکترون، بردار نیرو در راستای خاص خود را به وجود می‌آورد و مجموعه بردارهای نیروی تولید شده، در جهات مختلف، به نوعی همدیگر را خنثی می‌کنند. یعنی میدان نیرو، مجموعه‌ای از نیروهای پراکنده است. پس قدرت آن ضعیف‌تر خواهد شد. حوزه‌های مغناطیسی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: حوزه های مغناطیسی و دو قطبی های مغناطیسی

### ۳- القای مغناطیسی

القای مغناطیسی یعنی ماده ای که برای مغناطیسی شدن مناسب است، مغناطیس شود. واضح است که برای این کار باید حوزه های مغناطیسی غیر هم جهت، هم جهت شوند تا نیروهای حاصل همدیگر را خنثی نکنند. برای این کار باید قطعه را با یک آهنربا مالش داد، یا آن را در جهت میدان مغناطیسی زمین گذاخته کرد یا در این جهت چکش کاری نمود. این کارها باعث چرخیدن فلش ها در هر حوزه می شوند تا در نهایت تمام فلش ها هم جهت شوند، یعنی جهت چرخش الکترون ها در هر حوزه عوض شود. با این کار مرز بین حوزه ها حرکت می کند و حوزه های کوچک تر در حوزه های بزرگ ادغام (هضم) می شوند. شکل 13 ادغام شدن حوزه در همدیگر را نشان می دهد.

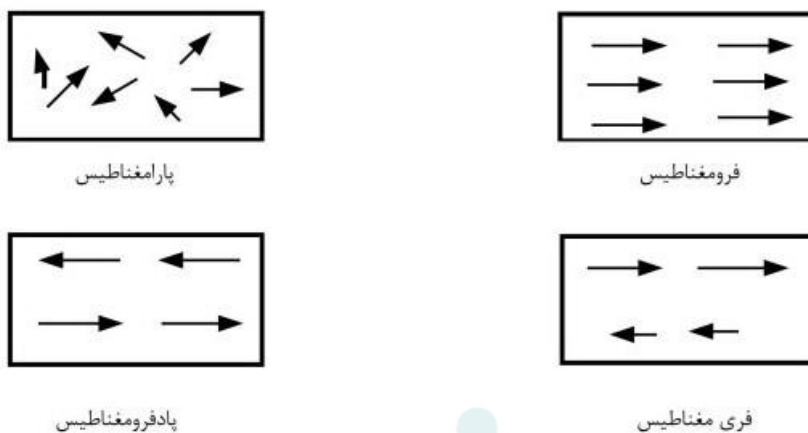


شکل ۳: تاثیر میدان بر حوزه های مغناطیسی

### ۴- دسته بندی مواد مغناطیسی

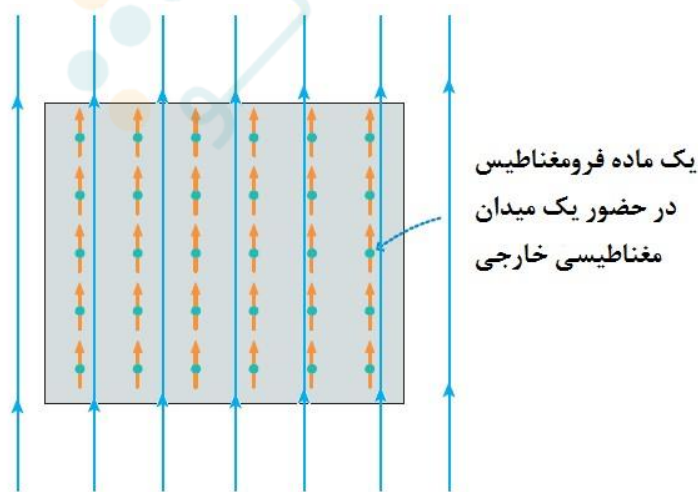
کلیه موادی که با اعمال میدان مغناطیسی، مغناطیس می شوند، مواد مغناطیسی نامیده می شوند. این مواد بر اساس چگونگی پاسخ به

یک میدان مغناطیسی خارجی به پارامغناطیس‌ها، فرومغناطیس‌ها، پاد فرومغناطیس‌ها، دیامغناطیس‌ها و فری مغناطیس تقسیم‌بندی می‌شوند. نظم گشتاورهای مغناطیسی در چهار دسته اصلی مواد مغناطیسی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: انواع مواد مغناطیسی و نظم گشتاوری آنها

**الف- فرومغناطیس‌ها:** بعضی از مواد فلزی دارای گشتاور مغناطیسی دائمی در غیاب میدان خارجی هستند و مغناطش‌های خیلی بزرگ و دائمی از خود نشان می‌دهند. این مواد فرومغناطیس نامیده می‌شوند. فلزات واسطه مثل آهن با شبکه BCC، کبالت، نیکل و بعضی از فلزات خاکی نادر مانند گادولینیم (Gd) دارای این خاصیت هستند. این مواد با اعمال یک میدان مغناطیسی کوچک به شدت مغناطش پیدا کرده و با حذف میدان مغناطیسی مغناطش خود را به طور کامل از دست نمی‌دهند. در این مواد بردارهای گشتاورهای مغناطیسی مجاور از نظر اندازه برابر هستند و تمایل دارند که با یکدیگر هم جهت شوند (دوقطبی‌ها تمایل دارند به صورت موازی هم مرتب شوند).

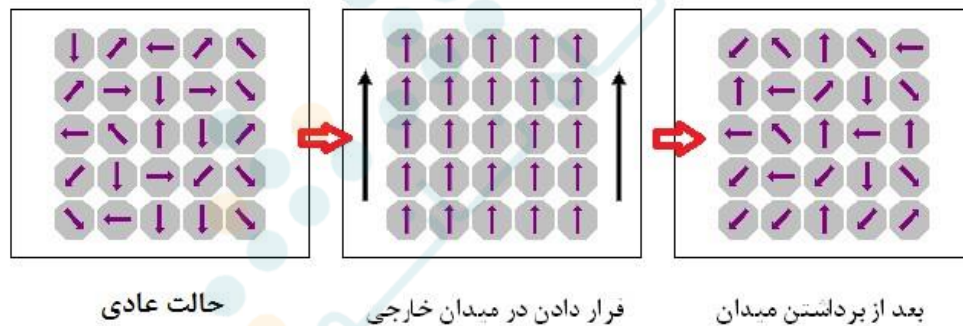


شکل ۵: هم راستا شدن بردارهای مغناطیسی در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی

ب- پاد فرومغناطیس‌ها: در این مواد بردارهای گشتاورهای مغناطیسی مجاور از نظر اندازه برابر ولی از نظر جهت، عکس یکدیگر هستند. بنابراین یکدیگر را خنثی می‌کنند. در صورتیکه چنین ماده‌ای در میدان مغناطیسی قرار گیرد، گشتاورهای هم جهت با میدان تقویت می‌شوند و ماده خاصیت مغناطیسی ضعیفی از خود نشان می‌دهد.

ج - فرو مغناطیس‌ها: در این مواد جهت بردارهای گشتاورهای مغناطیسی مجاور عکس یکدیگر است ولی اندازه آنها برابر نیست. رفتار این مواد مشابه با مواد فرو مغناطیس است. گروهی از آهنرباهای دائم که به نام فریت شناخته می‌شوند از این دسته هستند. د- دیا مغناطیس‌ها: موادی هستند که مولکول‌ها، اتم‌ها و یا یون‌های آنها به گونه‌ای رفتار می‌کنند که گشتاور مغناطیسی خالص آنها صفر است. اگر میدان مغناطیسی خارجی به این مواد اعمال شود، اتم‌های آن دارای گشتاور مغناطیسی القایی می‌شوند و جهت این گشتاور مغناطیسی خلاف جهت میدان اعمالی است. این دسته از مواد اگر در میدان مغناطیسی قرار گیرند، مغناطش منفی از خود نشان می‌دهند.

ه- پارا مغناطیس‌ها: در این مواد، برخلاف مواد دیا مغناطیس در مولکول‌ها، اتم‌ها و یا یون‌ها گشتاور مغناطیسی کوچکی وجود دارد. ولی گشتاورها با جهات اتفاقی توزیع شده و یکدیگر را خنثی می‌کنند و مغناطش خالص برابر صفر می‌شود. اگر این دسته از مواد در یک میدان مغناطیسی قرار گیرند، تعدادی از گشتاورها در جهت میدان می‌چرخند و هم راستا می‌شوند. البته با حذف میدان مجدداً جهت گشتاورها به صورت اولیه برخواهد گشت (شکل ۶) بعضی از فلزات قلیایی و یا برخی از فلزات واسطه مانند کروم، تیتانیم، تنگستن و پلاتین دارای خاصیت پارا مغناطیس هستند.

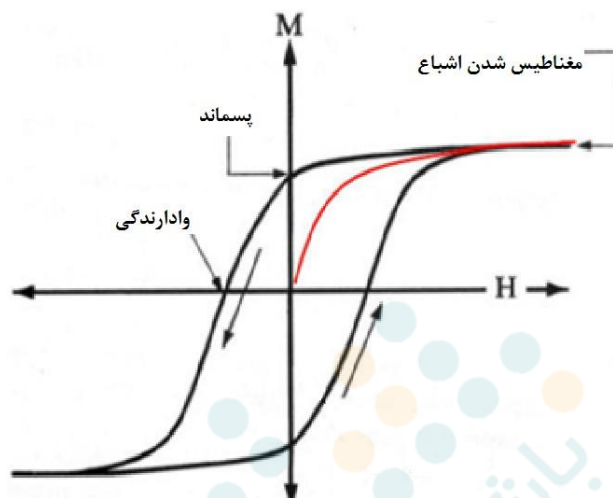


شکل ۶: جهات گشتاورهای مغناطیسی در یک ماده پارامغناطیس قبل و بعد از قرار گرفتن آن در یک میدان مغناطیسی خارجی

همان گونه که بیان شد در مواد فرومغناطیس، با حذف میدان مغناطیسی مغناطش خود را بطور کامل از دست نمی‌دهند. به این ویژگی اثر پسماند می‌گویند. به طور کلی، تمایل یک ماده در به خاطر آوردن تاریخچه مغناطیسی آن هیستریزس نامیده می‌شود و میدان مغناطیسی‌ای که برای جبران این پسماند لازم است، وادارندگی نام دارد. یک نمودار شماتیکی از مغناطیس شدن همراه با نقاط مهم آن در شکل ۷ نشان داده شده است.

وقتی به یک ماده مغناطیسی، میدان مغناطیسی اعمال شود، مغناطش آن سریعاً افزایش می‌یابد. با افزایش شدت مغناطیسی اعمالی، شتاب افزایش مغناطیسی کاهش یافته تا به مقدار اشباع خود برسد. تغییرات مغناطیس مواد مغناطیسی در هنگام کاهش میدان، از رفتار قبلی خود تبعیت نمی‌کند بلکه مقداری انرژی در خود ذخیره می‌کند. بنابراین وقتی که میدان اعمالی در محیط صفر شود؛ مغناطش در ماده صفر نشده و دارای مقدار خاصی است که به آن مغناطیس پسماند گفته می‌شود. با کاهش بیش‌تر شدت میدان به سمت مقادیر منفی خاصیت مغناطیسی القا شده به تدریج کاهش می‌یابد و با رسیدن شدت میدان به یک میدان منفی، خواص

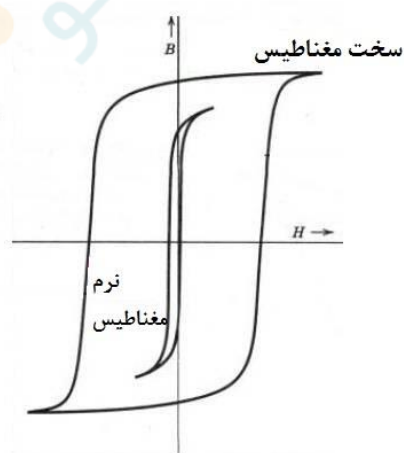
مغناطیسی ماده کاملاً از بین می‌رود، این میدان مغناطیس زدا را با  $HC$  نشان می‌دهند و به نیروی ضدپسماند یا همان وادارندگی مغناطیسی معروف است. پسماند یا نیروی وادارنده عبارت است از میدان معکوسی که برای کاهش مغناطیس به صفر نیاز است. با کاهش بیش‌تر شدت میدان، القای مغناطیسی منفی می‌شود و در نهایت به مقادیر اشباع منفی خود می‌تواند برسد. افزایش مجدد شدت میدان به سمت مقادیر مثبت، حلقه پسماند را کامل می‌کند.



شکل ۷: شمایی کلی از منحنی هیستریزس

مواد فرومغناطیسی را همچنین می‌توان از نظر رفتار آنها در میدان مغناطیسی به دو گروه مواد مغناطیسی نرم و سخت تقسیم‌بندی کرد. حلقه پسماند در مواد فرومغناطیسی نرم و سخت در شکل ۸ نشان داده شده است.

**الف- مواد مغناطیسی نرم:** مواد مغناطیسی نرم با اعمال میدان مغناطیسی کوچک به راحتی مغناطیده می‌شود و با قطع میدان سریعاً گشتاور مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. به عبارتی این مواد دارای نیروی وادارندگی پایینی هستند. این مواد همچنین دارای اشباع مغناطیسی بالا و پسماند پایین هستند.



شکل ۸: حلقه پسماند در مواد فرومغناطیسی نرم و سخت

مواد مغناطیسی نرم در جاهایی که به تغییر سریع گشتاور مغناطیسی با اعمال میدان مغناطیسی کوچک نیاز است، مانند موتورهای، هدهای مغناطیسی (magnetic heads)، حسگرها، القاگرها و فیلترهای صوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ب- مواد مغناطیسی سخت: مواد مغناطیسی سخت موادی هستند که براحتی مواد مغناطیسی نرم، مغناطیده نمی‌شوند و به میدان مغناطیسی اعمالی بزرگ‌تری، جهت مغناطیده کردن آنها نیاز است. این مواد، گشتاور مغناطیسی را تا مدت‌ها پس از قطع میدان مغناطیسی در خود حفظ می‌کنند. همچنین دارای اشباع مغناطیسی Ms، گشتاور پسماند Mr و نیروی وادارندگی Hc بالایی هستند. کاربرد این مواد در آهن‌رباهای دائمی و حافظه‌های مغناطیسی است.

#### ۴- خواص مغناطیسی نانوساختارها

یکی از تغییر خواص جالب و کاربردی که در ابعاد نانو ایجاد می‌شود، این است که بسیاری از موادی که در ابعاد معمولی خواص مغناطیسی ندارند، با کاهش اندازه دانه و کم‌تر از یک اندازه مشخص در مقیاس فناوری نانو می‌توانند خواص مغناطیسی داشته باشند. برای مثال می‌توان به نانوذرات اکسید آلومینیوم، طلا و غیره اشاره کرد. این امر باعث می‌شود تا با توجه به محدوده وسیع کاربرد مواد مغناطیسی، مواد جدیدی با خواص بهبود یافته تولید شود.

به صورت کلی از مهم‌ترین دلایل ایجاد خواص مغناطیسی در مواد معمولی، افزایش بسیار زیاد سطح و ایجاد پیوندهای شکسته شده روی سطح است. در بخش قبل آموختید که حضور دو الکترون در یک اوربیتال باعث خنثی شدن میدان‌های مغناطیسی شود. اما پیوند شکسته شده و یا ناقص به این مفهوم است که در اوربیتال یک تک الکترون موجود است و الکترون دیگر، میدان مغناطیسی را خنثی نمی‌کند. در مقیاس نانو چون کسر اتم‌های روی سطح و پیوندهای شکسته شده بسیار زیاد است، باعث می‌شود اکثر مواد بتوانند خواص مغناطیسی داشته باشند.

جدای از ظهور خواص مغناطیسی، اندازه دانه بر خواص مواد فرو مغناطیس نیز تاثیرگذار است. همان‌گونه که اشاره شد، یک ماده‌ی توده‌ای فرو مغناطیس با حوزه‌های مغناطیسی که هر کدام حاوی هزاران اتم هستند، شناخته می‌شود. در یک حوزه‌ی مغناطیسی، جهت چرخش الکترون‌ها یکسان است. اما حوزه‌های مغناطیسی متفاوت، جهات چرخش متفاوتی دارند. جدایش حوزه‌های مغناطیسی به وسیله دیواره‌هایی به نام بلاک صورت می‌پذیرد. اندازه‌های حوزه‌ها و این دیواره‌ها به وسیله‌ی مسائل انرژیکی کنترل می‌شود. در نتیجه پسماند و وادارندگی اساساً به اندازه ذره بستگی ندارند. با این حال با کاهش شدید اندازه ذرات، تعداد حوزه‌های مغناطیسی کاهش یافته و همسو کردن دوقطبی‌های مغناطیسی راحت‌تر می‌شود. محدودده‌ای از اندازه ذرات وجود دارد که در آن، ذرات تنها از یک تک حوزه مغناطیسی تشکیل شده‌اند. دلیل این امر این است که در چنین شرایطی ساختارهای چند حوزه‌ای از نظر انرژی غیرمطلوب هستند. در این شرایط وادارندگی و پسماند، شدیداً افزایش می‌یابد. در ذخیره اطلاعات به صورت مغناطیسی از این محدوده اندازه ذره استفاده می‌شود. کاهش بیش‌تر اندازه ذره باعث کاهش ناگهانی پسماند و وادارندگی تا مقدار صفر می‌شود.

#### ۵- خاصیت ابرپارامغناطیسی

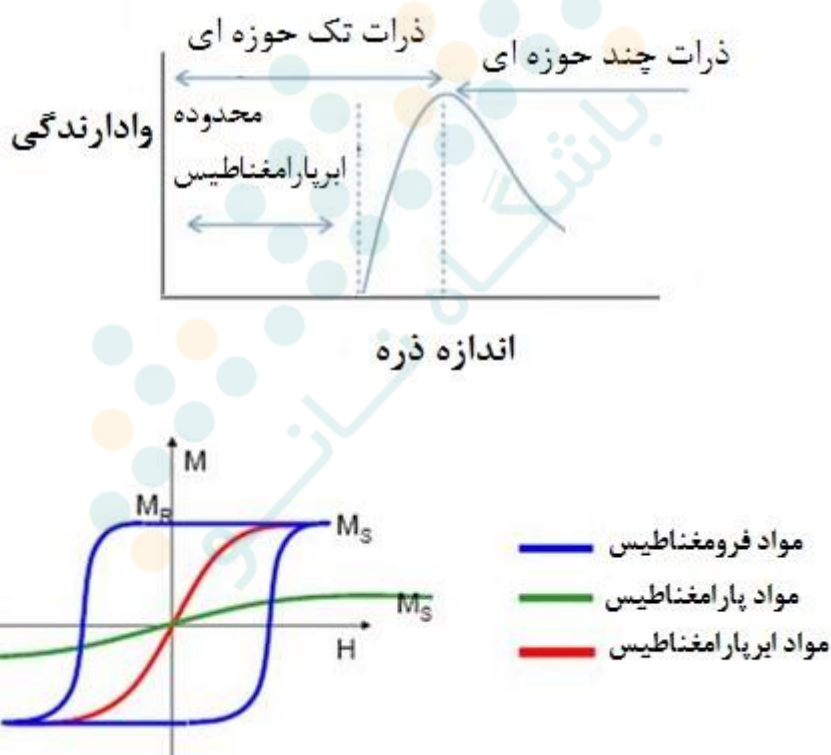
یکی از خواص جالب توجه که در نانوذرات عموماً بسیار کوچک و در محدوده ذرات تک حوزه دیده می‌شود، خاصیت ابرپارامغناطیسی یا سوپرپارامغناطیسی است. خواص ابرپارامغناطیسی نانو ذرات مستقیماً تحت تاثیر ناهمسانگردی مغناطیسی نانوذرات است (وابستگی خواص مغناطیسی به جهت مرجح ناهمسانگردی مغناطیسی نامیده می‌شود). این ناهمسانگردی به عنوان سدی برای تغییر جهت دوقطبی‌های (ممان) مغناطیسی است. هنگامی که اندازه نانوذرات تا حد آستانه‌ای کاهش می‌یابد، این سد



برابر با انرژی فعال‌سازی گرمایی ( $K_B T$ ) می‌شود. با وجود سد انرژی ناهمسانگردی کوچک، جهت مغناطیسی نانوذرات به راحتی توسط انرژی فعال‌سازی گرمایی و یا میدان مغناطیسی خارجی تغییر می‌کند. اگر انرژی گرمایی بیشتر از سد انرژی باشد، تمام جهات و دو قطبی‌های مغناطیسی در جهات کاتوره‌ای قرار می‌گیرند.

اساساً رفتار کلی نانوذرات مغناطیسی مانند اتم‌های پارامغناطیس است، اما ممان مغناطیسی بزرگی دارد. این رفتار ابرپارامغناطیس نامیده می‌شود. در ماده ابرپارامغناطیس، جهت مغناطیسی نانوذرات به جای جهت خاصی، سریعاً در حال تغییر است. همچنین دمایی که سد انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی نانوذرات همیشه بر انرژی فعال‌سازی گرمایی غلبه می‌کند، دمایی بلوکه نامیده می‌شود.

یک ماده ابرپارامغناطیس هیچ حلقه هیستروزیسی ندارد و میدان وادارندگی آن صفر است. نمودار تغییر وادارندگی و تعداد حوزه‌ها با اندازه ذره و تفاوت نمودار پسماند مواد فرومغناطیس، پارامغناطیس و ابرپارامغناطیس در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود وادارندگی و پسماند مغناطیسی صفر است.



شکل ۹: (نمودار بالا) رابطه وادارندگی یا پسماند در مواد مغناطیسی بر حسب اندازه دانه. در ذراتی که تنها از یک حوزه تشکیل شده‌اند، با ادامه کاهش اندازه ذره، وادارندگی و پسماند سریعاً به صفر می‌رسند. این اندازه، محدوده مواد ابرپارامغناطیس است. (نمودار پایین) تفاوت نمودار پسماند مواد فرومغناطیس، پارامغناطیس و ابرپارامغناطیس.

منبع: کتاب مجموعه مقالات سایت باشگاه نانو