

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



# دانشگاه پیام نور

گروه فیزیک

عنوان پایان نامه:

بررسی اثر فرآیند تهیه بر پاسخ EPR نمونه های هیدروکسی

اِپتایت مصنوعی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک هسته ای

استاد راهنما:

دکتر فرهود ضیائی

استاد مشاور :

دکتر پرویز پرورش

نگارش:

مجید حسامی

زمستان ۱۳۸۸

تقدیم بہ

ہمہ کسانیکہ

آموزختن

راہ من

آموزختند.

## چکیده

یکی از آثار پرتوها در مواد ایجاد رادیکالهای آزاد است که در این خصوص از دستگاه اسپکترومتر EPR برای تشخیص و سنجش تعداد رادیکالهای آزاد استفاده شده است. اندازه گیری مقدار دز دریافت شده متناظر با رادیکالهای تولید شده در بافت زنده ای که در معرض پرتوها قرار گرفته می تواند برای جلوگیری از بیش پرتوگیری افراد موثر واقع شود. رادیکالهای آزاد ایجاد شده در استخوان و مینای دندان به عنوان یک بافت سخت دارای عمر طولانی بوده و لذا به عنوان بافت اصلی برای تشخیص دز جذبی بدن مورد استفاده قرار می گیرد. هیدروکسی اپتایت (HA) عامل رادیکالهای پایدار و ماده اصلی موجود در استخوان و دندان است. در این پژوهش نمونه های هیدروکسی اپتایت از چهار روش با عناوین روش سل-ژل، دو روش هیدرولیز (که در هر دو روش هیدرولیز تقریباً همه شرایط یکسان است ولی دماهای سخت سازی متفاوتی دارند)، و روش میکروویو به طریق مصنوعی تولید، و نهایتاً اثر فرایندهای تهیه بر پاسخ EPR آنها مورد مطالعه قرار گرفت.

در این پایان نامه انواع روشهای ساخت نمونه های هیدروکسی اپتایت مصنوعی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است و سپس انواع بلورهای پودری HA رشد داده شده به روش های مختلف بررسی و تحلیل شده است. تحلیل ریخت شناسی و ساختار HA به وسیله ابزارها و آزمونهای شیمیایی و فیزیکی SEM، XRD و FITR انجام شد. و سرانجام از میان روشهای تهیه ذکر شده، روش هیدرولیز-۲ به عنوان روش برتر انتخاب شد.

## فهرست مطالب

فصل ۱ - آشنائی با روش طیف سنجی EPR	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- مبانی نظری EPR	۳
۱-۲-۱- آزمایش اشترن - گرلاخ	۵
۲-۲-۱- رادیکالهای آزاد	۸
۳-۲-۱- اثر زیمن	۹
۴-۲-۱- اصول فیزیکی تشدید	۱۱
۵-۲-۱- شدت علامت	۲۰
۶-۲-۱- نقطه اشباع	۲۲
۳-۱- آشنائی با دستگاه طیف سنجی EPR	۲۴
۱-۳-۱- طراحی از روش طیف سنجی EPR	۲۴
۲-۳-۱- پیل میکروویو	۲۶
۳-۳-۱- حفره EPR	۲۸
۴-۳-۱- کانال سیگنال	۳۲
۵-۳-۱- کنترل کننده میدان مغناطیسی	۳۶
۶-۳-۱- پارامترهای دستگاه EPR	۳۹
۱-۳-۱- استفاده از دستگاه EPR	۳۹
۲-۳-۱- مفهوم dB	۴۳
۳-۳-۱- کار با نشانگرها	۴۴
۴-۳-۱- نکات مهم در مورد آنالیز نمونه با دستگاه EPR	۴۵

مشخصات دزیمترهای مطلوب EPR ..... ۴۶ -۵-۶-۳-۱

## فصل ۲ - کاربردهای دستگاه EPR ..... ۴۷

۱-۲- مقدمه ..... ۴۷

۲-۲- تحلیل ..... ۴۷

۳-۲- آشکارسازی مواد غذایی پرتودیده ..... ۴۸

۴-۲- دزیمتری ..... ۴۹

## فصل ۳ - هیدروکسی اپتایت ..... ۵۱

۱-۳- مقدمه ..... ۵۱

۲-۳- ساختار بلوری ماده هیدروکسی اپتایت ..... ۵۲

## فصل ۴ - روشهای تجربی ..... ۵۳

۱-۴- مواد ..... ۵۳

۲-۴- تهیه ماده هیدروکسی اپتایت ..... ۵۴

۱-۲-۴- روش سل-ژل ..... ۵۴

۲-۲-۴- روش میکروویو ..... ۵۵

۳-۲-۴- روش هیدرولیز ..... ۵۶

۳-۴- دستگاه EPR ..... ۵۷

۴-۴- دستگاه XRD ..... ۵۷

۵۸.....	دستگاه FTIR	۴-۵-
۶۰.....	شتابدهنده الکترون	۴-۶-
۶۱.....	چشمه گاما	۴-۷-
۶۱.....	دستگاه SEM	۴-۸-

## فصل ۵- نتایج و بحث ..... ۶۳

### ۵-۱- تحلیل نمونه های هیدروکسی اپتایت تهیه شده توسط SEM, FTIR, X-ray

..... ۶۳

### ۵-۲- تغییرات شدت علامت EPR در مقابل دز جذبی پرتو ..... ۷۲

## فصل ۶- نتیجه گیری ..... ۷۶

## فصل ۷- مراجع ..... ۷۷

## فصل ۸- پیوست ها ..... ۸۰

..... XRD پیوست-۱ ۸۰

..... SEM پیوست-۲ ۸۹

..... FTIR پیوست-۳ ۹۲

..... شتابدهنده رودترون پیوست-۴ ۹۹

## فصل ۱

### آشنایی با روش طیف سنجی EPR

#### ۱-۱ مقدمه

تشدید پارامغناطیس الکترون ، ( $EPR^1$ )، یک فن طیف سنجی آشکار کننده مواد دارای الکترون غیر جفت شده است. لذا اغلب با نام ( $ESR^2$ ) تشدید اسپین الکترون نیز شناخته می شود. آزمایش تشدید پارامغناطیس الکترون ،  $EPR$ ، را می توان به صورت جذب تشدید انرژی ماکروویو در گونه های پارامغناطیس بوسیله گذار اسپین یک الکترون جفت نشده از یک تراز انرژی به تراز انرژی بعدی در حضور یک میدان مغناطیسی قوی تعریف کرد. اولین تجربه  $EPR$  بوسیله زاویسکی<sup>۳</sup> در سال ۱۹۴۵ انجام شد. طیف سنجی  $EPR$  به دو روش پالسی و پیوسته انجام می شود که در اینجا روش پیوسته مورد توجه است.

خوشبختانه مواد بسیاری دارای الکترون جفت نشده اند. که شامل رادیکالهای آزاد تجزیه و واکنشهای پلیمری هستند. در نتیجه،  $EPR$  در شاخه های زیادی از جمله: شیمی، فیزیک، زیست شناسی، علم مواد، پزشکی و غیره... استفاده می شود.

---

<sup>1</sup> - Electron paramagnetic resonance

<sup>2</sup> - Electron spin resonance

<sup>3</sup> -Zavoisky



EPR یک فن تشدید مغناطیسی شبیه به NMR یا تشدید مغناطیسی هسته است. با این تفاوت که به جای گذارهای هسته ای در نمونه گذارهای الکترون جفت نشده را در میدان مغناطیسی مورد آشکارسازی قرار می دهد. گشتاور دو قطبی مغناطیسی رفتار الکترون را به صورت یک آهنربای میله ای کوچکی در می آورد. در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی، الکترونها پارامغناطیس می توانند در راستایی موازی بصورت هم جهت و خلاف جهت میدان مغناطیسی اعمال شده قرار گیرند. بدین سبب دو سطح انرژی مجزا برای الکترونها جفت نشده به وجود می آید، که در وهله اول تعداد الکترونها که در خلاف جهت میدان خارجی هستند بیشتر از الکترونها هم جهت می باشد. با به کار بردن یک بسامد ثابت از تشعشع ماکروویو تعدادی از الکترونها سطح انرژی پایین به سطح انرژی بالا برانگیخته می شوند. برای اتفاق افتادن این گذار باید میدان مغناطیسی خارجی با یک قدرت خاص وجود داشته باشد. آنچنانکه اختلاف سطح انرژی بین سطح پایین و بالایی دقیقاً با بسامد میکروویو هماهنگ باشد. برای رسیدن به چنین شرایطی مقادیر مختلف میدان مغناطیسی را با ثابت نگاه داشتن بسامد ماکروویو جاروب می کنیم. در شرایطی که میدان مغناطیسی و بسامد موج ماکروویو کاملاً منطبقند شرایط تشدید محقق می شود. در این گفتار ابتدا تئوری EPR و مبانی فیزیکی آن سپس EPR عملی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت پارامترهای دخیل در کاربرد عملی EPR و به طور خاص دستگاه EMS104 ساخت شرکت بروکر آلمان تشریح می شوند.

EPR تنها وسیله‌ای است که قادر به آشکار سازی الکترونها غیر جفت شده بصورت تمایز ناپذیر می باشد. روشهای دیگری مانند روش فلورسانس ممکن است شواهد غیر مستقیمی از رادیکالهای آزاد فراهم آورند ولی EPR دارای توانایی بی مانندی در شناسایی ویژگی پارامغناطیس است می باشد. نمونه های EPR نسبت به شرایط محیطی حساس اند. لذا قابلیت مشخص نمودن ساختار مولکولی

نزدیک به الکترون جفت نشده را فراهم می آورند. گاهی اوقات طیف EPR تغییر شکل عجیبی را نمایش می دهد که نشاندهنده فرایندهای دینامیکی همچون حرکت یا جریان مولکولهاست.

فن EPR برای آشکارسازی رادیکالهای آزاد فعال با زمان بقای کم درحوزه زیست پزشکی<sup>۴</sup> برای شفاف نمودن نقش رادیکالهای آزاد در مسمومیتها و امراض نقش حیاتی دارد.

زیست شیمییدانها با برچسب زدن بر مولکولهای بزرگ توسط یک مولکول پارامغناطیس از طیف EPR ارسال شده (بوسیله علامت گذاری اسپین) به نوع محیطی که در آن علامت گذاری اسپین انجام پذیرفته است پی می برند (PH، جریان، آبدوستی).

ENDOR، ESEEM دو روش EPR هستند که بر همکنش الکترون با هسته های اطراف را اندازه می گیرند و در فنون بسیار قدرتمندی برای بررسی ساختار قسمتهای فعال پروتئینها فوق العاده فنهای قوی می باشند.

کاربرد مهم دیگر EPR در دزسنجی پرتو است که شامل اندازه گیری دز کار رفته در سترون کردن وسایل پزشکی و آشکار نمودن مواد غذایی که پرتو دیده است.

## ۱-۲ مبانی نظری EPR [۲۴]

در نیمه اول قرن ۲۰ زمانیکه دانشمندان سعی در به کار بردن اصول مکانیک کوانتومی برای تشریح ساختار و ویژگیهای اتم ها و مولکولها داشتند، دریافتند که ساختار اتم ها و مولکولها دارای سطوح گسسته ای هستند که هر یک با انرژی معینی متناظرند. طیف سنجی به معنی اندازه گیری و یا تفسیر اختلاف انرژی بین ترازهای اتم ها و یا مولکولها است. با دانستن این اختلاف انرژی ها می توان

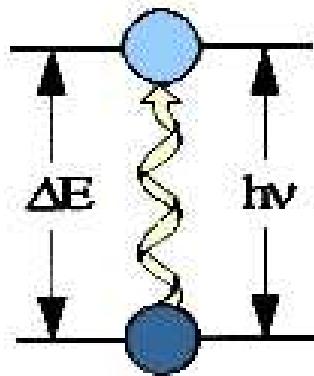
---

<sup>۴</sup> - Biomedical

بصیرتی نسبت به ساختار دینامیک نمونه مورد مطالعه به دسا آورد. با استفاده از رابطه مهمی که بین اختلاف انرژی،  $E$ ، و انرژی پرتو الکترومغناطیسی جذب شده وجود دارد، اندازه گیری  $E$  امکان پذیر است. بر اساس قانون پلانک، پرتو الکترومغناطیسی در صورتی جذب خواهد شد که

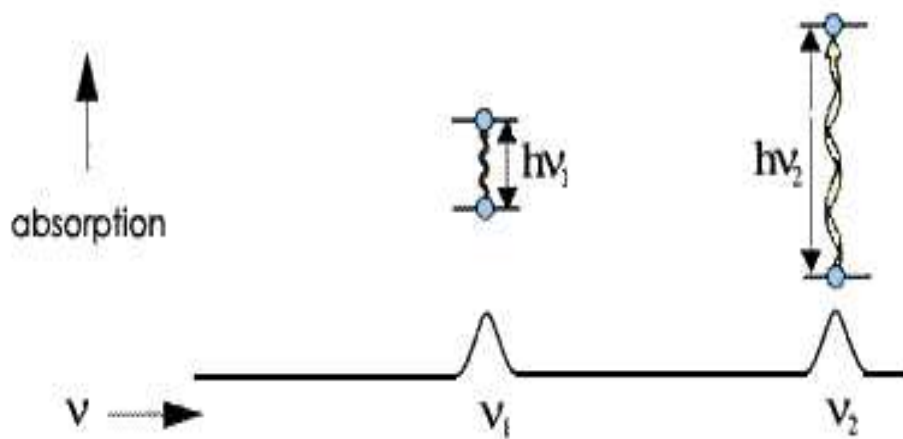
$$E = h\nu \quad (1-1)$$

که در آن  $h$  ثابت پلانک و  $\nu$  بسامد پرتو می باشد.



شکل ۱-۱ گذار متناسب با انرژی الکترومغناطیس جذب شده

جذب انرژی سبب گذار حالت انرژی پایینتر به حالت انرژی بالاتر می شود (شکل ۱-۱) بسامدهایی که جذب در آنها اتفاق می افتد با اختلاف انرژی سطوح متناظرند (در آینده تفاوت‌های EPR را خواهیم دید) این ثبت حاصل از جذب انرژی، طیف نامیده می شود (شکل ۲-۱). بسامد در بازه مگا هرتز برای NMR (تشدید مغناطیسی هسته) و امواج AM و FM تا نور مرئی و نور فرابنفش تغییر می کند و پرتو در بازه گیگا هرتز (که در اجاقهای ماکروویو به کار می رود) در آزمایشهای EPR به کار می رود. [۱]

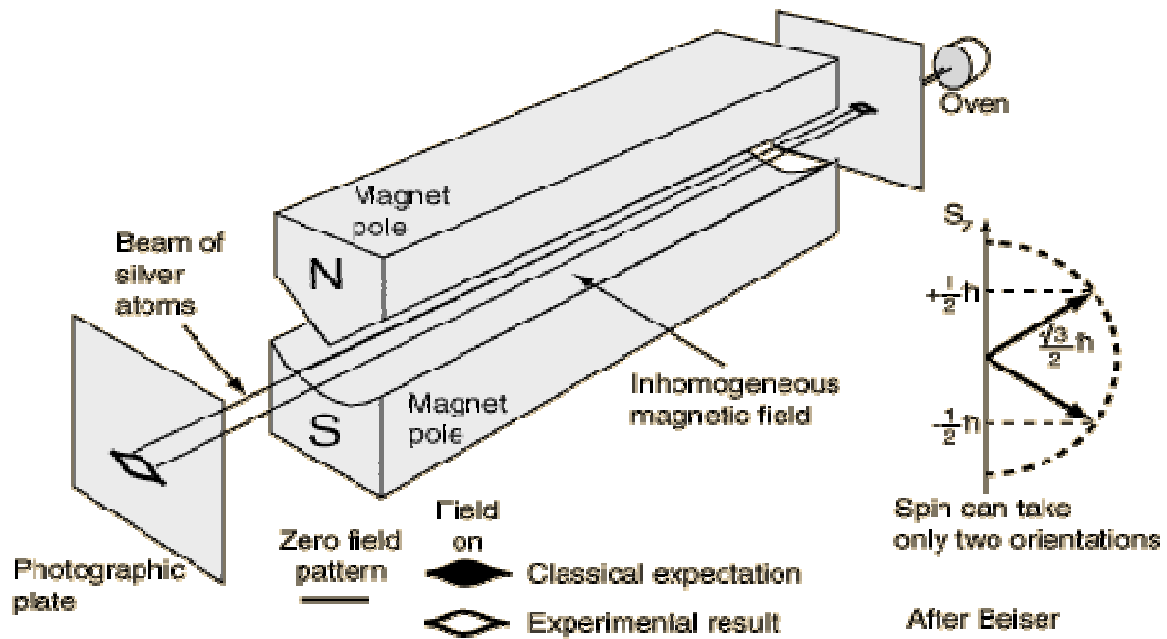


شکل ۱-۲ یک طیف نمونه

### ۱-۲-۱ آزمایش اشترن - گراخ

در سال ۱۹۲۲ اشترن و گراخ آزمایشی انجام دادند که ایده آن به صورت زیر است. اگر اتمهای نقره دارای گشتاور دو قطبی مغناطیسی  $\mu$  باشند، انرژی آنها در یک میدان مغناطیسی برابر با  $-\mu B_z$  است بردار  $Z$  راستای میدان خارجی است. در نظریه الکترومغناطیس کلاسیک  $\mu_z$  از ضرب گشتاور دو قطبی مغناطیسی در کسینوس زاویه بین گشتاور دو قطبی مغناطیسی و بردار میدان مغناطیسی،  $\theta$ ، به دست می آید. بنابراین انرژی اضافی ناشی از برهم کنش گشتاور دو قطبی مغناطیسی و میدان عبارت است از

$$\Delta U = -\mu B \cos(\theta) \quad (2-1)$$



شکل ۳-۱ آهنریای به کار رفته در آزمایش اشترن گزلاخ

البته هنگامی که اتمها از اون خارج می شوند، قبل از این که وارد میدان مغناطیسی شوند،  $B=0$ ، گشتاور دو قطبی مغناطیسی در هر جهت ممکن می تواند باشد به عبارت دیگر  $\theta$  می تواند هر مقداری را اختیار کند. اما پس از ورود به میدان مغناطیسی زیر لایه ها از هم باز می شوند و بر اساس رابطه بالا اختلاف انرژی بین جهت گیریهای اسپین به وجود می آید، که بر اساس اصول مکانیک آماری، اتمها با توجه به اختلاف انرژی شان در زوایای مختلف توزیع می شوند.

اشترن و گزلاخ لبه یکی از قطبهای آهنریای خود را بسیار تیز درست کردند تا تغییرات بسیار سریعی در میدان مغناطیسی ایجاد شود. می دانیم که اگر میدان در جهت Z به سرعت تغییر کند، به طوری که گرادیان میدان شدیدی به وجود بیاید، انرژی مغناطیسی نسبت به مکان تغییر خواهد کرد. به همین دلیل در اینجا نیرویی بر گشتاور دو قطبی مغناطیسی اعمال می شود که جهت آن به علامت کسینوس بستگی

دارد. پس لذا اتمها به وسیله نیرویی که با مشتق انرژی مغناطیسی متناسب است به سمت بالا یا پایین کشیده می شوند. به طوری که با توجه به اصل کار مجازی داریم

$$F_z = -\frac{\partial U}{\partial Z} = \mu \cos \theta \frac{\partial B}{\partial z} \quad (3-1)$$

در این آزمایش اتمها به طور مستقیم در امتداد لبه تیز سمت داده شده بودند. به طوری که اتمها باید نیروی عمودی را در میدان غیر یکنواخت احساس می کردند. در نتیجه یک مؤلفه سرعت و درپی آن جابجایی در جهت عمودی ایجاد می شد. اتمهای نقره ای که گشتاور دو قطبی مغناطیسی افقی دارند هیچ نیرویی احساس نمی کنند و در امتداد خط راستی از میان مغناطیسها عبور می کنند.

اتمی که گشتاور دو قطبی مغناطیسی اش عمودی است نیرویی را احساس می کند که به سمت بالا یا لبه تیز آهنربا کشیده می شود.

اتمی که گشتاور دو قطبی مغناطیسی اش به سمت پایین است، نیروی به سمت پایین به سمت قطب تخت آهنربا احساس خواهد کرد. بنابراین هنگامی که بخار نقره از بین دو قطب آهنربا عبور می کند، باید اتمهایش با توجه به جهت گشتاور دو قطبی مغناطیسی از هم جدا شوند. از نظر فیزیک کلاسیک همه زوایا امکان پذیرند.

بنابراین هنگامی که اتمهای نقره با رسوب کردن روی شیشه جمع آوری می شوند، باید انتظار یک خط عمودی از نقره داشته باشیم و ارتفاع این خط باید با گشتاور دو قطبی مغناطیسی نقره،  $\mu$  متناسب باشد.

حال آنکه اشترن گراخ روی صفحه شیشه ای فقط دو نقطه مجزا دیدند. اتمهای نقره دو باریکه تشکیل داده بودند. یک باریکه اتمهای نقره که اسپینهایشان به صورت تصادفی جهت گیری کرده بودند، به دو باریکه جدا از هم شکافته شدند و این به یک معجزه شباهت داشت. چگونه گشتاور های دو قطبی

مغناطیسی می دانند که اجازه دارند تنها مؤلفه های خاصی را اختیار کنند؟ شروع کشف کوانتش اندازه حرکت زاویه ای از همین جا بود. [۲]

## ۲-۲-۱ رادیکالهای آزاد

همه مواد یا محلولهایی که در لایه آخر انرژی خود دارای تعداد فرد الکترون هستند، اسپین غیر صفر دارند و به مواد پارامغناطیس معروف اند. زیرا هر تراز انرژی یا به عبارت دیگر هر حالت کوانتومی خاص، می تواند دارای دو الکترون با اسپینهای با جهت‌های مخالف باشد. به طوریکه اسپین کل آن حالت (طبق اصل طرد پاولی) صفر می شود. اما اگر در یک لایه انرژی تعداد فردی الکترون وجود داشته باشد، یکی از زیر لایه های این حالت دارای الکترون منفرد خواهد بود و این الکترون دارای اسپین خالص  $S=1/2$  و مؤلفه  $Z$  اسپین  $S_z=+1/2$  یا  $S_z=-1/2$  خواهد بود. بنابراین اسپین کل دستگاه اصطلاحاً صفر نبوده و دارای مقدار معینی خواهد بود.

رادیکالهای آزاد، موادی هستند که دارای این خاصیت اند. یک رادیکال آزاد، یک اتم یا گروهی از اتمها یا مولکولها در حالت ویژه ای هستند که دارای یک الکترون منفرد در بالاترین ترازند. برای مثال می توان از اتم هیدروژن  $H$ ، یا هیدروکسیل  $HO$ ، متیل  $H_3C$  نام برد. رادیکالهای آزاد معمولاً موادی بسیار فعالی هستند که به شدت به اشتراک گذاشتن الکترون منفرد خود و تشکیل ترکیبی جدید علاقمندند اما برخی از رادیکالهای آزاد هم مانند  $ClO_2$ ,  $No_2$ ,  $No$  دارای حالت پایدارند.

یک رادیکال دو گانه<sup>۵</sup> ماده ای است که دو الکترون تزویج نشده در بالاترین لایه انرژی خود دارد مانند  $O_2, H_2C$

<sup>5</sup> - biradical

یک یون رادیکال، رادیکال آزادی با بار مثبت یا منفی است مانند  $H_3n^{+6}$  یا ماده ای مانند آلانین. این ماده هنگامی که به هر دلیلی، مانند گسیل الکترون یا تابش گاما، یونیده شده و تبدیل به یون رادیکال  $CH_3HOO$  می شود، پایداری بسیار طولانی مدتی دارد به طوریکه در اندازه گیریهای در حد سال هم وجود این رادیکال تشخیص داده شده است. همچنین بعضی از یونهای فلزات میانه<sup>۷</sup> دارای الکترون زوج نشده در اربیتالهای داخلی خود هستند و لذا خواص رادیکالهای آزاد را ظاهر می سازند. همه این مواد و ترکیباتشان خاصیت پارامغناطیسی داشته و مانند رادیکالهای آزاد رفتار می کنند [۳]

### ۱-۲-۳ اثر زمین

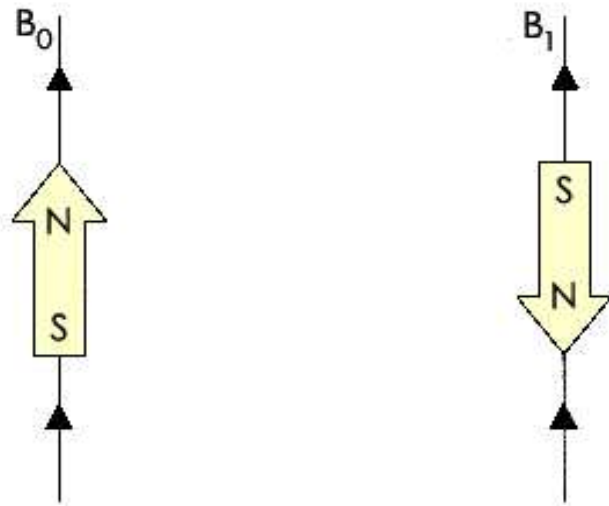
اختلاف انرژی که در طیف سنجی EPR مورد بررسی قرار می گیرد اغلب از بر همکنش الکترونیهای جفت نشده نمونه با میدان مغناطیسی تولید شده توسط آهنربای موجود در دستگاه EPR ناشی می شود. این اثر به اثر زمین موسوم است. به علت وجود گشتاور دو قطبی مغناطیسی الکترون، اگر الکترون در یک میدان مغناطیسی  $B_0$  قرار گیرد مانند قطب نما یا یک آهنربای میله ای عمل می کند.

زمانی که گشتاور دو قطبی مغناطیسی الکترون  $\mu$  با میدان مغناطیسی هم جهت است الکترون دارای پایتترین سطح انرژی  $\Phi$  و زمانی که  $\mu$  در خلاف جهت میدان مغناطیسی است الکترون دارای بالاترین سطح انرژی می باشد (شکل ۱-۴). این دو حالت به وسیله تصویر اسپین الکترون در راستای میدان مغناطیسی  $m_s$  برجسپ گذاری می شوند. چون آنجا اسپین الکترون  $1/2$  است حالت هم جهت به صورت  $m_s = -1/2$  و حالت غیر هم جهت یا پاد موازی به صورت  $m_s = +1/2$  نمایش داده می شود.

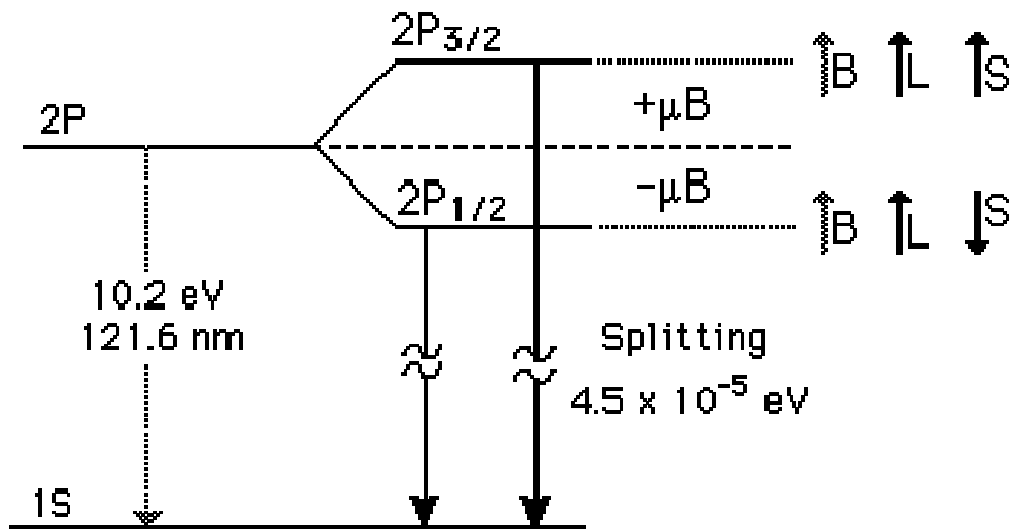
<sup>6</sup> - protonated amine radical

<sup>7</sup> - transition metals





شکل ۴-۱ جهت های پیشینه و کمینه انرژی مربوط به جهت گیری  $\mu$  در میدان مغناطیسی B



شکل ۵-۱ جدا شدگی ترازهای انرژی اسپینی در میدان مغناطیسی خارجی

## ۴-۲-۱ اصول فیزیکی تشدید

اسپین خاصیتی فیزیکی برای الکترون به شمار می رود گشتاور دو قطبی مغناطیسی متناسب با  $S$  را به الکترون نسبت می دهد. به بیانی ساده تر می توان گفت که الکترون به دلیل چرخش حول محورش (اسپین)، جریان الکتریکی سطحی به وجود می آورد که باعث ایجاد میدان مغناطیسی کوچکی می شود که به کمک گشتاور دو قطبی مغناطیسی  $\mu$  نشان داده می شود. بنابراین اگر الکترون در میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، گشتاور دو قطبی مغناطیسی آن با میدان مغناطیسی خارجی برهمکنش می کند و هامیلتونی برهمکنش

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_{ext} = -\mu_z B_z = \frac{eg}{2mc} BS_z, \quad e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ B}$$

به صورت  $\mu_{ext} = Bk$  اگر  $B_{ext} = Bk$  باشد، پتانسیل اعمال شده به الکترون برابر است با

(۴-۱)

بنابراین اگر مولکول یا اتمی دارای اسپین غیر صفر باشد، یا بر اساس توضیحات بخش قبل الکترون منفردی در زیر لایه خود داشته باشد، اعمال میدان مغناطیسی  $B$  بر آن، باعث می شود تا الکترون لایه آخر آن بتواند دو حالت انرژی زیر را اختیار کند. (در اصطلاح مکانیک کوانتومی اعمال میدان مغناطیسی باعث می شود تا تبهگنی اسپینی الکترون باز شده و دو مقدار انرژی برای آن به وجود آید).

$$\epsilon_1 = egB/4mc, \quad S_z = 1/2$$

$$\vec{S}_z = \pm 1/2 \quad \epsilon =$$

(۵-۱)

$$\epsilon_2 = egB/4mc, \quad S_z = -1/2$$

تفاوت این دو مقدار انرژی برابر است با

$$\Rightarrow \quad \delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{egB}{2mc} \quad (6-1)$$

اما اگر موج الکترومغناطیسی (که در عمل هم معمولاً در گستره امواج ماکروویو قرار دارد) به این الکترون تابیده شود، به طوری که انرژی فوتون ورودی یا بسامد با تفاوت انرژی دو حالت الکترون ( $\Delta E$ ) برابر باشد، الکترون منفرد، فوتون را جذب کرده و از حالت انرژی کمتر به حالت انرژی بیشتر می رود، یعنی در این حالت موج ماکروویو فرودی جذب می شود

شرط تشدید

$$\hbar\omega = \frac{egB}{2mc} \Rightarrow gB = 2.29 \times 10^{-47} \omega = \frac{43.14 \times 10^{-39}}{\lambda} \quad (7-1)$$

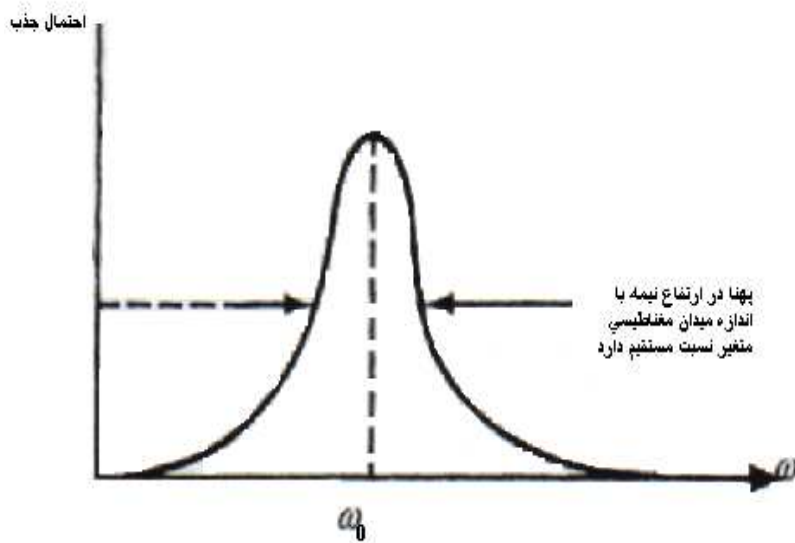
پس اگر ماکروویو در بسامد مناسب تابش شود، به طوریکه

$$\omega_0 - \delta\omega \leq \omega \leq \omega_0 + \delta\omega \quad (8-1)$$

دربازه ای متناظر با بازه  $\delta\omega$  برای میدان مغناطیسی  $B$  حالت جذب وجود خواهد داشت

$$\omega_0 - \delta\omega \leq \omega \leq \omega_0 + \delta\omega \Rightarrow B_0 - \delta B \leq B \leq B_0 + \delta B \quad (9-1)$$

نمودار احتمال جذب فوتون یا گذار الکترون از حالت اسپین پایین، به اسپین بالا با توجه به نظریه اختلال وابسته به زمان فیزیک کوانتومی، به شکل زیر است.



شکل ۱-۵ نمودار احتمال جذب بر حسب بسامد

که در نمودار بالا  $\omega$  بسامدی است که شرط  $\hbar\omega = \frac{egB}{2mc}$  را ارضاء می کند [۴].

پهنای نمودار بالا با شدت موج ماکروویو فرودی متناسب می باشد. چون می توان اختلاف انرژی بین سطوح اسپین را با تغییر میدان مغناطیسی تغییر داد، روشهای متفاوتی برای به دست آوردن طیف وجود می آید. با به کار بردن یک میدان مغناطیسی ثابت می توان، بسامدهای امواج الکترومغناطیسی مختلف را به گونه ای که در طیف سنجی مرسوم است جاروب کرد، و یا به جای آن بسامد موج الکترومغناطیس را ثابت نگه داشت و میدان مغناطیسی را جاروب کرد (شکل ۱-۶). یک قله جذب زمانی روی می دهد که میدان مغناطیسی منجر به گذار بین دو حالت انرژی اسپین،  $E$ ، شود به گونه ای که اختلاف بین آنها با انرژی موج الکترومغناطیسی متناسب باشد. این میدان، به میدان تشدید موسوم است. به دلیل محدودیتهای الکترونیکی ماکروویو، روش دوم کارایی بهتری ارائه می دهد. این فن در همه طیف سنج های EPR بروکر مورد استفاده قرار می گیرد. [۱]

بنابراین می توان احتمال جذب را (با توجه به رابطه تشدید)، بر حسب  $B$  (میدان مغناطیسی خارجی) رسم کرد، نمودار حاصل مانند نمودار ارائه شده در شکل (۱-۶) است. در این نمودار قله در نقطه  $B_0$  با