



# آزمایشگاه فزیک حالت جامد

دانشگاه فزیک - شمی

گروه فزیک

سکینه منائی فرد

ویرایش: آذر ۱۴۰۱

۱	فهرست آزمایشات:
۲	آزمایش شماره ۱: ترموالکترونیک
۱۲	آزمایش شماره ۲: اثر هال
۱۹	آزمایش شماره ۳: رسانش در جامدات
۲۳	آزمایش شماره ۴: نوررسانش (فتوکانداکتیویته)
۲۸	آزمایش شماره ۵: پدیده فرومغناطیس در مدل آهنربا
۳۴	آزمایش شماره ۶: پسماند مغناطیسی در هسته آهنی
۴۰	آزمایش شماره ۷: خواص مغناطیسی مواد
۴۶	آزمایش شماره ۸: سلول خورشیدی
۵۰	آزمایش شماره ۹: تشدید اسپین الکترون (ESR)
-----	
۵۵	مراجع:

آزمایش اول

## آزمایش ترموالکتریک

## هدف آزمایش:

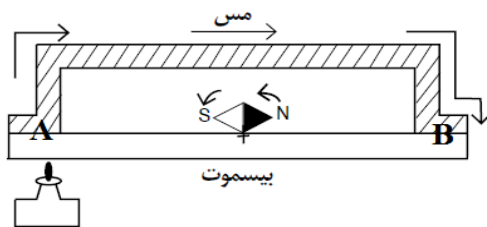
مطالعه دو اثر از آثار ترموالکتریک (اثر سیبک و اثر پلتیر)

## وسایل آزمایش:

ترموکوپل مس-کنستانتان، ترموکوپل کرم نیکل-کنستانتان، ترموکوپل با عقربه مغناطیسی، مغنت ترموالکتریک، دماسنج ۲ عدد، منبع تغذیه مستقیم، میکروولت‌متر، کالریمتر، چراغ بنزن، جک آزمایشگاهی، سه پایه، بشر، گیره بزرگ، گیره چند منظوره، سیم‌های رابط

## تئوری آزمایش:

اثر ترموالکتریک<sup>۱</sup> یا گرمابرقی عبارتست از: "اثر ناشی از تولید جریان الکتریکی در رسانا به سبب اختلاف دما بین دو نقطه آن." دو اثر مهم بین آثار ترموالکتریک اثر سیبک<sup>۲</sup> و اثر پلتیر<sup>۳</sup> می‌باشند که مطالعه آنها نه تنها آموزنده است، بلکه از نظر کاربردی جالب توجه می‌باشد.



شکل (۱): آزمایش سیبک

اثر سیبک را توماس یوهان سیبک (۱۸۳۱-۱۷۷۰) دانشمند آلمانی در سال ۱۸۲۲ کشف کرد. وی دو میله مسی و بیسموت را به هم متصل کرد و موازی با میله‌ها عقربه مغناطیسی را طوری قرار داد تا بتواند آزادانه حول محوری قائم بچرخد (شکل ۱). یکی از محل‌های اتصال دو فلز بوسیله شعله گرم می‌شود، انحراف عقربه مغناطیسی عبور جریان الکتریکی را در مدار نشان می‌دهد. سیبک این آزمایش را با فلزهای

متفاوت تکرار کرد و نتیجه گرفت که هرگاه اتصال‌های دو فلز ناهمجنس (نقاط A و B در شکل ۱) در دماهای متفاوت  $T_1$  و  $T_2$  قرار گیرند، نیروی محرکه الکتریکی (e.m.f) برابر  $V_T$  در مدار تولید می‌شود. این نیروی محرکه ( $V_T$ ) را نیروی محرکه گرمایی<sup>۴</sup> می‌نامند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در فواصل محدود دمایی،  $V_T$  با اختلاف دمای بین نقاط A و B متناسب است.

$$V_T = \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

ضریب تناسب ( $\alpha$ ) در رابطه (۱) شیب یا ضریب ویژه توان ترموالکتریکی نامیده می‌شود که به جنس رسانا و دما وابسته است. در ادامه با محاسبه  $\alpha$  نوع بستگی ضریب ویژه توان الکتریکی به دما را بررسی خواهیم کرد.

برای نیروی محرکه گرمایی سه منشأ وجود دارد. ۱- جریان جهت دار حامل‌های بار رسانا در اثر وجود شیب (گرادیان) دما که به آن مؤلفه حجمی نیروی محرکه الکتریکی ( $V_T$ ) گویند و ما در اینجا آن را با  $V_V$  نمایش می‌دهیم. ۲- تغییر مکان تراز فرمی که به آن مؤلفه اتصالی  $V_T$  گویند و ما در اینجا آن را با  $V_z$  نمایش می‌دهیم. ۳- کشش الکترونها توسط فونون‌ها (اثر کشش فونونی)

Thermoelectric effect<sup>۱</sup>  
Seebeck effect<sup>۲</sup>  
Peltier effect<sup>۳</sup>  
Thermal e.m.f<sup>۴</sup>

الف - مؤلفه حجمی نیروی محرکه گرمایی ( $V_v$ ):

چنانچه به دو سر یک رسانای یکنواخت اختلاف دمای ( $T-T_0$ ) اعمال کنیم، گرادیان دمای  $\frac{\partial T}{\partial x}$  در امتداد رسانا بوجود می‌آید. به این ترتیب حاملان جریان در انتهای گرم رسانا دارای انرژی جنبشی و لذا سرعت بیشتری نسبت به حاملان جریان در انتهای سرد آن خواهند داشت. در نتیجه در داخل رسانا جریانی از این حامل‌های بار از انتهای گرم به طرف انتهای سرد آن وجود خواهد داشت. چنانچه رسانا نوع  $n$  باشد یعنی حاملان جریان الکترون‌ها باشند، انتهای سرد تجمعی از بارهای منفی، و انتهای گرم بار مثبت خواهد یافت و اختلاف پتانسیلی بین دو سر رسانا بوجود می‌آید که همان مؤلفه حجمی نیروی محرکه گرمایی ( $V_v$ ) است. اما تجمع بار منفی در یک سر رسانا و تجمع بار مثبت در سر دیگر آن میدان الکتریکی  $E$  در طول رسانا ایجاد خواهد کرد که جهت آن از سر گرم رسانا به سمت سر سرد رساناست و نیرویی در خلاف جهت میدان به الکترون‌ها وارد می‌سازد. از طرفی این گرادیان دما منجر به گرادیان فشار  $\frac{\partial P}{\partial x}$  می‌شود که این گرادیان الکترون‌ها را در جهت میدان سوق می‌دهد. به این ترتیب نیروی وارد بر الکترون‌ها حاصل از گرادیان فشار و میدان الکتریکی  $E$  در تقابل قرار می‌گیرند، بطوریکه:

$$F_E = F_P \quad n \text{ چگالی الکترون در واحد حجم} \quad (2)$$

$$neE = \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}$$

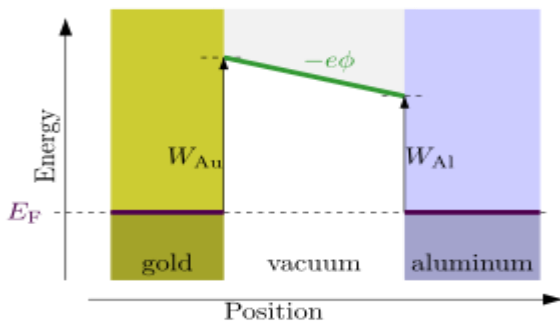
چنانچه رابطه (۱) را فقط برای مؤلفه حجمی نیروی محرکه الکتریکی گرمایی ( $V_v$ ) در نظر بگیریم:

$$V_v = \alpha_v(T_2 - T_1) \quad \rightarrow \quad \alpha_v = \frac{\partial V_v}{\partial T} = E \frac{\partial x}{\partial T} \quad (3)$$

( $\alpha_v$  مؤلفه حجمی ضریب ویژه توان ترموالکتریک می‌باشد.)

$$\alpha_v = \frac{1}{ne} \frac{\partial P}{\partial T} \quad \text{با توجه به روابط ۲ و ۳:} \quad (4)$$

پرسش: نشان دهید که در رسانای نوع  $P$  یعنی رسانایی که حاملان جریان در آن حفره‌ها هستند نیز مؤلفه حجمی ضریب ویژه توان ترموالکتریک ( $\alpha_v$ ) همان رابطه (۴) است.



شکل (۲): اتصال بین دو فلز طلا و آلومینیوم بصورت شماتیک نشان داده شده است. در این دیاگرام  $e\phi$  همان پتانسیل اتصال است که به جنس دو فلز و دمای نقطه اتصال وابسته است. این مقدار در حد میکروولت می‌باشد.

ب - مؤلفه اتصالی<sup>۵</sup> نیروی محرکه گرمایی ( $V_j$ ):

تفاوت انرژی الکترون‌هایی که بیشترین انرژی را در فلزات دارند (سطح فرمی) تا سطح صفر انرژی (حالت آزاد) را تابع کار گویند. تراز فرمی و تابع کار در فلزات مختلف متفاوت است. اگر دو فلز با هم در تماس الکتریکی قرار گیرند (حتی غیر مستقیم مثلاً با یک سیم بلند) الکترون از فلزی با سطح فرمی بالا به سمت فلز با سطح فرمی پایین‌تر جاری می‌شود تا زمانی که سطوح فرمی هر دو فلز در محل اتصال برابر شود، اما تفاوت در تابع کار همچنان باقی است. به این ترتیب در محل

اتصال اختلاف پتانسیلی معادل اختلاف تابع کار ایجاد می‌شود که پتانسیل اتصال<sup>۷</sup> نامیده می‌شود ( $V_j$ ). تراز فرمی نقطه اتصال به دما وابسته است و تغییر دما منجر به تغییر در تراز فرمی می‌گردد. در سیستم مورد بحث ما دو فلز از دو انتها به یکدیگر متصل‌اند. وقتی یکی از اتصال‌ها را گرم می‌کنیم تغییر دما باعث تغییر در تراز فرمی اتصال مورد نظر می‌شود و به این ترتیب بین ترازهای فرمی در دو اتصال اختلاف پتانسیلی ( $dV_j$ ) ایجاد می‌شود. به این ترتیب تغییر در پتانسیل شیمیایی سیستم در اثر اختلاف دما برابر خواهد بود با تغییر انرژی پتانسیل الکترون‌هایی که این اختلاف پتانسیل  $dV_j$  را طی کرده‌اند.

$$\frac{\partial \mu}{\partial T} = -ne \frac{\partial V_j}{\partial T} \rightarrow \frac{\partial V_j}{\partial T} = -\frac{1}{ne} \frac{\partial \mu}{\partial T} \rightarrow \alpha_j = -\frac{1}{ne} \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (5)$$

( $\alpha_j$ ) مؤلفه اتصالی ضریب ویژه توان ترموالکتریک می‌باشد.

به این ترتیب ضریب ویژه توان ترموالکتریک (ضریب سیبک) جمع توان جزئی  $\alpha_j$  و  $\alpha_v$  است.

$$\alpha = \alpha_j + \alpha_v = \frac{1}{ne} \frac{\partial P}{\partial T} - \frac{1}{ne} \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (6)$$

رابطه (۶) در خصوص انواع مختلف رساناها قابل کاربرد است.

#### ضریب ویژه ترموالکتریک در فلزات ( $\alpha_m$ ):

همانطور که می‌دانید تعدادی از ویژگی‌های مهم فلزات، بویژه فلزات ساده، را می‌توان برحسب مدل الکترون آزاد درک کرد. برطبق این مدل الکترون‌های با ضعیف‌ترین پیوند در اتم‌های تشکیل دهنده فلز آزادانه در حجم فلز به اطراف حرکت می‌کنند. در تقریب الکترون آزاد از نیروهای بین الکترون‌های رسانش و مغزهای یونی چشم‌پوشی می‌شود و تمام محاسبات چنان انجام می‌شوند که گویی الکترون‌های رسانش آزادانه در داخل نمونه به هرسو حرکت می‌کنند. انرژی کل تماماً بصورت انرژی جنبشی است و از انرژی پتانسیل صرفنظر می‌شود. سودمندی مدل الکترون آزاد بیشتر در مورد آزمایش‌هایی است که عمدتاً به ویژگی‌های جنبشی الکترون‌های رسانش بستگی دارند. با استفاده از تعریف انرژی میانگین الکترون‌های گاز الکترونی ( $\bar{E}$ ) و پتانسیل شیمیایی ( $\mu$ ) در مدل فوق مؤلفه‌های حجمی ( $\alpha_v$ ) و اتصالی ( $\alpha_j$ ) مربوط به ضریب ویژه توان ترموالکتریکی در فلزات را به شرح زیر محاسبه می‌کنیم.

فشار گاز الکترونی فلز در مدل گاز الکترونی به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$P = \frac{2}{3} n \bar{E} \quad (7) \quad \bar{E} \text{ انرژی میانگین الکترون‌های گاز الکترونی می‌باشد.}$$

انرژی میانگین الکترون‌های گاز الکترونی با توجه به وابستگی توزیع فرمی-دیراک به دما به شکل رابطه (۸) می‌باشد.

$$\bar{E} = \frac{3}{5} \varepsilon_F \left[ 1 + \frac{5\pi^2}{12} \left( \frac{k_B T}{\varepsilon_F} \right)^2 \right] \quad (8)$$

با توجه به تعریف  $\alpha_v$  (رابطه ۴) مؤلفه حجمی  $\alpha_v$  بصورت زیر خواهد بود:

$$\alpha_v = \frac{1}{ne} \frac{\partial P}{\partial T} = \frac{K_B \pi^2 K_B T}{e \cdot 3 \varepsilon_F} \quad (9)$$

انحراف پتانسیل شیمیایی از انرژی فرمی که با  $\mu$  نمایش داده می‌شود، برطبق مدل الکترون آزاد و وابستگی تراز فرمی به دما از

$$\mu = \varepsilon_F \left[ 1 - \frac{1}{3} \left[ \frac{\pi K_B T}{2 \varepsilon_F} \right]^2 \right] \quad (10)$$

رابطه  $(10)^9$  بدست می‌آید.

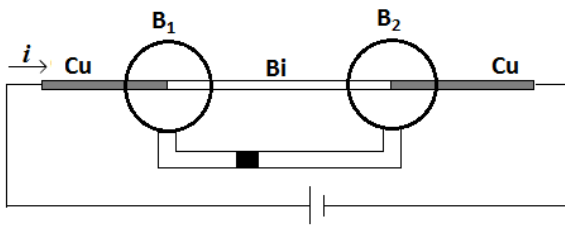
با توجه به تعریف  $\alpha_j$  (رابطه ۵) مؤلفه اتصالی  $\alpha_j$  به صورت زیر خواهد بود:

$$\alpha_j = -\frac{1}{ne} \frac{\partial \mu}{\partial T} = + \frac{\pi^2 K_B}{6ne} \frac{K_B T}{\varepsilon_F} \quad (11)$$

و لذا ضریب ویژه توان ترموالکتریک فلزات:

$$\alpha_m = \alpha_v + \alpha_j = \frac{\pi^2 K_B}{3e} \left( 1 + \frac{1}{2n} \right) \frac{K_B T}{\varepsilon_F} \quad (12)$$

رابطه (۱۲) متناسب بودن  $\alpha$  با دما ( $T$ ) را در مورد فلزات نشان می‌دهد که این بستگی خطی را در آزمایش به شکل عملی مشاهده خواهید کرد.



شکل (۳): آزمایش پلتیر

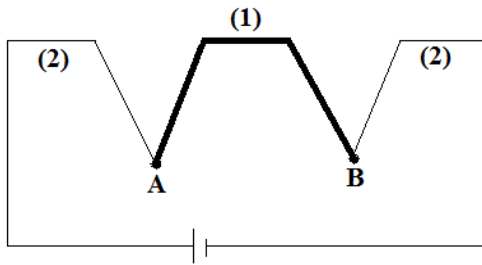
اثر پلتیر را ژان شارل آتاناس پلتیر (۱۸۴۵-۱۷۸۵)

فیزیکدان فرانسوی در سال ۱۸۳۴ کشف کرد. وی مطابق شکل (۳) میله بیسموت را از دو سر به میله مسی لحیم کرد. محل اتصال بیسموت و مس در مراکز دو ظرف قرار داشت که توسط لوله‌ای به هم متصل هستند و کمی مایع درون لوله به عنوان نشانه بین هوای دو ظرف  $B_1$  و  $B_2$  را از هم جدا می‌کند. هرگاه جریان الکتریکی از سمت چپ

وارد میله‌ها شود، هوای ظرف  $B_1$  سرد و هوای ظرف  $B_2$  گرم می‌شود و نشانه روغن در میله از راست به چپ می‌رود و چنانچه جهت جریان را تغییر دهیم هوای ظرف  $B_1$  گرم و هوای ظرف  $B_2$  سرد می‌شود و نشانه از چپ به راست می‌رود. این آزمایش نشان داد:

هرگاه جریان الکتریکی از محل اتصال دو فلز ناهمجنس بگذرد، بسته به جهت جریان در محل اتصال مقداری گرما بوجود می‌آید یا جذب می‌شود و اگر در اتصال معین جهت جریان برعکس شود، اثرهای بوجود آمدن گرما یا جذب آن جابجا می‌شود. اثر پلتیر به این دلیل رخ می‌دهد که انرژی متوسط الکترون‌هایی که در انتقال جریان الکتریکی شرکت دارند برای رساناهای مختلف متفاوت است. این تفاوت به چند عامل وابسته است: ۱- طیف انرژی الکترون‌ها ۲- چگالی آن‌ها در رسانش ۳- پراکندگی آن‌ها تحت اثر ولتاژ معین اعمال شده.

به زبان ساده‌تر، در اتصال دو رسانای غیر همجنس الکترون‌هایی که از یک رسانا به دیگری می‌روند، بسته به جهت جریان، این الکترون‌ها انرژی اضافی خود را به اتم مجاور منتقل می‌کنند یا از آن‌ها انرژی می‌گیرند. پس محل اتصال گرم یا سرد می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که اثر پلتیر با اثر ژول (یعنی گرم شدن رسانا در اثر عبور جریان الکتریکی از آن) فرق دارد. در پدیده ژول، هیچ بخش رسانا سرد نمی‌شود و اگر جهت جریان معکوس شود باز هم بر اثر عبور جریان رسانا گرم خواهد شد.



شکل (۴): نقاط A و B محل اتصال دو فلز (۱) و (۲) می باشد.

فرض کنید شدت جریان  $I$  از مداری متشکل از دو رسانای ناهمسان (۱) و (۲) مطابق شکل (۴) می‌گذرد. در محل های اتصال A و B گرمای ژول طبق رابطه  $Q = RI^2t$  بوجود می‌آید که R مقاومت محل اتصال و t زمان عبور جریان می‌باشد. این گرما در تمام طول رسانا بوجود می‌آید و تفاوتی بین نقطه اتصال و قسمت‌های دیگر وجود ندارد. اما در نقطه اتصال دو فلز متفاوت علاوه بر گرمای ژول گرمای دیگری ایجاد و یا جذب می‌گردد، که به ترتیب موجب گرم شدن یا سرد شدن این نقاط می‌گردد. این گرمای اضافی آزاد یا جذب شده در محل اتصال، گرمای پلتیر ( $Q_p$ ) نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با:

$$Q_p = \pi I t \quad (13)$$

$\pi$  ضریب پلتیر نامیده می‌شود که مقدار آن بستگی به جنس مواد و دما دارد.

نکته اینکه رابطه مستقیمی بین اثر پلتیر و اثر سیبک وجود دارد. اختلاف دما در مداری که شامل مواد متفاوت باشد، ایجاد جریان الکتریکی می‌کند و عبور جریان الکتریکی از چنین مداری اختلاف دما بوجود می‌آورد (در محل های اتصال) که عامل ارتباطی این امر، انرژی است. تامسون (لرد کلوین ۱۸۲۴-۱۹۰۷) که مؤلف نظریه ترمودینامیک اثر ترموالکتریک است، نشان داد که:

$$\pi = \alpha t \quad (14)$$

## روش انجام آزمایش:

### الف- اثر سیبک

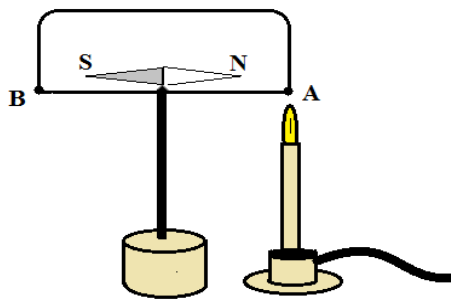
#### آزمایش اول: مشاهده اثر سیبک در ترموکوپل با عقربه مغناطیسی

ترموکوپل مغناطیسی را روی میز طوری قرار دهید که عقربه مغناطیسی به موازات مدار حلقه قرار گیرد. حالا با احتیاط چراغ بنزن را روشن کنید و آن را مطابق شکل (۵) زیر اتصال A ترموکوپل بگذرید و محل اتصال را گرم کنید.

۱-۱- مشاهدات خود را یادداشت کنید.

۱-۲- آیا با توجه به جهت انحراف عقربه مغناطیسی جهت جریان را در

حلقه ترموکوپل می‌توانید مشخص کنید؟



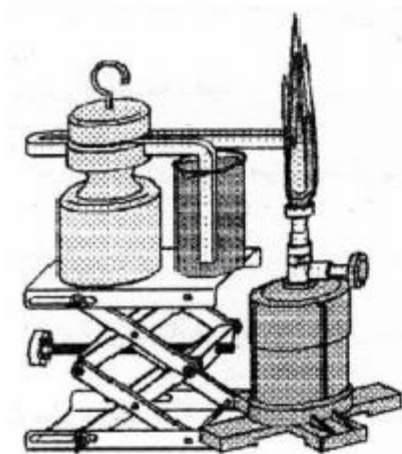
شکل (۵): ترموکوپل با عقربه مغناطیسی

## آزمایش ۲: مگنت ترموالکتریک

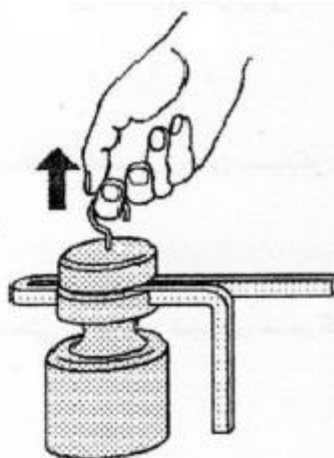
وزنه مگنت ترموالکتریک را روی جک آزمایشگاهی قرار دهید. ترموکوپل مس-کنستانتان مخصوص آن را درون شیارهای مگنت قرار داده و قرص حلقه دار (قطب دوم آهن ربا) را روی آن بگذارید و قطب مزبور را روی قطب اول ضمن اینکه می‌فشارید، به صورت دورانی حرکت دهید تا هوای محصور بین قطبین مگنت تا حد ممکن کاهش یابد.

جک آزمایشگاهی را تا جایی بالا ببرید که ارتفاع آن به حدی برسد که شعله چراغ بنزن بتواند انتهای افقی ترموکوپل را دربرگیرد و بشر را از مخلوط آب و یخ پرکرده و روی جک طوری قرار دهید که قسمت اعظم انتهای قائم ترموکوپل داخل آب قرار گیرد. (شکل ۶-۱)

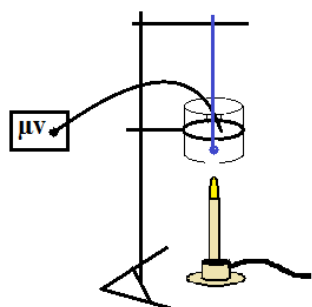
چراغ بنزن را روشن کنید و شعله آن را به انتهای افقی ترموکوپل بگیرید و صبر کنید تا گرمای آن بخوبی به ترموکوپل منتقل شود. پس از حدود ۱۵ دقیقه حلقه قطب فوقانی مگنت را به آهستگی بالا بکشید (شکل ۶-۲). ملاحظه خواهید کرد که دو قسمت مگنت به یکدیگر چسبیده‌اند و در اثر عبور جریان شدید از میله مسی (حلقه جریان ترموکوپل) بخش میانی وزنه، آهن‌ربا شده است و قرص آهنی را جذب نموده و نگه‌می‌دارد. اگرچه ولتاژ ایجاد شده در ترموکوپل اندک است، (حدود ۱۵ mV) لیکن به علت ناچیز بودن مقاومت ترموکوپل شدت جریان زیاد در آن ایجاد می‌گردد.



شکل (۶-۱)



شکل (۶-۲)

آزمایش ۳: بررسی خطی بودن بستگی نیروی محرکه الکتریکی گرمایی ( $V_T$ ) نسبت به تغییرات دما (اثر سیبک)

شکل (۷)

در شروع کار میکروولت‌متر را بدون اتصال به ترموکوپل روشن کنید. حدود ۱۵ دقیقه زمان می‌برد تا میکروولت‌متر ثابت شود. در این مدت بشر متصل به گیره را بیشتر از نیم از آب پر کنید. دماسنج را توسط نخ محکمی طوری به میله افقی آویزان کنید که درون آب و تقریباً در وسط بشر قرار گیرد. مقداری یخ به آب بشر اضافه کنید و صبر کنید تا دمای مخلوط آب و یخ به صفر درجه برسد. در این لحظه ترموکوپل آهن-کنستانتان را توسط اتصال BNC آن به میکروولت‌متر متصل کرده و سر آزاد ترموکوپل را درون بشر قرار دهید. کمی صبر کنید تا میکروولت‌متر تقریباً ثابت شود. حالا توسط پیچ ( $Z.ADJ$ ) خیلی آهسته و با حوصله میکروولت‌متر را صفر کنید. به عبارتی در دمای صفر میکروولت‌متر روی صفر تنظیم شده



است. حالا یخ‌های اضافه را از بشر خارج کرده و چراغ بنزن را با احتیاط روشن کرده و زیر بشر قرار دهید. میزان شعله را طوری تنظیم کنید که بالا رفتن دمای آب قابل کنترل باشد. به این ترتیب در دماهای خواسته شده در جدول (۱)،  $V_T$  را از روی میکروولت‌متر خوانده و در جدول (۱) یادداشت کنید.

**تذکر:** به این نکته توجه کنید که در شروع اندازه‌گیری، میکروولت‌متر را روی درجه  $200\mu V$  قرار دهید و دستگاه را در این حالت که حساس‌ترین حالت می‌باشد، صفر کنید. البته با بالا رفتن دما حتماً  $V_T$  نیز افزایش خواهد یافت و ممکن است از رنج میکروولت‌متر خارج شود. در این صورت حساسیت میکروولت‌متر را کمتر کنید و روی  $2mV$  و ... قرار دهید.

بعد از کامل شدن جدول (۱) چراغ بنزن را خاموش کنید و بشر آب گرم را با احتیاط از گیره باز کنید. بشر دوم را از مخلوط آب و یخ پر کنید و تمام مراحل فوق را با ترموکوپل کرم نیکل-آلومینیوم تکرار کرده و جدول (۲) را کامل کنید. پس از کامل شدن جدول (۲) چراغ بنزن را خاموش کنید و بشر آب گرم را خالی کنید.

توجه کنید که بدنه چراغ بنزن به شدت داغ می‌باشد، پس به بدنه آن دست نزنید.

جدول (۲): ترموکوپل کرم نیکل-آلومینیوم

T(°C)	V(mv)
۰	
۵	
۱۰	
۱۵	
۲۰	
۲۵	
۳۰	
۳۵	
۴۰	
۴۵	
۵۰	
۵۵	
۶۰	
۶۵	
۷۰	
۷۵	
۸۰	
۸۵	

جدول (۱): ترموکوپل آهن-کنستانتان

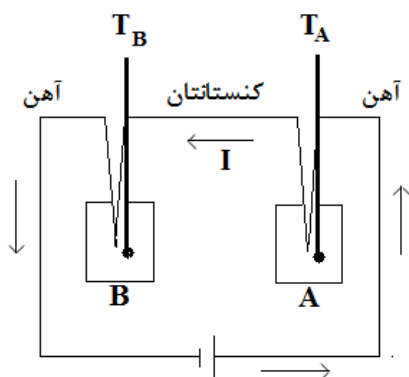
T(°C)	V(mv)
۰	
۵	
۱۰	
۱۵	
۲۰	
۲۵	
۳۰	
۳۵	
۴۰	
۴۵	
۵۰	
۵۵	
۶۰	
۶۵	
۷۰	
۷۵	
۸۰	
۸۵	

۳-۱- با توجه به جدول (۱) و (۲) نمودار ( $V_T-T$ ) را برای هر جدول در نموداری مجزا در کاغذ میلی‌متری رسم کنید.

۳-۲- شکل منحنی‌ها چگونه است؟ شکل دو نمودار فوق‌فوق چه نتیجه‌ای را به همراه دارد؟

۳-۳- شیب هر نمودار را محاسبه کنید.

## آزمایش ۴: مشاهده اثر پلتیر



شکل (۸): بررسی اثر پلتیر

یک قطعه سیم کنستانتان را از دو طرف به سیم‌های یکسان آهنی متصل کنید. نقاط اتصال را از حفره روی درب کالریمتر به داخل کالریمتر فرو ببرید. دقت کنید که طولی از سیم‌ها که وارد دو کالریمتر شده، یکسان باشند. دو دماسنج یکسان را از همان حفره به داخل کالریمتر بفرستید و حفره را با یونولیت نرمی که در اختیار دارید ببندید تا تبادل گرما با بیرون کاسته شود. دو انتهای دیگر سیم‌های آهنی را به منبع تغذیه وصل کنید (شکل ۸). قبل از روشن کردن منبع دمایی که دماسنج‌های درون دو کالریمتر A و B نشان می‌دهند را در جدول (۳) یادداشت کنید. منبع را روشن کرده و جریان را روی ۳ آمپر تنظیم کنید. هم‌زمان با روشن کردن منبع، زمان‌سنج دستی را روشن کنید. دمای هوای درون دو کالریمتر A و B را در زمان‌های خواسته شده در جدول (۳) بخوانید و یادداشت کنید.

جدول (۳):

t(min)	$T_B(^{\circ}\text{C})$	$T_A(^{\circ}\text{C})$	$T_B - T_A(^{\circ}\text{C})$
۰			
۱			
۲			
۳			
۴			
۵			
۶			
۷			
۸			
۹			
۱۰			
۱۱			
۱۲			
۱۳			
۱۴			
۱۵			

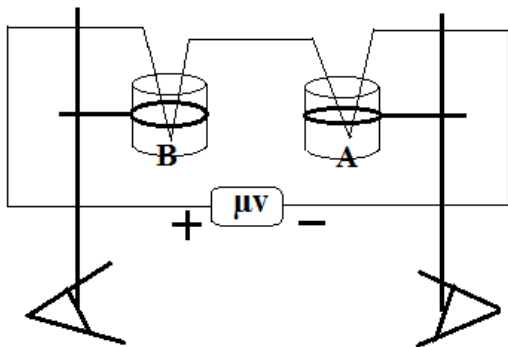
۴-۱- چرا دمای هوای درون هر دو کالریمتر بالا می‌رود. این افزایش دما از کجا ناشی شده است؟

۴-۲- آیا هر دو کالریمتر به یک اندازه افزایش دما دارند؟ این اختلاف دما از کجا ناشی شده است؟

۳-۴- دمای کدام اتصال بالاتر است A یا B؟ با توجه به جهت جریان در مدار علت گرم شدن یکی از نقاط اتصال و سرد شدن اتصال دیگر را شرح دهید.

آزمایش ۴ را با ترموکوپل دیگری که در اختیار دارید تکرار کنید و جدولی مشابه جدول (۳) را برای این ترموکوپل نیز پر کنید.

### آزمایش ۵: مشاهده رابطه بین اثر پلتیر با اثر سیبک



شکل (۹)

نقاط اتصال را با احتیاط از درون کالریمترها خارج کرده و کالریمترها را کنار بگذارید. دقت کنید که اتصال A و B جابجا نشوند. نقاط اتصال را درون بشر آب و یخ قرار دهید و سرهای آزاد سیم‌های آهنی را توسط یک کابل BNC به میکروولت‌متر وصل کنید. (شکل ۹) کمی صبر کنید و بعد از ثابت شدن میکروولت‌متر توسط پیچ (Z.ADJ) آن را با حوصله صفر کنید. (دقت کنید که تنظیم صفر باید در حالت  $\mu V$  انجام شود). چراغ بنزن را روشن کنید و آن را زیر بشری قرار دهید که حاوی اتصالی است که در آزمایش ۳ به علت عبور جریان داغ‌تر شده بود. بشر مذکور رفته رفته گرم شده و اختلاف دما بین دو اتصال

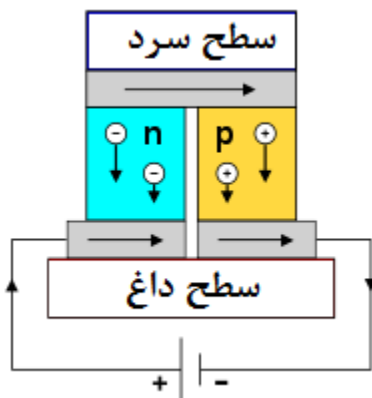
بوجود می‌آید. همانطور که ملاحظه می‌کنید در اثر اختلاف دما بین دو اتصال، میکروولت‌متر اختلاف پتانسیلی را نشان می‌دهد.

۱-۵- با توجه به تئوری آزمایش علت این اختلاف پتانسیل بوجود آمده چیست؟

۲-۵- با توجه به میکروولت‌متر جهت جریان را تشخیص داده و با آزمایش ۴ مقایسه کنید.

### آزمایش ۶: کاربردی برای اثر پلتیر

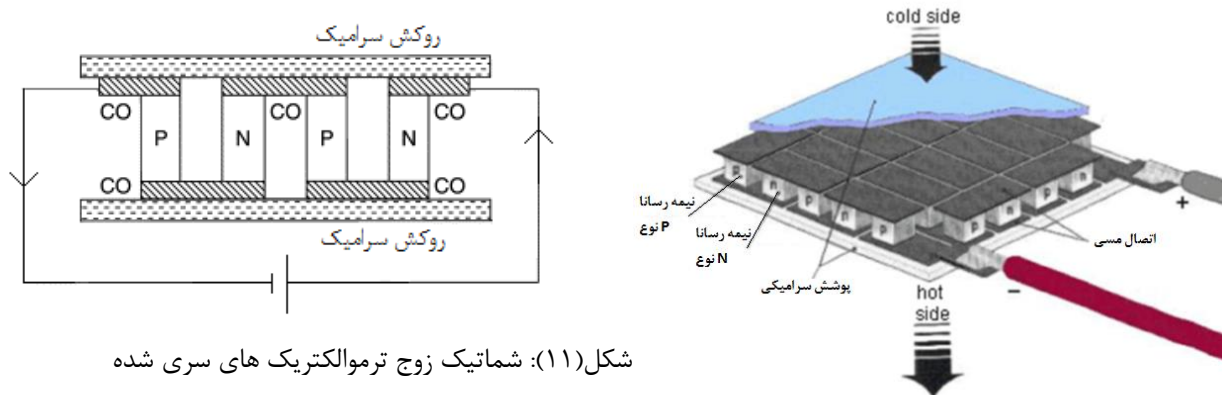
یکی از کاربردهای مهم اثر پلتیر، استفاده این اثر در خنک کننده‌های ترموالکتریک می‌باشد. همان‌طور که در اثر پلتیر شرح داده شد، عبور جریان DC از اتصال دو فلز غیرهمجنس باعث تولید گرما یا سرما در محل اتصال می‌شود (بسته به جهت جریان در



شکل (۱۰): شماتیک یک زوج ترموالکتریک

محل اتصال). المان‌های پلتیر (Peltier modules) یا خنک کننده‌های ترموالکتریک (Thermo-Electronic Cooler) ابزاری هستند که برای این منظور ساخته شده‌اند. البته معمول‌ترین مواد که به عنوان زوج‌های ترموالکتریک کاربرد دارند، نیمه‌رساناهایی از نوع P و N می‌باشند. در این ماژول‌ها اغلب از آلیاژهای بیسموت و تلورید استفاده شده است که بازدهی خوبی دارند. یکی از این زوج‌های ترموالکتریک نیمه‌رسانای نوع N و دیگری نیمه‌رسانای نوع P است که از طریق اتصالات فلزی (معمولاً مس) به هم متصل هستند (شکل ۱۰) و لایه بیرونی آن‌ها یک ماده سرامیکی است تا بتواند گرما و جریان الکتریکی را منتقل کند.

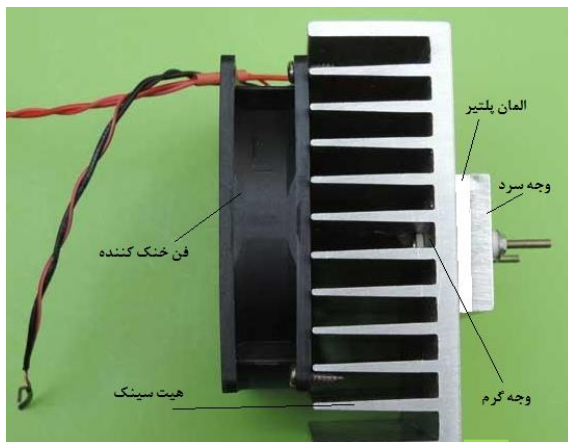
تعدادی از زوج‌های نظیر شکل (۱۰) را می‌توان بصورت سری در کنار هم قرار داد و چندین ردیف را کنار هم گذاشت تا یک صفحه پدید آید. این صفحه قادر است حرارت را در طرف سرد جذب نموده و از طرف دیگر دفع نماید و در نتیجه تولید سرما کند (شکل (۱۱)).



شکل (۱۱): شماتیک زوج ترموالکتریک های سری شده

TECs یا Thermo Electronic Chips که در فارسی به نام المان سرد کننده معروف شده است، قطعات حدوداً  $5 \times 5$  سانتی متر با ضخامت چند میلی متر (شکل ۱۲-الف) هستند که با اتصال به ولتاژ حداکثر تا ۱۲ ولت و کشیدن آمپر بسیار بالا در حدود ۶ تا ۲۵ آمپر (وابسته به وات مصرفی قطعه و نوع آن)، یک طرف المان بسیار گرم و طرف دیگر آن بسیار سرد می شود و اختلاف دمایی (از دید تئوری) تا ۶۹ درجه سانتیگراد بین وجه سرد و گرم بوجود می آید. هرچقدر بتوان دمای طرف گرم را توسط هیت سینک، فن یا واترکولینگ و ... کاهش داد دمای طرف سرد نیز پایین تر خواهد آمد و حتی به  $30^\circ$  هم می رسد. اما اگر خنک کننده قوی روی طرف گرم قرار ندهیم، المان به سرعت می سوزد. برای این منظور المان را به یک هیت سینک و فن متصل کرده ایم که به محض اتصال به منبع روشن خواهد شد و طرف داغ المان را خنک می کند (شکل ۱۲-ب).

برای انجام آزمایش؛ ابتدا مطمئن شوید منبع خاموش است و پیچ تنظیم ولتاژ روی صفر باشد. حالا دو سر المان را به منبع تغذیه DC متصل کنید. (سیم قرمز به مثبت منبع و سیم سیاه به منفی منبع متصل شود). سپس منبع را روشن کرده و ولتاژ را تا ۶ ولت بالا ببرید. همانطور که ملاحظه می کنید، فن خنک کننده شروع به کار می کند. بعد از چند ثانیه وجه خارجی المان به شدت سرد می شود. در این حالت حسگر دماسنج را روی وجه سرد گذاشته و  $30$  ثانیه نگه دارید. دمای وجه سرد را بخوانید. سپس حسگر را روی وجه گرم گذاشته و  $30$  ثانیه صبر کرده و دمای وجه گرم را بخوانید. اختلاف دما بین دو وجه گرم و سرد المان در ولتاژ ۶ ولت چند درجه سانتیگراد است؟



(ب - ۱۲)



(الف - ۱۲)

آزمایش دوم

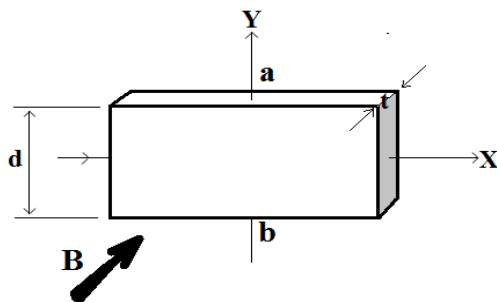
## اثر هال

## هدف آزمایش:

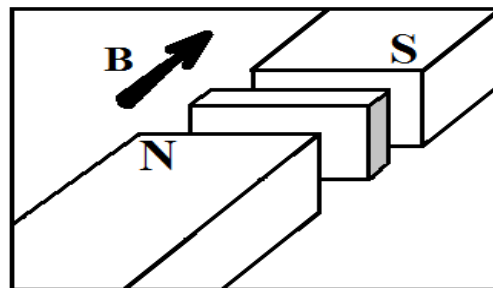
مطالعه اثر هال<sup>۱۰</sup> در فلزات، استفاده از اثر هال برای تعیین نوع حامل‌های بار الکتریکی در دو رسانای مختلف، محاسبه چگالی حجمی حامل‌های بار الکتریکی در رساناهای مورد آزمایش

## تئوری آزمایش:

همانطور که می‌دانید، باریکه‌ای از الکترون‌ها را در خلأ می‌توان با ایجاد میدان مغناطیسی منحرف کرد. اما آیا الکترون‌های رسانش در یک رسانا مثلاً یک سیم مسی را هم می‌توان با میدان مغناطیسی منحرف کرد؟ در سال ۱۸۷۹ ادوین هربرت هال<sup>۱۱</sup> که دانشجوی دکترای ۲۴ ساله در دانشگاه جان هاپکینز بود، نشان داد که این امر امکان پذیر است. این اثر که به اثر هال معروف است به ما امکان می‌دهد تا تعیین کنیم حامل‌های بار در یک رسانا دارای بار مثبت هستند یا بار منفی. علاوه بر آن می‌توانیم تعداد این حامل‌ها در واحد حجم رسانا را تعیین کنیم. به این ترتیب که با قرار دادن یک ورقه بسیار نازک فلزی (مثلاً مسی) در میدان مغناطیسی، طوری که نرمال صفحه مذکور با میدان مغناطیسی هم‌راستا باشد (شکل ۱-۱)، و عبور دادن جریان الکتریکی از آن یک ولتاژ عرضی به نام ولتاژ "هال" ایجاد می‌گردد که با تعیین جهت این ولتاژ نوع حامل‌های بار و با اندازه‌گیری مقدار ولتاژ هال چگالی حامل‌های بار آزاد الکتریکی بدست می‌آید.



(۱-۲)



(۱-۱)

شکل (۱): ورقه رسانا به ضخامت  $t$  و عرض  $d$

فرض کنید ورقه‌ای رسانا به ضخامت  $t$  مطابق شکل (۱-۲) طوری در میدان یکنواخت با شدت القای مغناطیسی قرار گرفته که خطوط میدان بر سطح رسانا عمود است. اگر شدت جریان  $I$  در امتداد طول رسانا عبور داده شود، به هر یک از بارهای الکتریکی حامل جریان، نیروی لورنتس (رابطه ۱) وارد خواهد شد.

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (۱)$$

همانطور که می‌دانید کاملاً قراردادی جهت جریان در مدار، جهت حرکت بارهای مثبت است پس اگر رسانای مذکور نوع  $P$  باشد، یعنی حامل‌های جریان الکتریکی بارهای مثبت هستند و جهت حرکت ذرات باردار مثبت درون میدان مغناطیسی از چپ به راست خواهد بود (شکل ۱-۲). بنابراین نیروی وارد بر حامل‌های بار طبق قانون دست راست، آن‌ها را به سمت نقطه  $a$  در شکل (۱-۲)

می‌کشاند. با گذشت زمان بارهای مثبت در لبه  $a$  و بارهای منفی در لبه  $b$  ورقه رسانا تجمع خواهند داشت. برعکس اگر رسانا از نوع  $n$  باشد، یعنی حامل‌های بار منفی باشند جهت حرکتشان خلاف جهت جریان الکتریکی نشان داده شده در شکل (۲-۱) خواهد بود و باز طبق قانون دست راست نیروی وارده، آن‌ها را به لبه  $a$  سوق می‌دهد و این‌بار تجمع بار منفی در لبه  $a$  و تجمع بار مثبت در لبه  $b$  خواهیم داشت.

در اثر متراکم شدن بارهای الکتریکی غیر همنام در لبه‌های ورقه رسانا، اختلاف پتانسیلی بین دو لبه بوجود می‌آید. این اختلاف پتانسیل عامل ایجاد میدان الکتریکی  $E$  در عرض ورقه می‌شود و این میدان الکتریکی نیز خود نیرویی بر بارهای جاری در طول ورقه رسانا وارد می‌سازد. هرچه تجمع بار در لبه‌ها بیشتر می‌شود، نیروی الکتریکی وارد بر حامل‌های جاری در طول ورقه بیشتر شده و بالاخره به جایی می‌رسد که نیروی الکتریکی وارد بر حامل‌های بار با نیروی مغناطیسی وارد بر آن‌ها به تعادل می‌رسند و اختلاف پتانسیل بوجود آمده بین دو لبه ثابت خواهد ماند و دیگر افزایش نخواهد یافت. به این اختلاف پتانسیل ولتاژ هال گفته می‌شود و با  $V_H$  نمایش می‌دهند که مقدار آن برابر است با:

$$V_H = Ed \quad (2) \quad (d \text{ پهنای ورقه رساناست})$$

$$F_M = F_E$$

$$qv_b = Eq \quad \rightarrow \quad vB = E = \frac{V_H}{d} \quad \rightarrow \quad V_H = vBd \quad (3)$$

در رابطه (۴)  $v$  سرعت حرکت یا سرعت سوق حامل‌های بار الکتریکی است که رابطه آن با چگالی جریان ( $J$ ) به صورت رابطه (۴) است.<sup>۱۲</sup>

$$v = \frac{J}{nq} = \frac{I/A}{nq} \quad (4)$$

در رابطه (۴)  $A$  سطح مقطع ورقه رساناست. بنابراین طبق شکل (۲-۱)  $A$  برابر است با  $A = td$  و  $n$  چگالی حجمی حامل‌های جریان است. با قرار دادن مقدار  $A$  در رابطه (۴) ولتاژ هال برابر است با:

$$V_H = \frac{IB}{nqt} \quad (5)$$

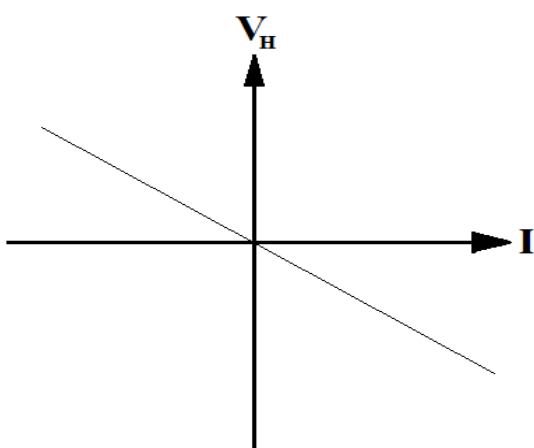
$$V_H = R_H \frac{BI}{t} \quad (6) \quad \text{مقدار } \frac{1}{nq} \text{ را ضریب هال گویند و با } R_H \text{ نشان می‌دهند. لذا:}$$

ضریب هال عدد ثابتی است که برای فلزات مختلف مقادیر متفاوتی دارد و علامت آن نشان دهنده نوع حامل‌های بار در رساناست. چنانچه  $R_H$  مثبت باشد، حامل‌های بار حفره‌ها ( $q=+e$ ) و چنانچه منفی باشد حامل‌های بار الکترون‌ها ( $q=-e$ ) می‌باشند. علاوه بر این با اندازه‌گیری ضریب هال با توجه به تعریف آن می‌توان چگالی حجمی حامل‌های بار را محاسبه کرد. ضریب هال برای چند فلز مختلف در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): ضریب هال برای چند فلز متفاوت

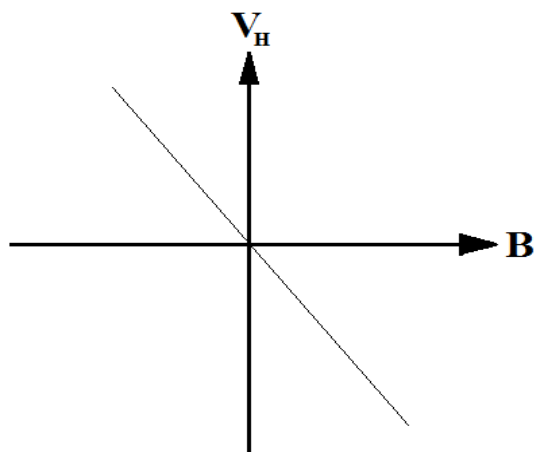
element	$R_H$ ( $m^3/c$ )	element	$R_H$ ( $m^3/c$ )
Al	$+ 9.9 \times 10^{-11}$	Ag	$- 9 \times 10^{-11}$
Zn	$+ 6.4 \times 10^{-11}$	Cu	$- 5.3 \times 10^{-11}$

همانطور که از رابطه (۵) پیداست، در صورت ثابت نگه داشتن جریان گذرنده از طول رسانا ( $I$ )، رابطه ولتاژ هال ( $V_H$ ) با شدت القا مغناطیسی ( $B$ ) یک رابطه خطی است که شیب این خط برابر است با  $\frac{I}{nqt}$  (شکل ۲) و هرگاه  $B$  را ثابت نگه داریم، رابطه  $V_H$  با شدت جریان ( $I$ ) خطی بوده و شیب این خط برابر می‌شود با  $\frac{B}{nqt}$  (شکل ۳). آزمایش نشان می‌دهد که ضریب زاویه خط فوق برای فلزاتی مانند مس منفی (اثر هال عادی) و در مورد رساناهایی مانند روی مثبت است (اثر هال غیر عادی) که اولی بخاطر وجود الکترون‌های آزاد و دومی به دلیل کمبود الکترون آزاد در رساناست.



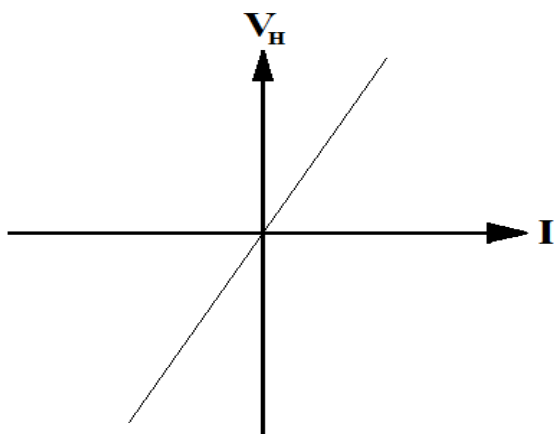
ولتاژ هال بصورت تابعی از شدت جریان در مورد فلز مس

(۲-۲)



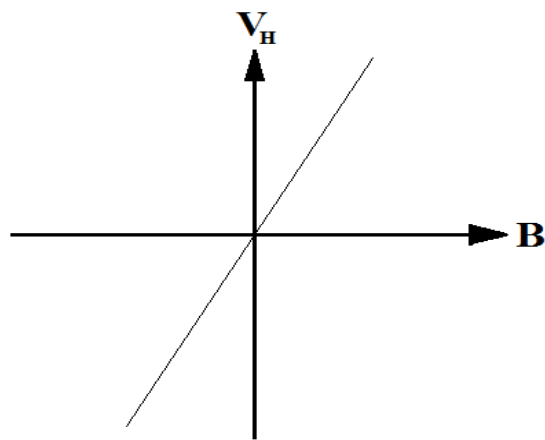
ولتاژ هال بصورت تابعی از القای مغناطیسی در مورد فلز مس

(۲-۱)



ولتاژ هال بصورت تابعی از شدت جریان در مورد فلز روی

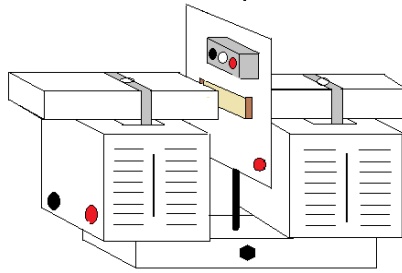
(۳-۲)



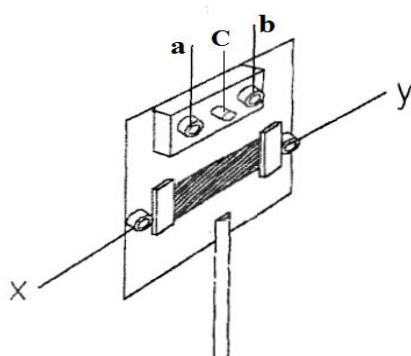
ولتاژ هال بصورت تابعی از القای مغناطیسی در مورد فلز روی

(۳-۱)

## روش آزمایش:



شکل (۴): الکترومگنت که میدان مغناطیسی لازم را تأمین می‌کند.



شکل (۵): بُرد یا تابلوی هال که ورقه رسانای مورد آزمایش روی آن نصب شده است.

سیم پیچ های آهنربای الکتریکی را روی بازوهای قائم آن قرار دهید و آن ها را با سیم بطور سری ببندید و سیم پیچ ها را با یک منبع تغذیه DC که حداقل تا ۵ آمپر را تأمین می‌نماید سری کنید. پایه یکی از بُردهای هال را درون سوراخ کف هسته U شکل طوری قرار دهید که صفحه بُرد عمود بر امتداد میدان گردد. دو قطعه هسته مستطیلی را روی هسته U شکل قرار داده و توسط دو گیره فنری مربوطه طوری محکم کنید که در دو طرف تابلو قرار گرفته و فاصله آن ها از یکدیگر ۷ mm باشد. در این حال هسته ها از طرفین بر تابلو مماس می‌شوند (شکل ۴).

میکروولت‌متر را بدون اتصال به جایی روشن کنید و حداقل ۱۰ دقیقه صبر کنید تا تقریباً ثابت شود. خروجی ولتاژ هال که در مجاورت پتانسیومتر تابلو هال قرار دارند را (نقاط a و b در شکل ۵) توسط یک کابل BNC فیش دار به ورودی BNC میکروولت‌متر متصل کرده چند دقیقه صبر کنید تا ثابت شود. حالا توسط پیچ Z.ADJ به آهستگی و با حوصله میکروولت‌متر را صفر کنید. منبع جریان DC را توسط دو سیم رابط به دو سر ورقه رسانای مورد آزمایش که روی بُرد هال نصب شده وصل کنید (نقاط x و y در شکل ۵)

آزمایش ۱: رسم منحنی  $V_H$  بر حسب B

در این قسمت از آزمایش جریان گذرنده از ورقه رسانا را ثابت نگه می‌داریم و شدت القای مغناطیسی (B) را کم کم افزایش داده و به این ترتیب بستگی ولتاژ هال را به میدان بررسی می‌کنیم. برای این منظور ابتدا منبع جریان DC را که به نقاط X و Y بُرد متصل است را روشن کرده و با چرخاندن پیچ مربوط به جریان (current) جریان به ۱۰ آمپر رسانده و دیگر تغییر ندهید. چند لحظه صبر کنید تا میکروولت‌متر ثابت شود. حالا توسط پیچ پتانسیومتر (C در شکل ۵) خیلی آهسته و با حوصله میکروولت‌متر را دوباره صفر کنید. الکترومگنت (آهنربای مغناطیسی) را به منبع تغذیه مخصوص وصل کرده و منبع را روشن کنید. شدت جریان منبع را ( $I_M$ ) را روی مقادیر خواسته شده در جدول (۲) تنظیم کنید و و هر بار ولتاژ هال را از روی میکروولت‌متر قرائت کنید و نتایج آزمایش را در جدول (۲) ثبت کنید.

با استفاده از نمودار تغییرات القا مغناطیسی B بر حسب شدت جریان  $I_M$  (نمودار ارائه شده در صفحه ۱۸) مقادیر B را تعیین و در جداول (۲ و ۳) درج نمایید.



جدول (۳): تغییرات  $V_H$  بر حسب  $B$  برای نمونه مس

$I$ (A)	$I_M$ (A)	$B$ (mT)	$V_H$ ( $\mu$ V)
۱۰	۰/۵		
۱۰	۱		
۱۰	۱/۵		
۱۰	۲		
۱۰	۲/۵		
۱۰	۳		
۱۰	۳/۵		
۱۰	۴		
۱۰	۴/۵		
۱۰	۵		

جدول (۲): تغییرات  $V_H$  بر حسب  $B$  برای نمونه روی

$I$ (A)	$I_M$ (A)	$B$ (mT)	$V_H$ ( $\mu$ V)
۱۰	۰/۵		
۱۰	۱		
۱۰	۱/۵		
۱۰	۲		
۱۰	۲/۵		
۱۰	۳		
۱۰	۳/۵		
۱۰	۴		
۱۰	۴/۵		
۱۰	۵		

۱-۱- با استفاده از جدول (۲) منحنی تغییرات  $V_H$  را بر حسب  $B$  ترسیم کنید. با توجه به شکل نمودار بستگی  $V_H$  به  $B$  چگونه است؟

۱-۲- با استفاده از رابطه (۶) و با توجه به اینکه ضخامت ورقه رسانای مورد آزمایش  $30 \mu\text{m}$  است، مقدار ضریب هال ( $R_H$ ) را محاسبه کرده و با مقدار بدست آمده مقایسه کنید.

۱-۳- با استفاده از تعریف ثابت هال و بستگی آن به چگالی حجمی حامل های بار ( $n$ ) مقدار  $n$  را برای رسانای مورد آزمایش محاسبه کنید. (بار الکتریکی الکترون را  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  در نظر بگیرید).

پس از پایان اندازه گیری هر دو منبع را صفر و سپس خاموش کنید. اما میکروولتметр را خاموش نکنید.

### آزمایش ۲: رسم منحنی $V_H$ بر حسب $I$

برای انجام قسمت دوم آزمایش مجدداً صبر کنید تا میکروولتметр تقریباً ثابت شود و در حالی که منابع خاموش هستند توسط پیچ  $Z.ADJ$  میکروولتметр را صفر کنید. حالا منبع تغذیه الکترومگنت را روشن کرده و توسط پیچ تنظیم شدت جریان را روی ۴ آمپر ( $I_M = 4 \text{ A}$ ) تنظیم کنید. چنانچه میکروولتметр از حالت صفر خارج شد مجدداً توسط پیچ پتانسیومتر آن را با حوصله صفر کنید. حالا منبع جریان متصل به بُرد هال را روشن کرده و جریان را روی مقادیر خواسته شده در جدول (۴) تنظیم کنید و هر بار ولتاژ هال را از روی میکروولتметр قرائت کنید و نتایج آزمایش را در جداول (۴ و ۵) ثبت کنید.

جدول (۴): تغییرات  $V_H$  برحسب  $I$  برای نمونه روی

$I (A)$	$I_M(A)$	$B (mT)$	$V_H (\mu V)$
۱	۴		
۲	۴		
۳	۴		
۴	۴		
۵	۴		
۶	۴		
۷	۴		
۸	۴		
۹	۴		
۱۰	۴		

جدول (۵): تغییرات  $V_H$  برحسب  $I$  برای نمونه مس

$I (A)$	$I_M(A)$	$B (mT)$	$V_H (\mu V)$
۱	۴		
۲	۴		
۳	۴		
۴	۴		
۵	۴		
۶	۴		
۷	۴		
۸	۴		
۹	۴		
۱۰	۴		

۲-۱- با استفاده از جدول (۴) منحنی تغییرات  $V_H$  را برحسب  $I$  ترسیم کنید. با توجه به شکل نمودار بستگی  $V_H$  به  $I$  چگونه است؟

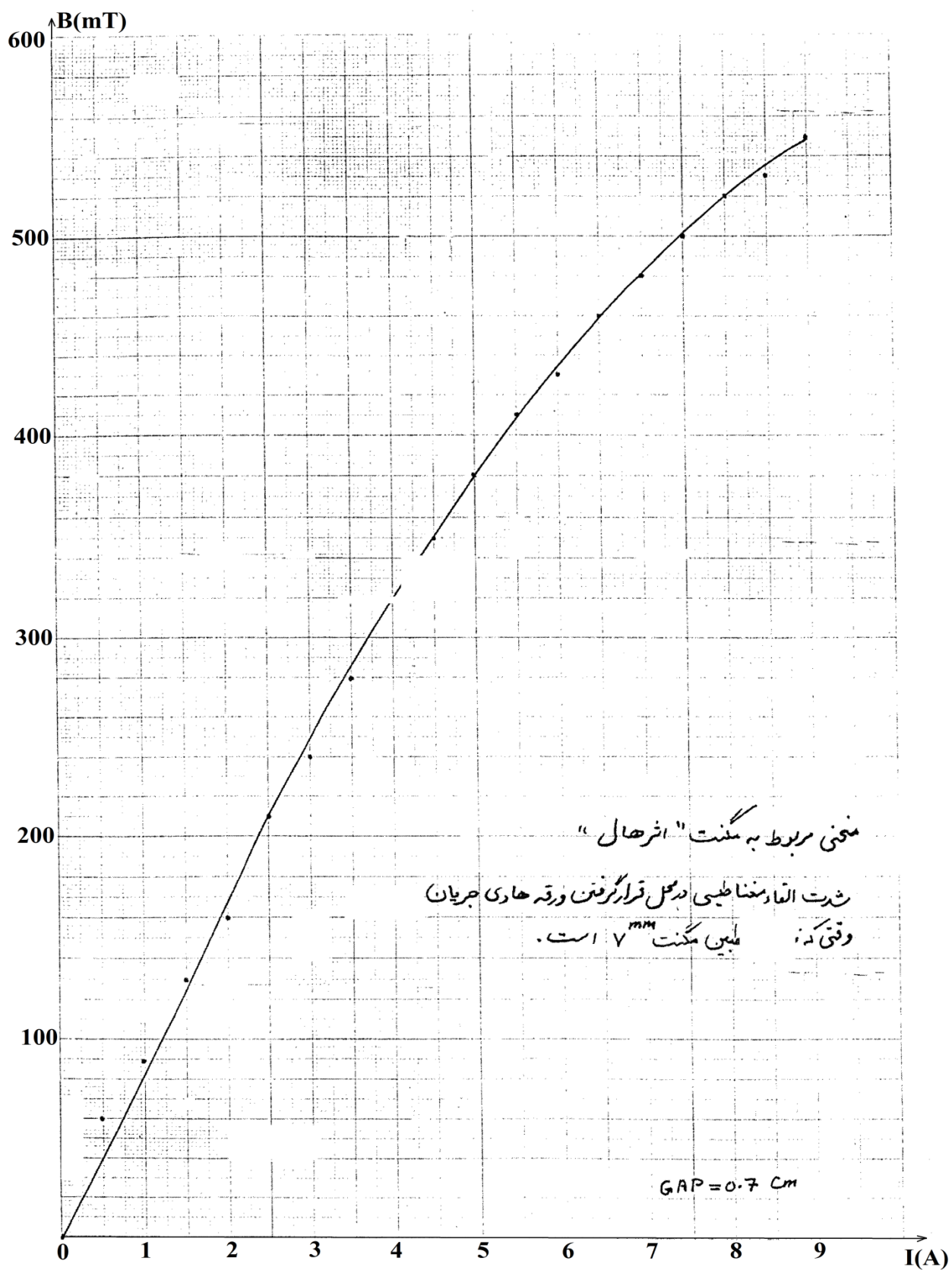
۲-۲- با استفاده از رابطه (۶) و با توجه به اینکه ضخامت ورقه رسانای مورد آزمایش  $30 \mu m$  است، مقدار ثابت هال ( $R_H$ ) را محاسبه کرده و با مقدار واقعی مقایسه کنید.

۲-۳- با استفاده از تعریف ثابت هال و بستگی آن به چگالی حجمی حامل های بار ( $n$ ) مقدار  $n$  را برای رسانای مورد آزمایش محاسبه کنید. (بار الکتریکی الکترون را  $e = 1/6 \times 10^{-19} C$  در نظر بگیرید).

دقت کنید که هر دو آزمایش را برای هر دو نمونه باید انجام دهید. ابتدا یکی از بُردها را به روشی که قبلاً توضیح داده شده در الکترومگنت قرار دهید و هر دو آزمایش را با رعایت نکاتی که گفته شد انجام دهید و بعد بُرد را عوض کرده و هر دو آزمایش را برای نمونه بعدی تکرار کنید.

تذکره: در هنگام عوض کردن بُردها ابتدا هر دو منبع را صفر و خاموش کنید. میکروولت‌متر را خاموش نکنید ولی حتماً کابل BNC را از بُرد جدا کنید و بعد از تعویض نمونه دوباره به آن وصل کنید.

۲-۴- با توجه به شکل نمودارها و با توجه به علامت  $R_H$  که برای دو نمونه بدست آورده‌اید در مورد نوع چگالی حامل‌ها توضیح دهید.



آزمایش سوم

## رسانش در جامدات

## هدف آزمایش:

بررسی نوع بستگی مقاومت اهمی یک فلز نجیب<sup>۱۳</sup> و یک ماده نیم رسانا به دما، تعیین ضریب گرمایی فلز نجیب در یک محدوده دمایی مشخص

## وسایل آزمایش:

مقاومت از جنس فلز نجیب، مقاومت نیم رسانا، سیستم الکترونیک شامل منبع تغذیه DC همراه گالوانومتر، پل تار یک متری، جعبه مقاومت، کوره الکتریکی، دماسنج دیجیتال، کلید مورس، مولتی متر و سیم‌های رابط

## تئوری آزمایش:

مقاومت الکتریکی فلزات تابعی از دما هستند به طوری که می توان یک رابطه خطی بین مقاومت آن ها و دمای مربوطه (حداقل در محدوده وسیعی از دما) بصورت زیر نوشت:<sup>۱۴</sup>

$$R(\theta) = R(0)(1 + \alpha\theta) \quad (1)$$

که در آن  $R(0)$  مقاومت فلز در دمای صفر سلسیوس،  $\theta$  دما بر حسب درجه سلسیوس و  $\alpha$  مقدار ثابتی است که ضریب گرمایی مقاومت آن فلز نامیده می شود.

ضریب گرمایی  $\alpha$  در مورد فلزات نجیب مانند طلا و پلاتین ثابت و در مورد سایر فلزات بستگی اندکی به دما دارد، لیکن در خصوص مواد نیم رسانا بستگی آن به دما بسیار شدید است.

البته مواد نیم رسانا به دو دسته<sup>۱۵</sup> NTC و<sup>۱۶</sup> PTC تقسیم می شوند. دسته اول ضریب گرمایی منفی داشته و مقاومت آن ها با افزایش دما کاهش می یابند. اما دسته دوم ضریب گرمایی مثبت داشته و مقاومت آن با افزایش دما افزایش پیدا می کند. هر یک از آن ها به نوبه ی خود موارد استفاده مهمی در صنعت، دستگاه های الکترونیکی و کنترل دما دارند.

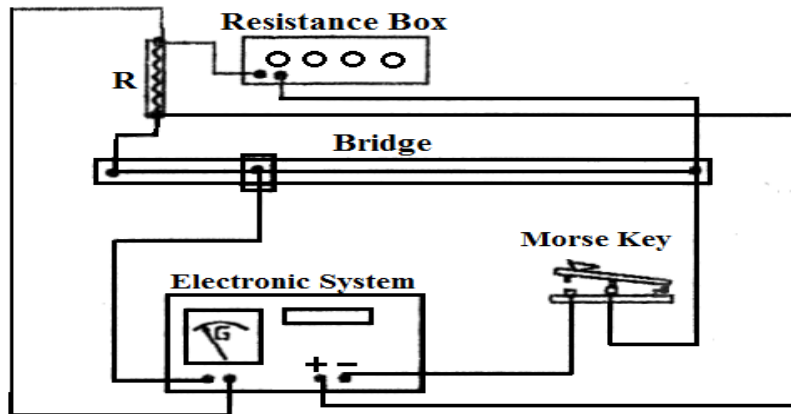
در این آزمایش با رسم منحنی تغییرات مقاومت یک فلز نجیب و یک مقاومت نیمه هادی بر حسب دما، ضمن مطالعه نوع بستگی  $\alpha$  به دما، اختلاف این بستگی برای فلز و نیم رسانا را مشاهده می کنیم. در ادامه از نمودار فوق استفاده کرده و  $\alpha$  را برای مقاومت فلزی محاسبه می کنیم.

## روش آزمایش:

این آزمایش می تواند بین دماهای  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $200^{\circ}\text{C}$  انجام پذیرد که برای دماهای بالای دمای اتاق از کوره الکتریکی استفاده می شود و برای دماهای زیر صفر سلسیوس می توان از روش های گوناگون تبرید استفاده نمود. البته ما در آزمایشگاه این تغییرات را از دمای اتاق تا  $200^{\circ}\text{C}$  بررسی می کنیم.

<sup>۱۳</sup> Nobel Metal<sup>۱۴</sup> مبانی فیزیک (جلد دوم) هالیدی-رزنیک-واکر<sup>۱۵</sup> Negative thermal coefficient<sup>۱۶</sup> Positive thermal coefficient

## آزمایش ۱: اندازه‌گیری مقاومت یک نیم رسانا در دمای اتاق و بالاتر



شکل (۱):  $R$  مقاومت فلز نجیب یا نیم رسانایی است که در کوره قرار گرفته است.

در این آزمایش از مدار پل تار برای اندازه‌گیری مقاومت مجهول استفاده می‌کنیم (شکل ۱). البته همانطور که در شکل ملاحظه می‌کنید بین پل تار و منبع DC یک کلید مورس تعبیه شده است. این کلید در حالت عادی مدار را قطع کرده و تا زمانی که کلید را پایین نفشاریم اجازه عبور جریان از مقاومت‌ها و پل را نمی‌دهد. علت استفاده لحظه‌ای از کلید مورس این است که چنانچه در طول آزمایش به طور مداوم جریان از مقاومت مورد آزمایش عبور کند، مقاومت گرم شده و دمای آن تغییر می‌کند. این تغییر دما خود عامل تغییر مقاومت است. مخصوصاً در مورد مقاومت نیمه‌رسانا این مسئله خیلی اهمیت دارد. وقتی از درستی مدار مطمئن شدید، مقاومت نیمه‌رسانا را در درون کوره الکتریکی قرار دهید و سیم حسگر دما مربوط به دماسنج دیجیتال را از حفره پشت کوره الکتریکی وارد کوره کرده و پس از عبور دادن حسگر از سوراخ مرکزی مجموعه مقاومت آن را در نزدیکی مقاومت تثبیت نمایید. دماسنج را روشن کرده و صبر کنید تا ثابت شود. دمای مشاهده شده دمای محیط است.

مقاومت جعبه مقاومت ( $R_S$ ) را حدود  $1000 \Omega$  تنظیم کنید. کلید مورس را بفشارید تا جریان در مدار برقرار شود. گالوانومتر منحرف می‌شود که نشان دهنده حضور جریان در مدار است. با جابجا کردن لغزنده روی پل گالوانومتر را صفر کنید. در این حالت طول‌های  $L_1$  و  $L_2$  را از روی پل تار یادداشت کرده و با استفاده از رابطه پل تار مقاومت مجهول را در دمای محیط محاسبه کنید. توجه کنید که برای دستیابی به دقت بیشتر، اگر یکی از طول‌ها کمتر از  $25\text{cm}$  یا بیشتر از  $75\text{cm}$  شد، مقدار مقاومت جعبه را تغییر دهید و حتی المقدور سعی کنید تا طول‌های  $L_1$  و  $L_2$  کمتر از  $25\text{cm}$  نشود.

**پرسش:** رابطه مربوط به پل تار را با اثبات بدست آورید.

با روشن کردن کلید سه راهی برق متصل به کوره برای چند ثانیه اجازه دهید دما حدود  $10$  درجه افزایش پیدا کند. بلافاصله سه راهی را خاموش کرده و جریان کوره را قطع کنید. در دمای جدید به روشی که شرح داده شد، مقاومت مجهول را اندازه‌گیری نمایید و مقادیر را در جدول (۱) ثبت کنید. به ازای حدوداً هر  $10$  درجه افزایش دما مقاومت را اندازه‌گیری کرده و این روند را تا دمای  $200^\circ\text{C}$  تکرار کرده و جدول (۱) را کامل نمایید.

۱-۲- با استفاده از داده‌های جدول (۱) نمودار اندازه مقاومت بر حسب دما ( $R - \theta$ ) را برای مقاومت نیمه‌رسانا در کاغذ میلی‌متری رسم کنید.

۱-۳- در مورد شکل منحنی بحث کنید.

جدول (۱): مقاومت نیمه‌رسانا

$R (\Omega)$	$R_S (\Omega)$	$L_2$ (cm)	$L_1$ (cm)	$\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
					۱
					۲
					۳
					۴
					۵
					۶
					۷
					۸
					۹
					۱۰
					۱۱
					۱۲
					۱۳
					۱۴
					۱۵
					۱۶
					۱۷
					۱۸
					۱۹
					۲۰

### آزمایش ۲: اندازه‌گیری مقاومت یک فلز نجیب در دمای اتاق و بالاتر

با کمک دستکش مخصوص، مقاومت نیمه‌رسانا را از کوره خارج کنید و طوری روی میز قرار دهید که به میز کار شما آسیبی نزنند. توجه کنید که مقاومت به شدت داغ است و اگر احتیاط نکنید ممکن است باعث سوختگی شدید دست شما شود. این بار مقاومت فلزی را وارد کوره کرده و به همان شیوه آزمایش ۱، حسگر دماسنج دیجیتال را وارد جای مخصوص آن در کوره نمایید. چون کوره قبلاً تا دمای بالاتر از  $200^{\circ}\text{C}$  گرم شده است، چند لحظه صبر کنید تا مقاومت و کوره هم دما شوند. اگر دمای کوره به پایین‌تر از  $200^{\circ}\text{C}$  درجه رسید، با روشن کردن کوره دمای کوره و مقاومت را به حدود  $200^{\circ}\text{C}$  برسانید و در این دما با وصل کردن کلید مورس به روش پل تار مقاومت مجهول را محاسبه کنید. البته قبل از زدن کلید مورس جعبه مقاومت را ( $R_S$ ) حدود  $100\Omega$  تنظیم نمایید. پس از این صبر کنید تا دمای کوره رفته رفته پایین بیاید و تقریباً به ازای هر  $10$  درجه کاهش دما مقاومت را اندازه‌گیری کرده و جدول (۲) را کامل نمایید. توجه کنید که برای دستیابی به دقت بیشتر، با تغییر مقاومت جعبه مقاومت، حتی المقدور سعی کنید تا طول های  $L_1$  و  $L_2$  کمتر از  $25\text{cm}$  نشود.

۲-۱- محاسبات مقاومت مجهول را برای یک دما کامل بنویسید.

۲-۲- با استفاده از داده‌های جدول (۲) نمودار اندازه مقاومت بر حسب دما ( $R - \theta$ ) را برای مقاومت فلز نجیب در یک کاغذ میلی‌متری رسم کنید.

۲-۳- شکل نمودار چگونه است؟

۲-۴- با توجه به نمودار رسم شده، ضریب گرمایی مقاومت ( $\alpha$ ) را محاسبه نمایید. با توجه به مقداری که برای این ضریب بدست آورده‌اید، نام فلز نجیبی که در آزمایش استفاده شده است را پیدا کنید.

جدول (۲): مقاومت فلز نجیب

R ( $\Omega$ )	R <sub>s</sub> ( $\Omega$ )	L <sub>2</sub> (cm)	L <sub>1</sub> (cm)	$\theta$ ( $^{\circ}$ C)	
					۱
					۲
					۳
					۴
					۵
					۶
					۷
					۸
					۹
					۱۰
					۱۱
					۱۲
					۱۳
					۱۴
					۱۵
					۱۶
					۱۷
					۱۸
					۱۹
					۲۰

۲-۵- یک کاربرد از این خاصیت مواد نیمه‌رسانا (تغییرات اندازه مقاومت بر اثر تغییر دما) در صنعت ذکر کنید.

آزمایش چهارم

## آزمایش نور رسانش (Photo Conductivity)

## هدف آزمایش:

اندازه‌گیری شدت جریان نوری  $I_{ph}$  برحسب تابعی از ولتاژ در روشنایی ثابت  $\phi$ ، اندازه‌گیری شدت جریان نوری  $I_{ph}$  برحسب تابعی از روشنایی  $\phi$  در ولتاژ ثابت

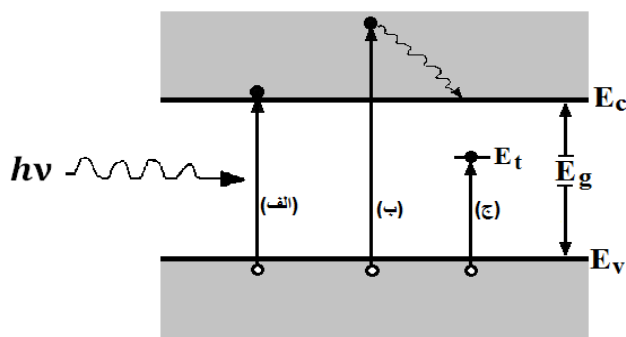
## وسایل آزمایش:

مقاومت نوری CdS با محفظه مربوط، شکاف متغییر، پایه V شکل بزرگ، ریل اپتیکی، ۲ عدد قطبشگر مدرج، نور افکن با منبع تغذیه مربوطه، عدسی با فاصله کانونی  $f = 100 \text{ mm}$  با نگهدارنده، گیره چند منظوره، منشور کرون و پایه نگهدارنده مدرج، میکروآمپر متر، منبع تغذیه ۰-۳۰ ولت با ولت سنج، سیم رابط

## تئوری آزمایش:

فئورسانندگی یا نوررسانش پدیده‌ای است که در آن یک ماده بر اثر جذب تابش الکترومغناطیس، مانند امواج نور مرئی، موج فرابنفش، موج فرورسرخ یا پرتوی گاما، هدایت الکتریکی بیشتری از خود نشان می‌دهد. همانطور که می‌دانید، نیمه رساناها هدایت الکتریکی ضعیفی دارند زیرا تعداد کمی الکترون آزاد (الکترون‌های موجود در نوار رسانش<sup>۱۸</sup>) دارند و بیشتر الکترون‌ها در نوار ظرفیت<sup>۱۹</sup> اقرار دارند. اما اگر انرژی بیرونی کافی به این الکترون‌ها برسد، می‌توانند به لایه رسانش رفته و به هدایت الکتریکی کمک کنند. وقتی نیمه‌رسانایی تحت نوردهی قرار می‌گیرد، فوتون‌ها بسته به اینکه انرژی فوتون و انرژی گاف نوری،  $E_g$ ، چه مقدار باشند، ممکن است جذب شوند یا نشوند.

چنانچه انرژی فوتون،  $h\nu$ ، برابر با انرژی گاف نوری،  $E_g$ ، باشد فوتون‌ها جذب شده و زوج الکترون-حفره<sup>۲۰</sup> ایجاد می‌کنند. (شکل ۱-الف) اگر  $h\nu$  بزرگتر از  $E_g$  باشد، فوتون جذب شده و یک زوج الکترون-حفره ایجاد می‌شود و انرژی اضافی  $(E_g - h\nu)$  بصورت گرما تلف می‌شود. (شکل ۱-ب) هر دو روند الف و ب گذارهای ذاتی (یا گذار نوار به نوار) نامیده می‌شوند.



شکل(۱): جذب نور برای (الف)  $h\nu = E_g$  (ب)  $h\nu > E_g$  (ج)  $h\nu < E_g$

در نیمه رساناهای خالص، فوتون‌ها با انرژی کوچکتر از گاف نوری ( $h\nu < E_g$ ) توسط نیمه رسانا جذب نمی‌شوند زیرا در اینحالت در گاف ممنوعه هیچ تراز انرژی برای جا دادن الکترون موجود نیست. ولی چنانچه نیمه رسانا توسط ناخالصی‌ها آلاینده شده باشند، ترازهای انرژی مناسبی مربوط به ناخالصی‌های شیمیایی یا کاستیهای فیزیکی در گاف ممنوعه بوجود

Photocurrent<sup>۱۷</sup>  
Conduction band<sup>۱۸</sup>  
Valence band<sup>۱۹</sup>  
Hole<sup>۲۰</sup>



خواهد آمد که می‌توانند فوتون‌ها را جذب کنند. (شکل ۱-ج) به این روند گذار غیر ذاتی گفته می‌شود. بنابراین با تابش الکترومغناطیس تعداد حامل‌های بار در شبکه بلور افزایش و در نتیجه هدایت تغییر می‌کند!<sup>۲۱</sup>

$$\Delta\sigma = \Delta P e\mu_h + \Delta n e\mu_e \quad (۱)$$

که در رابطه فوق پارامترهای به کار رفته به شرح زیر می‌باشد:

$\Delta P$  تغییر در تراکم حفره‌ها

$\Delta n$  تغییر در تراکم الکترون‌ها

$\mu_h$  تحرک حفره‌ها

$\mu_e$  تحرک الکترون‌ها

$e$  بار الکتریکی الکترون

در اثر اعمال ولتاژ  $U$ ، شدت جریان نوری  $I_{ph}$  عبارت می‌شود از:

$$I_{ph} = \frac{A}{d} \Delta\sigma U \quad (۲)$$

$A$  در رابطه (۲) مقطع مؤثر مسیر جریان و  $d$  فاصله بین الکترودها می‌باشد.

آن دسته از مقاومت‌های نیمه‌هادی که به تابش نور وابسته هستند<sup>۲۲</sup> بر این قاعده عمل می‌کنند. این گونه مقاومت‌ها کاربردهای فراوانی داشته و از آن جمله در کلیدهای سحرگامی (روشن کردن چراغ‌های خیابان‌ها در عصر هنگام و خاموش نمودن آنها در سحرگاه) و نورسنج‌ها بکار گرفته می‌شوند. مواد نیمه‌هادی که معمولاً بکار گرفته می‌شود ترکیبات کادمیوم و بویژه کادمیوم سولفاید ( $CdS$ ) می‌باشد.

در این آزمایش یک مقاومت نوری<sup>۲۳</sup>  $CdS$  در معرض تابش نور یک لامپ قرار می‌گیرد. روشنایی  $\phi$  در محل قرار گرفتن مقاومت مزبور با استفاده از دو عدد قطبشگر<sup>۲۴</sup> که پشت سرهم قرار می‌گیرند، تغییر داده می‌شود. هرگاه صفحه قطبشگرها نسبت به هم به اندازه زاویه  $\theta$  دوران داده شود، طبق قانون مالوس روشنایی از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\phi = \phi_0 D \cos^2 \theta \quad (۳)$$

که در این رابطه پارامترها به شرح زیر هستند:

$\phi_0$  روشنایی بدون وجود قطبشگرها

$D$  ضریب عبوردهی وقتی که قطبشگرها موازی هستند

نورجریان ( $I_{ph}$ ) برحسب تابعی از ولتاژ اعمال شده به مقاومت نوری در روشنایی ثابت (مشخصه جریان - ولتاژ) و نیز بصورت تابعی از روشنایی در ولتاژ ثابت (مشخصه جریان - روشنایی) مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

### روش آزمایش:

وضعیت قرار گرفتن وسایل در شکل (۲) نشان داده شده است. دو ریل اپتیکی توسط گیره مدرج به هم متصل شده‌اند. نورافکن توسط یک گیره چند منظوره به انتهای یکی از ریل‌ها نصب شده و جلوی آن یک شکاف متغییر و در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از شکاف، یک عدسی به فاصله کانونی ۱۰۰ میلی‌متر بسته شده است. در انتهای ریل اپتیکی دیگر فتورزیستور (مقاومت نوری) که

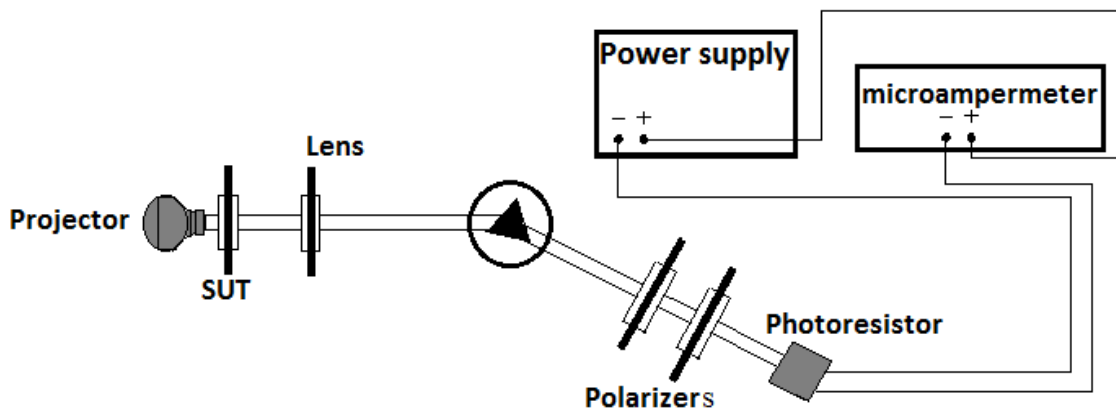
<sup>۲۱</sup> آشنایی با فیزیک حالت جامد - چارلز کیتل

<sup>۲۲</sup> Photoconductive cells

<sup>۲۳</sup> Photoresistor

<sup>۲۴</sup> Polarizer

درون محفظه‌ای فلزی و سیاه تعبیه شده، نصب کرده‌ایم. قبل از فتورزیستور قطبشگرهای نوری را در فاصله‌ای نزدیک به هم قرار داده‌ایم. روی گیره مدرج پایه نگهدارنده منشور نصب شده و منشوری روی آن قرار گرفته و توسط گیره‌ای محکم شده است. (دقت کنید منشور روی زمین نیفتد.) به این ترتیب بعد از روشن شدن پرژکتور نور سفید از شکاف باریکی عبور کرده و توسط عدسی همگرا می‌شود. پرتوی سفید بعد از عبور از منشور تجزیه شده و به قطبشگرها برخورد می‌نماید. طیف‌های رنگی پس از عبور از قطبشگرها به فتورزیستور می‌تابند. با تغییر زاویه مربوط به گیره مدرج، فتورزیستور را در مسیر پرتوهای تجزیه شده قرار دهید. به این ترتیب با تغییر اندک زاویه می‌توانید طیف مورد نظر را به فتورزیستور برسانید.



شکل (۲): وضعیت قرار گرفتن وسایل آزمایش روی ریل اپتیکی

همانطور که در شکل دیده می‌شود، مقاومت نوری، میکروآمپر متر و منبع تغذیه به شکل سری به هم متصل شده‌اند و پرژکتور نیز به منبع مخصوص خود متصل است.

دقت کنید محیط آزمایشگاه باید تاریک باشد. قبل از روشن کردن پرژکتور میکروآمپر متر را روشن کرده و دکمه ظرفیت را روی عدد  $20 \mu A$  قرار دهید و چند لحظه صبر کنید تا عدد ثابتی را نشان دهد. حالا توسط پیچ Z.Adj میکروآمپر متر را به دقت صفر کنید.

زوایای محورهای قطبشگرها را صفر کنید و با تنظیم زاویه گیره مدرج مطمئن شوید که طیف قرمز رنگ به شکاف باریک فتورزیستور می‌تابد.

### آزمایش ۱: اندازه گیری جریان نوری ( $I_{ph}$ Photocurrent) بر حسب تابعی از ولتاژ $U$ در روشنایی ثابت $\phi$

پس از اینکه طبق روش فوق مطمئن شدید طیف قرمز رنگ به شکاف فتورزیستور می‌تابد و زاویه هر دو قطبشگر روی صفر تنظیم شده است، منبع DC را روشن کرده و ولتاژ را روی ۲۰ ولت تنظیم کنید. در این حالت شدت جریان عبوری از فتورزیستور را توسط یک میکروآمپر متر بخوانید. چنانچه میکروآمپر متر overload شده بود و عددی را نشان نمی‌داد، آن را در حالت  $20 mV$  قرار دهید (ظرفیت دستگاه را بالا ببرید) و پس از ثابت شدن عدد نشان داده شده توسط میکروآمپر متر، آن را در جدول شماره (۱) یادداشت نمایید. سپس با کاهش ولتاژ منبع بصورت پله‌های ۲ ولتی، هر بار  $I_{ph}$  را اندازه‌گیری کرده و در جدول (۱) ثبت کنید.

(برای حالت  $\theta = 0$ )



اندازه‌گیری فوق را برای حالاتی که ولتاژ اعمالی از طرف منبع تغذیه را ۱۰ و ۱۵ ولت انتخاب می‌کنید تکرار کنید و جدول (۲) را کامل کنید.

۲-۱- منحنی تغییرات  $I_{ph}$  بر حسب  $\cos^2\theta$  را برای تمام ولتاژها در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

۲-۲- آیا قانون مالوس برقرار است؟

### آزمایش ۳: بررسی تأثیر طول موج نور تابیده شده ( $\lambda$ ) در تولید جریان نوری $I_{ph}$

درحالی‌که طیف قرمز به شکاف فتورزیستور می‌تابد منبع تغذیه را روی ۱۰ ولت تنظیم ( $U=10\text{ v}$ ) و زاویه بین محور قطبشگرها را روی صفر ( $\theta = 0$ ) قرار دهید. میزان جریان نوری  $I_{ph}$  را در این شرایط از روی میکروآمپر متر قرائت و در جدول (۳) وارد نمایید. حال به آرامی ریل اپتیکی دوم که فتورزیستور روی آن نصب شده را از محل گیره مدرج بچرخانید تا طیف زرد رنگ روی شکاف فتورزیستور بتابد و در اینحالت  $I_{ph}$  را قرائت و در جدول (۳) وارد نمایید. این کار را به آرامی برای طیف سبز و بنفش نیز انجام داده و جدول (۳) را کامل کنید.

جدول (۳): اندازه‌گیری بستگی پاسخ فرکانسی ( $U=10\text{ v}$  و  $\theta=0$ )

رنگ	$\lambda(A^\circ)$	$(mA)I_{ph}$
قرمز	(۶۳۵۰-۷۰۰۰)	
زرد	(۵۶۰۰-۵۹۰۰)	
سبز	(۵۲۰۰-۵۶۰۰)	
بنفش	(۴۰۰۰-۴۵۰۰)	

۳-۱- منحنی مشخصه فتورزیستور (نمودار  $(I - \lambda)$ ) را رسم کنید.

۳-۲- با توجه به نموداری که رسم کرده اید، ماکزیمم جریان نوری برای فتورزیستور  $CdS$  در چه طول موج و چه رنگی حاصل شده است؟ دلیل فیزیکی آن را توضیح دهید.

۳-۳- کاربردهای  $CdS$  را بنویسید.

آزمایش پنجم

## آزمایش پدیده فرو مغناطیس در مدل آهنربا

هدف آزمایش:

بررسی مواد فرومغناطیس با استفاده از مدل آن، مشاهده پسماند در مدل ماده فرومغناطیس

وسایل آزمایش:

تقویت کننده AC/DC  
(۱-c)مولد موج ۰/۱ هرتز  
(۱-b)سیم پیچ های هلمهولتز و مجموعه  
نگهدارنده آنها  
(۱-a)۲ عدد سیم پیچ تخت ۱۲۰ دور  
(۱-f)منبع تغذیه DC  
(۱-e)منبع تغذیه DC  
(۱-d)مدل های فرو مغناطیس مکعبی و شش گوش  
(۱-i)عقربه مغناطیسی  
(۱-h)سیم پیچ ۵۰۰ دور  
(۱-g)

## تئوری آزمایش:

وقتی که به ماده ای میدان مغناطیسی اعمال شود، ماده مغناطیده می شود؛ یعنی دو قطبی های مغناطیسی داخل ماده با توجه به جهت میدان اعمالی، جهت گیری می کنند. حالت قطبش مغناطیسی یک ماده را برحسب کمیت برداری  $M^{25}$  تعریف کرده و به آن مغناطش ماده می گوئیم.<sup>۲۶</sup>

مغناطش در مواد پارامغناطیس و دیامغناطیس ناشی از میدان مغناطیسی است و با حذف  $B$  مغناطش  $M$  صفر می شود. ولی بنا به عادت به جای  $B$  مغناطش را برحسب  $H$  می نویسیم:

$$M = \chi_m H \quad (1)$$

$$H \equiv \frac{1}{\mu_0} B - M \quad (2)$$

$\chi_m$  پذیرفتاری مغناطیسی است؛ کمیتی بدون بعد که به جنس ماده وابسته است. این ضریب در مواد پارامغناطیس مثبت و در دیامغناطیس ها منفی است. لازم به یادآوری است موادی که از رابطه (۱) پیروی می کنند، مواد خطی نامیده می شوند. با توجه به معادله (۱) و (۲)،  $B$  و  $H$  بصورت زیر به هم مرتبط می شوند:

$$B = \mu_0(1 + \chi_m)H \quad (3)$$

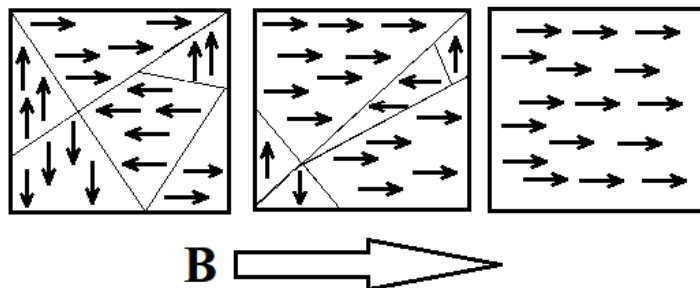
این رابطه را گاهی بصورت زیر هم می نویسند:

$$B = \mu_0 \mu H \quad (4)$$

تذکر: پذیرفتاری مغناطیسی  $\chi_m$  در خلأ برابر با صفر بوده و در خلأ  $\mu = \mu_0$  شده و  $B = \mu_0 H$  می شود.

$\mu_0$  تراوایی فضای آزاد (خلأ) و برابر با  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$  می باشد.

پذیرفتاری مغناطیسی  $\chi_m$  در مواد پارامغناطیس و دیامغناطیس مقادیری ثابت هستند، اما در مواد فرومغناطیس که موادی خطی نیستند، عددی ثابت نبوده و به  $H$  وابسته می باشند.



شکل (۲): جابجایی مرز حوزه ها در ماده فرومغناطیس در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی

البته در مواد فرومغناطیس هم مانند مواد پارامغناطیس عامل ایجاد خاصیت مغناطیسی همان دوقطبی های مغناطیسی وابسته به اسپین الکترونهاست جفت نشده اند. اما علت تفاوت این دو ماده چگونگی برهمکنش بین دوقطبی های نزدیک به هم می باشد. در فرومغناطیس ها هر دوقطبی تمایل دارد که در همان جهت دوقطبی همسایه اش باشد. (دلیل این تمایل اساساً کوانتوم مکانیکی

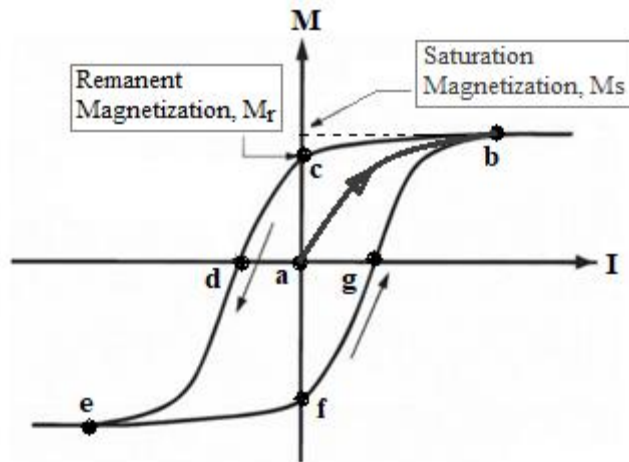
<sup>۲۵</sup> گشتاور دوقطبی های مغناطیسی ماده در واحد حجم

<sup>۲۶</sup> آشنایی با الکتروپدینامیک دیوید جی. گریفیث

است). البته این به خط شدن در قطعات نسبتاً کوچکی از جسم صورت می‌گیرد که آنها را حوزه می‌نامند. اما این حوزه‌ها سمتگیری خود را بصورت کاتوره‌ای انتخاب می‌کنند و هر ماده فرومغناطیس (مثلاً یک آچار فولادی) از بیشمار حوزه مغناطیسی تشکیل شده است که در کل یکدیگر را خنثی می‌کنند. هرگاه یک ماده فرومغناطیس در میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرد به هر دو قطبی مغناطیسی موجود در ماده گشتاوری معادل  $N = m \times B$  وارد می‌شود که آن را با میدان موازی می‌سازد. ( $m$  گشتاور هر دو قطبی مغناطیسی موجود در ماده می‌باشد).

به همین ترتیب در اثر میدان خارجی مرز حوزه‌ها جابجا شده و حوزه‌های موازی میدان رشد کرده و بقیه حوزه‌ها کوچکتر می‌شوند. اگر میدان به قدر کافی قوی باشد، همه حوزه‌ها یکی شده و یک حوزه موازی میدان خارجی بیشتر باقی نمی‌ماند. در این صورت می‌گوییم ماده فرومغناطیس اشباع شده است (شکل ۲).

نکته قابل توجه این است که این "جابجایی مرز حوزه‌ها در اثر میدان خارجی" کاملاً برگشت پذیر نیست، یعنی بعد از قطع شدن میدان، بازگشت سمت گیری حوزه‌ها به شکل کاتوره‌ای کاملاً اتفاق نمی‌افتد و بعضی از حوزه‌ها در وضعیت جدید باقی می‌مانند و جسم تبدیل به یک آهنربای دائمی می‌شود.



شکل (۳): منحنی پسماند مغناطیسی، نقطه شروع جریان دهی، نقاط اشباع، نقاط  $f$  و  $g$  آهنربای دائمی، نقاط  $d$  و  $g$  مغناطش صفر است.

مانده در ماده داریم (نقطه c). مغناطش مانده در ماده در نقطه c را با  $M_r^{28}$  نشان می‌دهیم. اگر جریان را در خلاف جهت قبل ادامه دهیم، مغناطش کم و کمتر شده و بالاخره در جریان خاصی (نقطه d)  $M$  صفر می‌شود. در این حالت ماده از لحاظ مغناطیسی خنثی است. اگر به اضافه کردن جریان در این جهت ادامه دهیم، به اشباع در جهت مخالف می‌رسیم (نقطه e). در این مرحله اگر جریان را قطع کنیم، ماده دوباره مغناطیدگی دائمی ولی خلاف جهت اول پیدا می‌کند (نقطه f). اگر جریان را در جهت اول برقرار کنیم، مغناطش کم شده و در نهایت دوباره صفر می‌شود (نقطه g) و اگر به افزایش جریان ادامه دهیم، مغناطش به اشباع در جهت اول می‌رسد (شکل ۳).

یکبار دیگر تغییر مغناطش داخلی یک ماده فرومغناطیس را با رسم نمودار مغناطش  $M$  نسبت به جریان سازنده میدان مغناطیسی خارجی آن بررسی می‌کنیم (شکل ۳).

با افزایش جریان، میدان اعمالی زیاد شده و با حرکت دادن مرز حوزه‌ها، مغناطش آنقدر رشد می‌کند تا بالاخره به حد اشباع برسد (ربع اول). نقطه ای که همه دو قطبی‌ها موازی هستند (نقطه b). از این پس افزایش جریان، دیگر اثری روی اندازه مغناطش  $M$  نمی‌گذارد. اندازه مغناطش  $M$  در حالت اشباع را با  $M_s^{29}$  نشان می‌دهیم. جریان را کاهش می‌دهیم. مغناطش اندکی کاهش می‌یابد ولی حتی وقتی جریان کاملاً قطع می‌شود ( $I = 0$ ). مغناطش صفر نمی‌شود و مغناطش

در این آزمایش از شبکه‌ای از سوزن‌های مغناطیسی کوچک به عنوان مدل فرومغناطیسی استفاده می‌شود. با قرار گرفتن این مدل در میدان مغناطیسی خارجی رفتار مواد فرومغناطیس را در حضور میدان متغییر خارجی بررسی می‌کنیم.

## روش آزمایش:

### ۱- خنثی نمودن مؤلفه‌ی افقی میدان مغناطیسی زمین

سیم پیچ‌های هلمهولتز موجود در آزمایشگاه شامل دو جفت سیم پیچ می‌باشد که سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه نام‌گذاری شده‌اند. با استفاده از سیم پیچ‌های اولیه و به روشی که در ادامه شرح داده می‌شود، مؤلفه افقی میدان مغناطیسی زمین را خنثی می‌کنیم.

عقره مغناطیسی را که در اختیار دارید روی پرژکتور، که در میان حلقه‌های سیم پیچ هلمهولتز قرار دارد بگذارید و صبر کنید تا عقره آرام آرام ثابت شود، و به این ترتیب امتداد شمال و جنوب میدان مغناطیسی زمین را در محل آزمایشگاه بدست آورید. مجموعه سیم پیچ‌های هلمهولتز و پرژکتور را روی میز طوری بچرخانید که امتداد عقره بر سطح سیم پیچ‌ها عمود گردد.

برای خنثی کردن میدان مغناطیسی زمین باید یک میدان مغناطیسی یکنواخت خلاف جهت میدان زمین و همراستا با آن اعمال کنید. برای این منظور منبع تغذیه DC (شکل (d-1)) را توسط سیم رابط به سیم پیچ‌های اولیه متصل نمائید. منبع را روشن کرده و جریان گذرنده از سیم پیچ اولیه را آهسته افزایش دهید بطوری که **اولا**: باعث کاهش میدان برآیند در فضای مزبور گردد. (اگر با افزایش جریان، میدان نیز افزایش پیدا کرد کلید دو حالته مربوط به سیم پیچ اولیه را در جهت معکوس قرار دهید تا جهت جریان عکس شده و به دنبال آن جهت میدان نیز معکوس گردد). **ثانیا**: مقدار میدان طوری باشد که عقره مغناطیسی سرگردان گردد و در هر امتدادی که قرار می‌دهید، تقریباً بدون چرخش در آن امتداد باقی بماند. (ولتاژ مربوط به شدت جریان برای رسیدن به این حالت حدود ۰/۸ ولت است). بعد از این کار دیگر وضعیت سیم پیچ اولیه و منبع متصل به آن را تغییر ندهید.

### ۲- مشاهده مناطق آهنربایی در مدل آهنربا و حالت اشباع میدان

یکی از مدل‌های آهنربا (مثلا مدل مکعبی) را روی سطح پرژکتور و ترجیحا وسط قرار دهید. چراغ پرژکتور را روشن کنید و تصویر واضحی از مدل آهنربا بر روی دیوار ایجاد نمایید. در حالتی که مدل آهنربا پس از تکان‌های بی هدفی روی پرژکتور گذاشته شده باشد، مناطقی در آن مشاهده خواهد شد که در آن منطقه‌ها تعدادی عقره مغناطیسی بطور منظم در جوار یکدیگر قرار گرفته‌اند و در مجاورت همین منطقه، منطقه دیگری یافت می‌شود که عقره‌ها با نظم خاصی (نه در جهت عقره‌های قبلی) قرار گرفته‌اند. به این مناطق حوزه‌های مغناطیسی یا مناطق آهنربایی گفته می‌شود.

۲-۱- با توجه به چیزی که در تصویر حاصل مشاهده می‌کنید، (مناطق آهنربایی کاتوره‌ای) آیا جسم مورد نظر آهنرباست؟ اکنون با استفاده از منبع تغذیه‌ی ۱۵ ولتی (شکل (e-1)) و اتصال آن به سیم پیچ ثانویه، یک میدان یکنواخت ضعیف درست کنید و کم‌کم میدان را تقویت کنید. برای این منظور ابتدا ولتاژی در حد ۳ ولت اعمال کنید. و پس از ۳۰ ثانیه توسط کلید دو حالتی سیم پیچ‌های ثانویه جریان را قطع کنید.

۲-۲- مشاهدات خود را یادداشت کرده و توجیه کنید.



قبل از وصل مجدد جریان ولتاژ را ۳ ولت افزایش داده و دوباره کلید را در حالت وصل قرار دهید. توجه کنید که همواره برای وصل جریان کلید را به سمت پایین بزنید. به این ترتیب میدان همواره در یک جهت خواهد بود. به همین ترتیب ولتاژ را ۳ ولت، ۳ ولت افزایش داده و هر بار مشاهدات خود را یادداشت کنید.

۳-۲- برای مشاهدات خود دلایل فیزیکی ارائه دهید.

۳-۴- تمام مراحل فوق را با مدل شش گوشه نیز تکرار کرده و مشاهدات و دلایل فیزیکی آن‌ها را بنویسید.

منبع متصل به سیم پیچ ثانویه را ابتدا صفر کرده و سپس آن را خاموش کنید.

### ۳- مطالعه پسماند مغناطیسی در مدل آهنربا

دوباره عقربه مغناطیسی را روی پرژکتور گذاشته دکمه مربوط به سیم پیچ ثانویه را پایین بزنید و منبع متصل به آن را روشن کرده و کمی ولتاژ را بالا ببرید. با توجه به جهت‌گیری عقربه مغناطیسی جهت میدان تولید شده توسط سیم پیچ ثانویه را پیدا کرده و منبع را خاموش کنید. حالا مدل مربعی را دوباره روی پرژکتور طوری قرار دهید که لبه‌های آن با صفحات پیچ هلمهولتز موازی باشد. وقتی تصویر را به وضوح روی پرده مشاهده کردید، تعداد سوزن‌های هم‌جهت با میدان و سوزن‌های خلاف جهت با میدان را بشمارید و یادداشت کنید. اختلاف این دو عدد را می‌توان تقریبی از مغناطش داخل ماده فرومغناطیس فرض کرد. حالا منبع را روشن کرده و ولتاژ را یک ولت زیاد کنید و دوباره سوزن‌های هم‌جهت و خلاف جهت را بشمارید. ولتاژ را تا ۱۵ ولت، یک ولت، یک ولت زیاد کنید و هر بار اختلاف تعداد سوزن‌های هم‌جهت و خلاف جهت را یادداشت کنید.

بعد از رسیدن به ولتاژ ۱۵ ولت، ولتاژ را به شکل معکوس یک ولت، یک ولت کم کنید و اختلاف تعداد سوزن‌های هم‌جهت و خلاف جهت را یادداشت کنید.

۳-۱- چرا با وجود اینکه میدان خارجی را صفر کردید ولی اختلاف در تعداد سوزن‌های هم‌جهت و خلاف جهت به صفر نرسید؟

وقتی ولتاژ منبع به صفر رسید، دکمه مربوط به سیم پیچ‌های ثانویه را بالا بزنید. با این کار جهت جریان در سیم پیچ ثانویه معکوس خواهد شد و به تبع آن جهت میدان مغناطیسی نیز عکس جهت قبل خواهد بود. (می‌توانید با قرار دادن عقربه مغناطیسی روی پرژکتور این موضوع را تحقیق کنید). حالا دوباره ولتاژ را تا ۱۵ ولت، یک ولت، یک ولت زیاد کنید و هر بار اختلاف تعداد سوزن‌های هم‌جهت و خلاف جهت را یادداشت کنید. بعد از رسیدن به ولتاژ ۱۵ ولت، ولتاژ را به شکل معکوس تا رسیدن به ولتاژ صفر، یک ولت یک ولت کم کنید و اختلاف تعداد سوزن‌های هم‌جهت و خلاف جهت را یادداشت کنید.

اختلاف تعداد سوزن‌های هم‌جهت و خلاف جهت را به عنوان میدان القا شده در داخل ماده فرومغناطیس و ولتاژ منبع متصل به سیم پیچ ثانویه را به عنوان میدان خارجی در نظر می‌گیریم. در یک کاغذ میلی‌متری منحنی تغییرات میدان القا شده در داخل ماده فرومغناطیس (اختلاف تعداد سوزن‌ها) بر حسب شدت میدان خارجی (ولتاژ منبع) رسم کنید.

۳-۲- نمودار حاصل را شرح دهید.

در انتها پرژکتور را خاموش کرده و منبع متصل به سیم پیچ ثانویه را خاموش کرده و از سیم پیچ جدا کنید.

### ۴- ایجاد میدان مغناطیسی متغییر توسط سیم پیچ‌های ثانویه

خروجی مولد موج (فانکشن ژنراتور) را توسط یک کابل BNC به ورودی تقویت کننده AC/DC متصل کرده و خروجی این تقویت کننده را توسط سیم رابط به سیم پیچ‌های هلمهولتز (سیم پیچ‌های ثانویه) متصل کنید. وضعیت نوسان موج را روی

حالت مثلثی و فرکانس آن را روی  $0.1 \text{ Hz}$  تنظیم نمایید. دامنه موج را به نحوی تنظیم نمایید که چراغ قرمز تقویت کننده AC/DC به تناوب خاموش و روشن شود. حالا پیچ تقویت کننده (Gain) را آهسته کاهش دهید تا چشمک زدن چراغ بصورت مرزی قطع شود و فقط چراغ سبز روشن باشد.

بعد از انجام تنظیمات فوق عقربه مغناطیسی را روی پرژکتور بگذارید. رفتار عقربه‌ی مغناطیسی را بررسی کنید.

۳-۱- عقربه مغناطیسی چه رفتاری از خود نشان می دهد؟

۳-۲- با زمان سنجی که در اختیار دارید اندازه‌گیری کنید که عقربه در مدت چند ثانیه جهت خود را تعویض می کند.

۳-۳- عقربه مغناطیسی را از روی آورده برداشته و مدل با شبکه مربعی را روی آورده قرار دهید. رفتار سوزن‌ها در مدل آهنربا چگونه است؟

۳-۴- فرکانس را ابتدا به ۱ هرتز و سپس تا ۵۰ هرتز افزایش دهید. رفتار سوزن‌ها در مدل آهنربا چگونه است؟ آیا مدل آهنربا در این فرکانس مغناطیده می شود؟

آزمایش ششم

## منحنی پسماند مغناطیسی در هسته آهنی

## هدف آزمایش:

بررسی پسماند مغناطیسی در هسته آهنی، مشاهده منحنی پسماند مغناطیسی در هسته آهنی ترانسفورمر

## وسایل آزمایش:

ترانسفورمر، فانکشن ژنراتور همراه PC-OSCILLOSCOPE، تقویت کننده AC/DC ۳۰ ولت، کابل BNC، سیم رابط، سیستم کامپیوتر که نرم افزار Hantek6022BE روی آن نصب شده باشد.

## تئوری آزمایش:

با عبور شدت جریان  $I$  از یک سیم پیچ که دارای  $n_1$  دور سیم و طول  $L$  است، میدان مغناطیسی با شدت  $H$  تولید می شود که:

$$H = I \frac{n_1}{L} \quad (1)$$

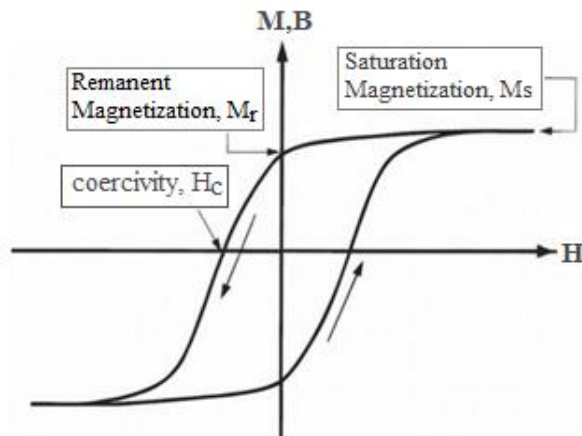
و القای مغناطیسی مربوط به این میدان برابر است با:

$$B = \mu_0 \mu H \quad (2)$$

که در آن  $\mu_0$  ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلاء و  $\mu$  ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ماده ایست که درون سیم پیچ قرار گرفته است.

ضریب  $\mu$  به خاصیتی از این ماده مربوط می شود که موجب افزایش القای مغناطیسی سیم پیچ نسبت به حالت خالی آن می گردد. مقدار  $\mu$  در مورد یک ماده فرومغناطیس ثابت نیست بلکه به مقدار  $H$  و گذشته مغناطیسی ماده مربوط می شود. اگر القای مغناطیسی سیم پیچ ( $B$ ) به صورت تابعی صعودی و نزولی از شدت میدان خارجی ( $H$ ) اندازه گیری شود، شکل این وابستگی ها آشکار می گردد. به عبارتی منحنی پسماند نشان می دهد که به سبب وابستگی  $\mu$  به گذشته ماده، القای مغناطیسی  $B$  تابع ثابتی از  $H$  نیست (شکل ۱).

## منحنی پسماند:



شکل (۱): منحنی پسماند مغناطیسی در یک ماده

فرومغناطیس

وقتی به یک ماده فرومغناطیسی، میدان مغناطیسی اعمال شود، مغناطش محیط سریع افزایش پیدا می کند و با افزایش مقدار میدان اعمالی، شتاب افزایش مغناطش، کاهش می یابد. این کاهش شتاب تا جایی ادامه پیدا می کند که مغناطش محیط به مقدار اشباع خود ( $M_s$ ) برسد.

تغییرات مغناطش این مواد در هنگام کاهش میدان، از رفتار قبلی خود تبعیت نمی کند؛ بلکه به خاطر ناهمسانگردی مغناطیسی در محیط، مقداری انرژی را در خود ذخیره می کنند. بنابراین وقتی میدان اعمالی در محیط صفر شود،

مغناطش در ماده صفر نشده و دارای مقدار خاصی است که به آن مغناطش پسماند ( $M_r$ ) گفته می‌شود. با کاهش بیشتر میدان به سمت مقادیر منفی، خاصیت مغناطیسی القا شده به تدریج کاهش می‌یابد و با رسیدن شدت میدان به یک مقدار منفی خواص مغناطیسی ماده کاملاً از بین می‌رود. این میدان مغناطیس‌زدا را با  $H_C$  نشان می‌دهند و به نیروی ضد پسماند<sup>۹</sup> و یا وادارندگی مغناطیسی معروف است (شکل ۱). با کاهش بیشتر میدان، القای مغناطیسی منفی می‌شود و در نهایت به مقدار اشباع منفی خود می‌تواند برسد. افزایش مجدد شدت میدان به سمت مقادیر مثبت، حلقه پسماند را مطابق شکل (۱) می‌کند، یعنی از رفتار قبلی تبعیت نمی‌کند. مغناطیس‌های دائمی غالباً در ربع دوم حلقه پسماند خود، مورد استفاده قرار می‌گیرند. (به تئوری آزمایش پنجم مراجعه کنید).

با توجه به رابطه (۱)، شدت میدان  $H$  متناسب با  $I$  است. از طرفی  $B = \mu_0(H + M)$  و از آنجاییکه در عمل  $M$  در مقایسه با  $H$  بسیار بزرگ است، بنابراین می‌توان گفت  $B$  با  $M$  متناسب است. در واقع بنا به عادت، در رسم حلقه پسماند،  $B$  را برحسب  $H$  رسم می‌کنیم نه  $M$  را برحسب  $I$ .

### روش آزمایش:

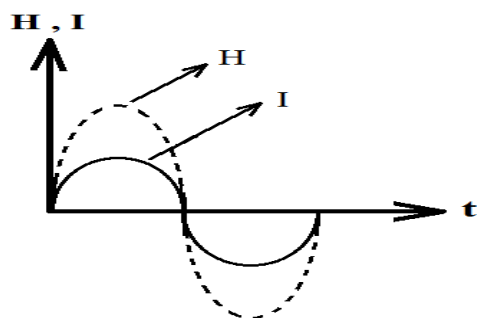


شکل (۲): ترانسفور متشکل از دو سیم پیچ که در یک یوغ آهنی بسته قرار دارند.

در این آزمایش می‌خواهیم با رسم منحنی پسماند در یک ماده فرومغناطیس، بستگی غیرخطی  $B$  به  $H$  را که نشان‌دهنده ثابت نبودن  $\mu$  و بستگی آن به گذشته ماده است آشکار کنیم.

برای این منظور از هسته آهنی یک ترانسفورمر به عنوان ماده فرومغناطیسی که می‌خواهیم منحنی پسماند را برایش رسم کنیم، استفاده می‌کنیم (شکل ۲). به این ترتیب که با گذراندن جریان متناوب  $I$  با فرکانس مشخصی از سیم‌پیچ اولیه ترانسفورمر، میدان مغناطیسی متناوب  $H$  در آن تولید شده، و در نهایت میدان القایی  $B$  به سیم‌پیچ ثانویه القا می‌شود.

از آنجاییکه جریان  $I$  یک جریان متناوب با فرکانس مشخصی است، با در نظر گرفتن فرکانس  $I$  در یک دوره تناوب، جریان از صفر



شکل (۳): تغییرات میدان مغناطیسی و جریان برحسب زمان

به ماکزیمم و دوباره صفر و در نیم سیکل دوم به مینیمم و در نهایت دوباره صفر می‌شود. به این ترتیب طبق رابطه (۱) میدان مغناطیسی  $H$  از صفر به ماکزیمم، دوباره صفر، سپس به مینیمم و در نهایت دوباره صفر می‌شود (شکل ۳). پس اگر بتوانیم در یک دوره تناوب، میدان القایی  $B$  را برحسب میدان مغناطیسی  $H$  رسم کنیم، منحنی پسماند برای این هسته آهنی بدست خواهد آمد.

اگر محور  $X$ ها را به جریان  $I$  اختصاص دهیم، با توجه به رابطه (۱) (متناسب بودن  $H$  با  $I$ ) میدان  $H$  با مقادیر  $X$  سنجیده می‌شود. الزاماً برای رسم منحنی پسماند، میدان القایی  $B$  باید با مقادیر  $Y$  سنجیده

شود تا منحنی پسماند رسم شود. (شکل ۱)

می توانیم القا مغناطیسی  $B$  را با انتگرال گیری از نیروی محرکه القا شده در سیم پیچ ثانویه ( $\mathcal{E}_2(t)$ ) که تابعی از زمان است، بدست آوریم.

**یادآوری:**

همانطور که می دانیم تغییرات میدان مغناطیسی متناوب در سیم پیچ اولیه باعث بوجود آمدن میدان القایی  $B$  در سیم پیچ ثانویه شده است. با توجه به متناوب بودن  $H$ ، میدان القایی  $B$  نیز نسبت به زمان متغیر خواهد بود.<sup>۳۰</sup> از آنجاییکه بزرگی  $B$  با زمان تغییر می کند، شار مغناطیسی  $\varphi_B$  گذرنده از سیم پیچ ثانویه نیز با زمان تغییر می کند و طبق قانون القای فارادی، تغییرات شار مغناطیسی در سیم پیچ ثانویه یک نیروی محرکه القایی ( $emf$ ) به دو سر سیم پیچ القا می کند که آن را با  $\mathcal{E}_2(t)$  نشان می دهیم و واحد آن ولت می باشد. پس طبق قانون القای فارادی:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\varphi_B}{dt} \quad (۳)$$

(علامت منفی مخالفت نیروی محرکه القایی با تغییرات شار را نشان می دهد (قانون لنز))

اما شار مغناطیسی گذرنده از حلقه ای به مساحت  $A$  برابر بود با:

$$\varphi(t) = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

$B$  نسبت به زمان متغیر است ولی در سطح حلقه یکنواخت توزیع شده است.

$$\varphi(t) = \mathbf{B} \cdot \int d\mathbf{A} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \quad (۴)$$

با توجه به شکل ترانسفورمری که در آزمایش استفاده می شود،  $\mathbf{B} \perp \mathbf{A}$  پس:

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = BA$$

$$\varphi(t) = BA \quad (۵)$$

با جایگزینی رابطه (۵) در رابطه (۳) نیروی محرکه القایی در سیم پیچ ثانویه ی ترانسفورمر می شود:

$$\mathcal{E}_2(t) = -\frac{d\varphi(t)}{dt} = -A \frac{dB}{dt} \quad (۶)$$

اما رابطه (۶) برای حلقه ای با یک دور سیم صدق می کند در حالیکه سیم پیچ ثانویه ترانسفورمر از  $n_2$  حلقه تشکیل شده است.

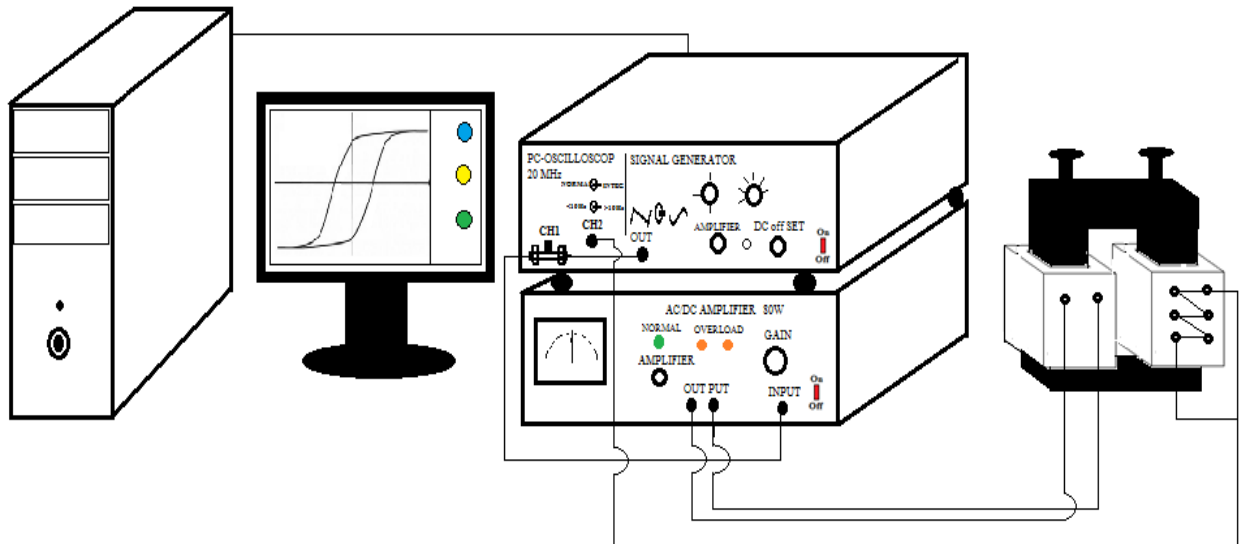
$$\mathcal{E}_2(t) = -n_2 A \frac{dB}{dt} \quad (۷)$$

با انتگرال گیری از طرفین رابطه (۷) شدت میدان القایی  $B$  در هسته آهنی درون سیم پیچ بدست می آید.

$$\int_0^t \mathcal{E}_2(t) dt = -n_2 A \int_{B_0}^{B_t} \frac{dB}{dt} dt = -n_2 A (B_t - B_0) \quad (۸)$$

<sup>۳۰</sup> مبانی فیزیک (جلد دوم) هالیدی-رزنیک-واکر

در آزمایش ما این انتگرال گیری توسط مدار داخلی اینترفیس<sup>۳۱</sup> انجام و به محور  $Y$  داده می‌شود.



شکل (۴): مدار مربوط به آزمایش پسماند مغناطیسی در هسته آهنی

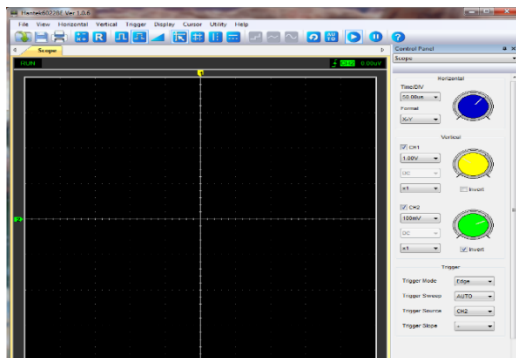
در شکل (۴) مدار مربوط به آزمایش نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید برای تولید جریان با فرکانس مشخص (حدود ۲۰ هرتز) از یک سیگنال ژنراتور<sup>۳۲</sup> با موج سینوسی استفاده شده است. البته از آنجایی که جریان خروجی از سیگنال ژنراتور، جریان ضعیفی است، خروجی سیگنال ژنراتور به یک تقویت کننده AC-DC فرستاده می‌شود و سیگنال پس از تقویت به سیم پیچ اولیه ترانسفورمر فرستاده می‌شود.

**نکته:** پیچ تقویت (GAIN) تقویت کننده را تا جایی می‌چرخانیم که چراغ overload (چراغ قرمز) روشن نشود و فقط چراغ سبز روشن باشد. توجه کنید که چنانچه تقویت کننده در حالت overload باشد یعنی مادامی که چراغ قرمز روشن باشد، شکل موج تقویت شده از حالت سینوسی منحرف شده است و دیگر سینوسی نیست.

سیم پیچ ثانویه طوری طراحی شده که تعداد دورهای متفاوتی را می‌توان در مدار قرار داد که از ماکزیمم دورها استفاده می‌کنیم. سیم پیچ اولیه هم از دو سیم پیچ ۵۰۰ دور تشکیل شده است که در این آزمایش یک ۵۰۰ دور در مدار قرار می‌گیرد.

همان طور که قبلاً توضیح داده شد، محور  $X$ ها یعنی کانال (۱) اینترفیس انتگرال گیر، پذیرای جریان ورودی به سیم پیچ اولیه است که معادل  $H$  می‌باشد. برای این منظور خروجی سیگنال ژنراتور هم زمان توسط یک اتصال T-BNC (شماره ۶ در شکل ۶) هم به کانال (۱) اینترفیس و هم به ورودی تقویت کننده فرستاده می‌شود تا پس از تقویت دامنه وارد سیم پیچ اولیه بشود.

و اما دوسر سیم پیچ ثانویه را به کانال (۲) اینترفیس وصل می‌کنیم. مدار انتگرال گیر موجود در اینترفیس بعد از محاسبه  $B$  آن را به محور  $Y$  منتقل کرده و در نهایت منحنی  $B$  برحسب  $H$  (منحنی پسماند) مربوط به هسته آهنی موجود درون سیم پیچ ثانویه (شکل ۲) در صفحه مونیاتور ظاهر می‌شود.



### تنظیمات نرم افزار:

نرم افزار مربوط به سیستم، (HANTEK 6022 BE ver 1.0.6) را اجرا کنید.

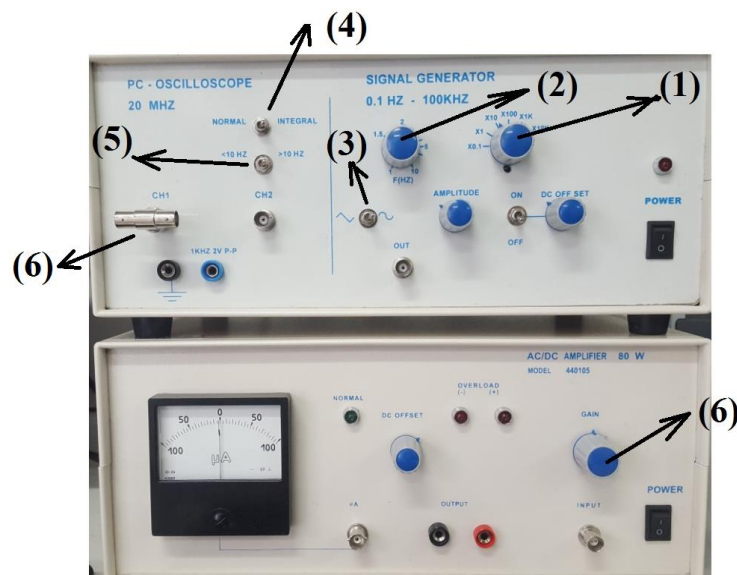
گوشه سمت راست صفحه (شکل ۵) در بخش control panel تنظیمات scope را مطابق جدول زیر انجام دهید.

شکل (۵): صفحه تنظیمات نرم افزار

HANTEK 6022 BE ver 1.0.6

Horizontal	Vertical		Trigger	
Time/DIV	CH1	CH2	Trigger mode	Edge
50.00 $\mu$ s	1.00 v	100 mv	Trigger Sweep	Auto
Format			Trigger Source	CH2
X-Y	$\times 1$	$\times 1$	Trigger Slope	+

### تنظیمات PC-Oscilloscope و Signal Generator



۱- به کمک پیچ های ۱ و ۲ در شکل (۶) فرکانس را حدود 20 Hz تنظیم کنید.

۲- نوع موج را با دکمه ۳ روی موج سینوسی قرار دهید.

۳- DC OFF SET را در حالت off قرار دهید.

۴- اسکوپ را به کمک دکمه ۴ در حالت INTEGRAL قرار دهید.

۵- با کمک دکمه ۵ محدوده فرکانس را بزرگتر از ۱۰ هرتز ( $>10$  Hz) قرار دهید.

شکل (۶)

## تنظیمات AC/DC Amplifier :

همانطور که می دانید پیچ ۶ (GAIN) دامنه موج را تقویت می کند ولی این پیچ را تا جایی می چرخانیم که چراغ های قرمز مربوط به overload روشن نشود تا شکل موج خارج شده از تقویت کننده با موج ورودی یکسان (سینوسی) باشد.

## پرسش ها:

- ۱- شکل منحنی حاصل را در کاغذ میلیمتری رسم کنید. مقیاس محورهای X و Y را روی آن بنویسید.
- ۲- آیا منحنی شما با منحنی شکل (۱) تفاوتی دارد؟ علت این تفاوت چیست؟
- ۳- سعی کنید با کمک منحنی که رسم کرده اید، مقادیر  $M_s$  و  $M_T$  را برای هسته آهنی مورد آزمایش پیدا کنید.
- ۴- با توجه به نمودار، میدان ( $H_c$ ) در چه ولتاژهایی مربوط به سیم پیچ اولیه رخ داده است؟



آزمایش هفتم

## خواص مغناطیسی مواد

## هدف آزمایش:

بررسی خواص مغناطیسی مواد و شناسایی مواد پارامغناطیس، دیامغناطیس و فرومغناطیس. بررسی رفتار این مواد در میدان مغناطیسی ناهمگن

## وسایل آزمایش:

نمونه‌های مغناطیسی ۳ عدد (پارا، دیا و فرومغناطیس) همراه نگهدارنده مخصوص، الکترومگنت ۶/۰ تسلا، نور افکن با منبع تغذیه مخصوص، منبع تغذیه DC (۰-۱۰ آمپر و ۰-۲۰ ولت)، عدسی با فاصله کانونی ۱۰۰ میلی‌متر، پایه V شکل بزرگ، پایه ساده، پرده مات، میله ۲ عدد، گیره چند منظوره، سیم‌های رابط

## تئوری آزمایش:

میدان مغناطیسی در مواد مغناطیسی: فرض کنید یک جسم همگن با حجم  $V$  در میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت  $H$  و القا  $B_0 = \mu_0 H$  قرار داده‌ایم. در اثر میدان، جسم مغناطیده شده و دارای گشتاور مغناطیسی  $m$  می‌گردد. نسبت گشتاور مغناطیسی به حجم جسم را مغناطش (مغناطیدگی)  $M$  می‌نامند.<sup>۳۳</sup>

$$M = \frac{m}{V} \quad (1)$$

و وقتی که مغناطش همگن نباشد برابر است با:

$$M = \frac{dm}{dV} \quad (2)$$

مغناطش یک بردار است. در اجسام مغناطیسی همگن،  $\vec{M}$  یا موازی و یا پادموازی با  $\vec{H}$  است. واحد گشتاور مغناطیسی در دستگاه SI آمپر-مترمربع و بنا به رابطه (۱) واحد مغناطش آمپر بر متر است. نسبت مغناطش  $M$  به شدت میدان مغناطیسی را پذیرش مغناطیسی یا پذیرفتاری<sup>۳۴</sup> نامیده و با پارامتر  $\chi_m$  نمایش می‌دهند.

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (3)$$

به سادگی می‌توان دید که  $\chi_m$  کمیتی فاقد بعد می‌باشد و داریم:

$$M = \chi_m H \quad (4)$$

یک جسم مغناطیده که در میدان مغناطیسی خارجی قرار گرفته باشد میدان ذاتی خود را، صرفنظر از مرزهای خارجی خود، در جهت موازی و یا پادموازی با میدان خارجی ظاهر می‌سازد.

اگر شدت القای خارجی را با  $B_0$  میدان القایی را با  $B_1$  و میدان برآیند را با  $B$  نمایش دهیم. برای مواد مغناطیسی همگن  $B$  از جمع جبری  $B_0$  و  $B_1$  حاصل می‌شود:

$$B = B_0 + B_1 \quad (5)$$

<sup>۳۳</sup> آشنایی با الکتروپدینامیک دیوید جی. گریفیث

<sup>۳۴</sup> Magnetic susceptibility

$$B_1 = \mu_0 M = \chi_m B_0 \quad (۶)$$

آزمایشات نشان می‌دهد که:

در نتیجه:

$$B = B_0(1 + \chi_m) = \mu B_0 = \mu \mu_0 H \quad (۷)$$

که  $\mu = 1 + \chi_m$  گذردهی (تراوایی) مغناطیسی می‌باشد.

واحد شدت میدان مغناطیسی  $H$  در دستگاه واحدهای SI آمپر بر متر و واحد القای مغناطیسی  $B$  تسلا (T) می‌باشد.

**خواص مغناطیسی جامدات:** کلیه مواد را با توجه به قدر مطلق و علامت پذیرش مغناطیسی (پذیرفتاری  $\chi_m$ ) آنها می‌توان به سه

گروه بزرگ ديامغناطیس، پارامغناطیس و فرومغناطیس‌ها تقسیم نمود. (به جدول ۱ مراجعه کنید).

**جدول (۱):** پذیرفتاری مغناطیسی  $\chi_m$  برای تعدادی از مواد

$\chi_m$ ديامغناطیس‌ها		$\chi_m$ پارامغناطیس‌ها		$\chi_m$ فرومغناطیس‌ها	
Bi	$-18 \times 10^{-5}$	Al	$2.22 \times 10^{-5}$	Fe	1000
Cu	$-0.9 \times 10^{-5}$	Pt	$26 \times 10^{-5}$	Ni	150
Ge	$-0.8 \times 10^{-5}$	FeCl <sub>2</sub>	$360 \times 10^{-5}$	Co	240
Si	$-0.3 \times 10^{-5}$	CaO	$580 \times 10^{-5}$		

ديامغناطیس‌ها و پارامغناطیس‌ها:

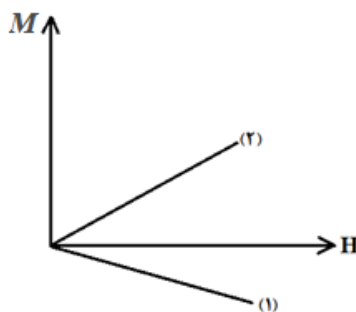
برای ديامغناطیس‌ها ( $|\chi_m| < 1$ ) و  $\chi_m$  منفی و مستقل از شدت میدان مغناطیسی خارجی و دما است. این گونه مواد در خلاف

جهت میدان خارجی مغناطیده می‌شوند و به همین علت از منطقه قوی‌تر میدان خارجی به بیرون رانده می‌شوند.

پارا مغناطیس‌ها دارای ( $|\chi_m| < 1$ ) هستند ولی برخلاف ديامغناطیس‌ها  $\chi_m$  مثبت است. چنین اجسامی در جهت میدان

خارجی مغناطیده شده و به داخل مناطقی که  $H$  بیشینه است کشیده می‌شوند. شکل (۱) وابستگی  $M$  به شدت میدان را برای

ديامغناطیس‌ها (منحنی ۱) و برای پارامغناطیس‌ها (منحنی ۲) نشان می‌دهد.

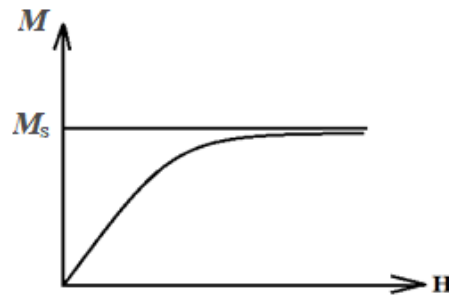


شکل (۱): بستگی مغناطش به شدت میدان در مواد مغناطیسی پارامغناطیس (منحنی ۲) و ديامغناطیس

(منحنی ۱)

در هر دو حالت  $M$  با  $H$  متناسب است که نشان دهنده مستقل بودن  $\chi_m$  از  $H$  می‌باشد. در عین حال برای پارامغناطیس‌ها این امر فقط برای میدان‌های ضعیف و دماهای بالا صادق است. در میدان‌های قوی و دماهای پایین منحنی  $(M-H)$  با یک مقدار حدی  $M_s$  مجانب می‌گردد (شکل ۲)، که نشانه اشباع مغناطیسی ماده پارامغناطیس است. ضمناً پذیرفتاری  $(\chi_m)$  مواد پارامغناطیس به دما وابسته است.<sup>۳۵</sup> این وابستگی اولین بار توسط پیرکوری<sup>۳۶</sup> مورد مطالعه قرار گرفته است. او نشان داد که:

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad (۸)$$

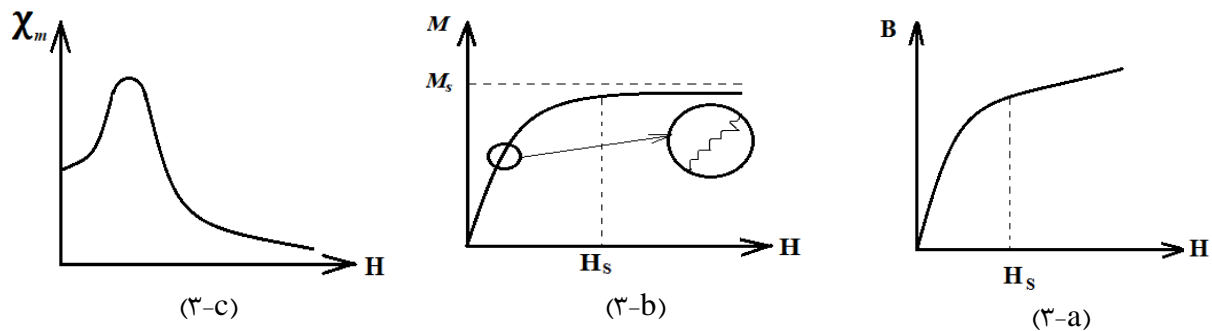


شکل (۲): بستگی مغناطش به شدت میدان مغناطیسی در مواد پارامغناطیس در میدان‌های قوی و دماهای پایین

$T$  دمای مطلق ماده پارامغناطیس و  $C$  مقدار ثابتی است که به طبیعت آن ماده بستگی دارد و ثابت کوری<sup>۳۷</sup> نامیده می‌شود. رابطه اخیر به قانون کوری مشهور است.

**فرومغناطیس‌ها:** مواد فرومغناطیس که معروفترین آن‌ها آهن است دارای  $\chi_m$  مثبت بوده که به مراتب بزرگتر از  $\chi_m$  پارامغناطیس‌ها می‌باشد. ضمناً،  $\chi_m$  وابسته به  $H$  است. این گروه علاوه بر آهن شامل نیکل، کبالت، گادولینیوم، دیسپروسیم، هلیوم، اربیم و برخی آلیاژهاست.

قاعده حاکم بر مغناطش اولین بار توسط فیزیکدان روسی استولتف<sup>۳۸</sup> کشف گردید. شکل (۳-ا) ارتباط القای مغناطیسی  $B$  و شکل (۳-ب) ارتباط مغناطش  $M$  و شکل (۳-ج) ارتباط پذیرفتاری مغناطیسی  $\chi_m$  را با  $H$  برای آهن نرم نشان می‌دهد.



<sup>۳۵</sup> آشنایی با فیزیک حالت جامد - چارلز کیتل

<sup>۳۶</sup> Pierre Curie

<sup>۳۷</sup> Curie Constant

<sup>۳۸</sup> A.G.Stoletov

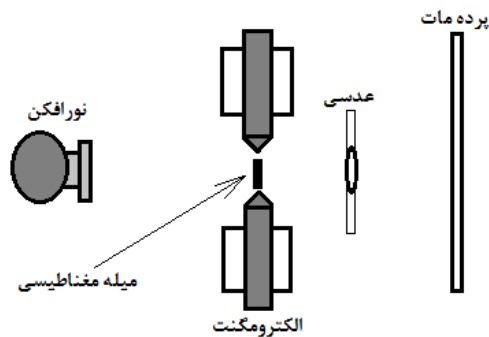
B و M ابتدا با اضافه شدن میدان مغناطیسی به سرعت افزایش می‌یابند لیکن سرعت افزایش آنها کاهش یافته در یک  $H_s$  در حوالی بیشینه مقدار برای مغناطش ( $M_s$ ) متوقف می‌گردد. هرگونه افزایش اضافی دیگر مربوط به افزایش H است. این حالت نشان دهنده اشباع تکنیکی فرومغناطیس است زیرا در این حالت  $\chi_m$  به صفر میل می‌کند.

مطالعه دقیق منحنی مغناطش نشان می‌دهد به تدریج که H اضافه می‌شود، M بصورت پیوسته افزایش نمی‌یابد بلکه به صورت پله‌ای زیاد می‌شود. (به شکل (۳-b) توجه کنید به قسمتی از منحنی که در دایره بزرگ شده است دقت نمایید). این امر مخصوصا در منطقه‌ای که شیب منحنی مغناطش بیشتر است بهتر ظاهر می‌گردد. این بخش از منحنی تعداد زیادی پله را شامل می‌شود که هر یک پرش‌های مربوط به تغییرات M را با افزایش پیوسته H بیان می‌نماید. این طبیعت پله‌وار فرآیند مغناطش، اول بار بوسیله هنریش بارک هاوزن<sup>۳۹</sup> کشف شد و اثر بارک هاوزن نام گرفت.

### روش آزمایش:

سه قطعه میله مغناطیسی را که طول هر یک حدود یک سانتی‌متر است در اختیار دارید که به وسط هر یک نخ بسیار نازک به طول تقریبی ۲۵ سانتی‌متر بسته شده تا بتوان میله‌ها را از نگهدارنده شان آویزان نمود. قطبهای مخروطی الکترومگنت طوری نصب شده که بین نوک‌های تیز آنها حدود ۱۲ میلی‌متر فاصله باشد تا بتوان میله‌های مغناطیسی را بین آنها قرار داد.

نورافکن را یک سوی الکترومگنت و عدسی با فاصله کانونی ۱۰۰ میلی‌متر را طرف دیگر و در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از الکترومگنت قرار دهید. پرده مات را بعد از عدسی با فاصله از عدسی قرار دهید. مطابق شکل (۴).



پرده و عدسی را جابجا کنید بطوریکه پس از روشن کردن نورافکن که نور آن به قطبهای آهنربا می‌تابد، تصویر واضحی از قطبهای آهنربای الکترومگنت روی پرده ظاهر گردد.

یکی از نمونه‌های مغناطیسی را بین قطبین الکترومگنت آویزان کنید و به کمک نگهدارنده و چرخاندن قلاب نگهدارنده ترتیبی دهید که نمونه در امتداد قطبها قرار گیرد و تصویر آن روی پرده ظاهر گردد. الکترومگنت را به منبع تغذیه متصل کنید و جریانی از آن بگذرانید.

شکل (۴): ترتیب چینش وسایل آزمایش اول.

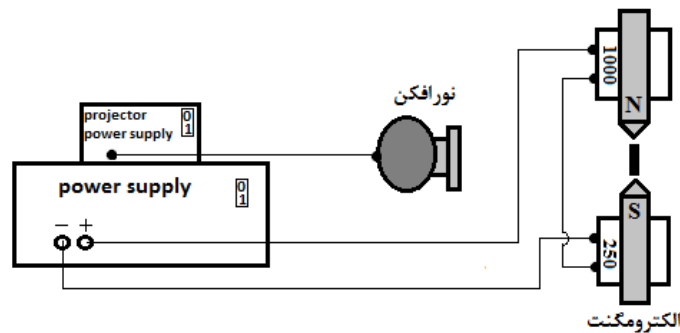
### آزمایش اول:

۱- سه نمونه مغناطیسی میله‌ای شکل کوچک در اختیار دارید که جنس این سه میله در جدول (۲) بر اساس رنگشان نوشته شده است. با توجه به این که جنس میله‌ها را می‌دانید، مشخص کنید که کدام میله فرومغناطیس، کدام میله دیامغناطیس و کدامیک پارامغناطیس می‌باشد و جدول را کامل کنید.

جدول (۲): میله‌های مغناطیسی

ردیف	جنس	رنگ میله	خواص مغناطیسی
۱	آهن	نقره‌ای	
۲	آلومینیوم	آبی	
۳	بیسموت	قرمز	

۲- برای اینکه الکترومگنت میدان مغناطیسی مورد نیاز را تولید کند باید مطابق شکل (۵) به منبع DC متصل شده باشد. دقت کنید که مدار صحیح بسته شده باشد.



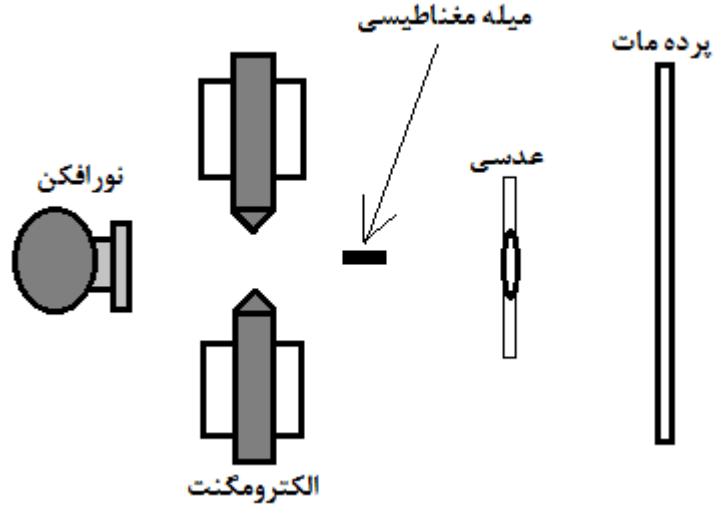
شکل (۵): مدار مربوط به الکترومگنت

- اگر از صحت مدار اطمینان دارید منبع را روشن کرده و ولتاژ منبع را تا ۱۰ ولت بالا ببرید. در این حالت یک میدان ناهمگن در فاصله جوشن‌ها تولید می‌گردد. چرا ادعا می‌کنیم که میدان مغناطیسی تولید شده در این مکان ناهمگن است؟
- ۳- یکی از میله‌ها را توسط نخ از بست نگهدارنده آویخته و مطابق شکل (۵) تنظیم کنید. بعد از تولید میدان چه اتفاقی برای میله رخ می‌دهد؟ مشاهدات خود را یادداشت کرده و با توجه به جنس میله و خاصیت مغناطیسی آن مشاهدات خود را توجیه فیزیکی کنید.
- ۴- مراحل فوق را برای میله‌های دیگر تکرار کنید. مشاهدات و توجیه فیزیکی مربوط به هر یک را یادداشت کنید.

### آزمایش دوم:

- جریان الکترومگنت را صفر کنید و الکترومگنت را به موازات خود به طرف عقب بکشید بطوری که از میله مغناطیسی آویخته شده حدود ۳ سانتی‌متر فاصله بگیرید. مطابق شکل (۶).
- ۵- یکی از میله‌ها را از بست نگهدارنده بیاویزید و آن را ۹۰ درجه بچرخانید تا عمود بر امتداد قطب‌های الکترومگنت قرار گیرد. حالا منبع را روشن کرده و جریان مگنت را برقرار کنید. میله مغناطیسی چه عکس‌العملی نشان می‌دهد؟ دلیل این عکس‌العمل چیست؟

۶- همین کار با دو میله دیگر نیز انجام دهید و مشاهدات خود را یادداشت کرده و دلیل فیزیکی آن را بنویسید.



شکل (۶): ترتیب چینش وسایل آزمایش دوم.

آزمایش هشتم

## آزمایش سلول خورشیدی

### هدف آزمایش:

بررسی منحنی مشخصه و منحنی توان تولیدی یک سلول خورشیدی

### وسایل آزمایش:

لامپ شبیه ساز خورشید: این لامپ نور مناسب برای تابش بر روی سلول خورشیدی را فراهم می‌کند.  
 سلول خورشیدی: سلول خورشیدی مورد استفاده، یک سلول خورشیدی سیلیکون کریستالی با ابعاد ۸۱ میلی‌متر مربع است که اتصالات آن توسط دو سیم برق انجام شده است.  
 نگهدارنده‌ی سلول خورشیدی: این قطعه یک کاور است که سلول خورشیدی در داخل آن بوسیله‌ی یک آهنربا ثابت شده و سپس روی شبیه ساز قرار می‌گیرد.  
 مقاومت‌های الکتریکی: این مقاومت‌ها به عنوان بار الکتریکی سلول خورشیدی استفاده می‌شوند. عملاً بوسیله‌ی آن‌ها می‌توان جریان با ولتاژهای مختلف بر روی سلول خورشیدی ایجاد کرد.  
 مولتی متر و کابل‌های اتصال



شکل (۱): وسایل آزمایش

### تئوری آزمایش:

امروزه انسان با پیشرفت‌هایی که در زمینه‌های مختلفی داشته؛ نیازی روزافزون به انرژی پیدا کرده است. برای تأمین انرژی مورد نیاز و به منظور کم کردن تکیه بر سوخت‌های فسیلی، به منابع مختلف تجدیدپذیر توجه زیادی می‌شود. یکی از روش‌های تولید انرژی پاک، استفاده از نور خورشید و تبدیل آن به انرژی الکتریکی است. برای این تبدیل از سلول خورشیدی<sup>۴۰</sup> یا سلول فتوولتاییک<sup>۴۱</sup> استفاده می‌کنیم. سلول خورشیدی یک قطعه الکترونیکی است که به کمک اثر فتوولتاییک<sup>۴۲</sup>

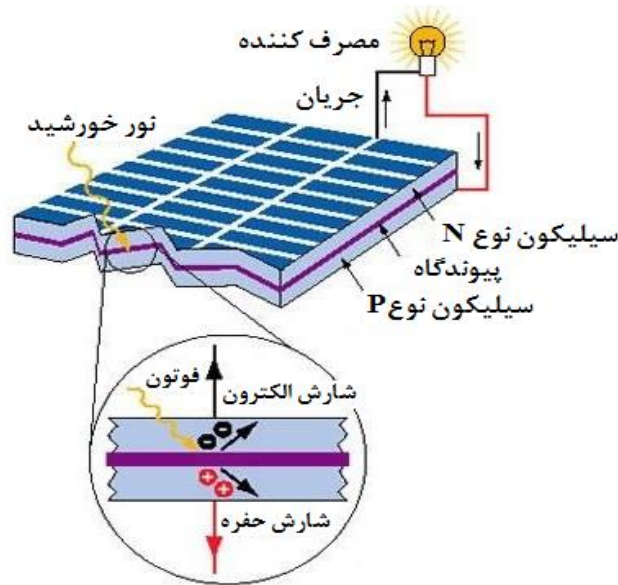
<sup>۴۰</sup> Solar cell

<sup>۴۱</sup> Photovoltaic cell

<sup>۴۲</sup> تولید الکتریسیته در مواد نیم‌رسانا بر اثر تابش امواج الکترومغناطیسی را اثر فتوولتایی می‌گویند.

انرژی نور خورشید را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کند. متأسفانه بازده سلول‌های خورشیدی که تا به امروز ساخته شده است، زیاد نیست. تلاش‌هایی که برای بالابردن بازده سلول‌های خورشیدی انجام می‌شود باعث شده که این موضوع به یکی از حوزه‌های داغ در گرایش حالت جامد و ماده چگال تبدیل شود.

سلول خورشیدی مشابه دیودهای فوتونی<sup>۴۳</sup> یک اتصال P-i-N است که تحت تابش نور خورشید در ناحیه‌ی i آن (شکل ۱) زوج الکترون-حفره تولید شده و تحت تأثیر میدان الکتریکی موجود در محل پیوندگاه، الکترون‌ها به سمت نیمه هادی نوع N و حفره‌ها به سمت نیمه هادی نوع P شارش پیدا می‌کنند و نهایتاً یک جریان الکتریکی را ایجاد خواهند کرد.



شکل (۲): سازوکار تولید جریان از نور در یک سلول خورشیدی

مشخصه‌ی عملکردی یک سلول خورشیدی، منحنی جریان ولتاژ آن است که بیان می‌کند در هر ولتاژ، سلول خورشیدی چقدر جریان برق تولید می‌کند. در شکل (۳) منحنی مشخصه‌ی (جریان-ولتاژ) یک سلول خورشیدی برای نمونه نشان داده شده است (منحنی که با خط پر نشان داده شده است). در این منحنی پارامترهای مهم یعنی جریان اتصال کوتاه<sup>۴۴</sup> ( $I_{sc}$ ) و ولتاژ مدار باز<sup>۴۵</sup> ( $V_{oc}$ ) مشخص هستند. در استفاده از یک سلول خورشیدی مهمترین پارامتر، توان تولیدی سلول است که با حاصل ضرب جریان در ولتاژ به دست می‌آید. منحنی توان تولید در شکل (۳) با خط چین نشان داده شده است. توان تولیدی پنل خورشیدی مورد نظر در نزدیکی زانوی منحنی جریان-ولتاژ بیشینه است که به آن نقطه‌ی توان بیشینه<sup>۴۶</sup> گفته می‌شود. ولتاژ در این نقطه ولتاژ توان بیشینه<sup>۴۷</sup> ( $V_{mp}$ ) و جریان آن، جریان توان بیشینه<sup>۴۸</sup> ( $I_{mp}$ ) است. برای بهره‌گیری از توان بیشینه سلول خورشیدی لازم است

<sup>۴۳</sup> فیزیک و تکنولوژی قطعات نیم‌رسانا - اس. ام. زی

<sup>۴۴</sup> Short circuit current ( $I_{sc}$ )

<sup>۴۵</sup> Circuit voltage ( $V_{oc}$ )

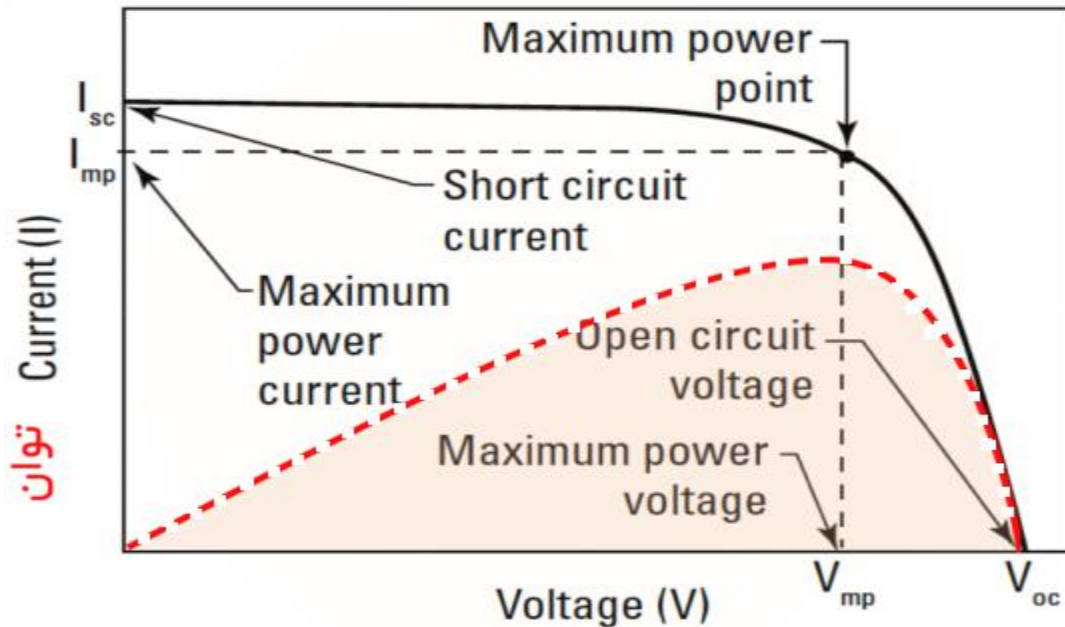
<sup>۴۶</sup> Maximom power point

<sup>۴۷</sup> Maximum power voltage  $V_{mp}$

<sup>۴۸</sup> Maximum power current  $I_{mp}$



راهکارهایی اتخاذ شود که سلول در این نقطه‌ی توان بیشینه کار کند. نظر به اهمیت این بخش از منحنی لازم است اندازه‌گیری منحنی جریان-ولتاژ در این شرایط با دقت بیشتری انجام شود.



شکل (۳): منحنی جریان و توان برحسب ولتاژ در یک سلول خورشیدی

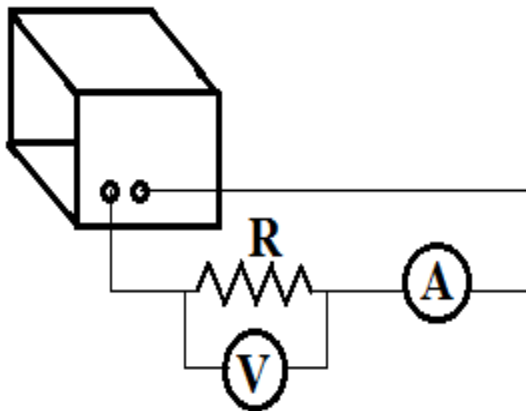
### روش انجام آزمایش:

ابتدا لامپ شبیه ساز را درون محفظه‌ی نگهدارنده‌ی سلول خورشیدی قرار دهید و لامپ را روشن کنید.

(۱) جریان اتصال کوتاه سلول ( $I_{sc}$ ) را اندازه بگیرید. برای این منظور دو سر سلول خورشیدی را مستقیماً به آمپر متر متصل کنید.

(۲) ولتاژ مدار باز سلول ( $V_{oc}$ ) را اندازه بگیرید. برای این منظور دو سر سلول خورشیدی را مستقیماً به ولتمتر وصل کنید.

(۳) در این آزمایش منحنی جریان-ولتاژ مربوط به سلول خورشیدی که در اختیار دارید را بر مبنای گرفتن بارهای مقاومتی مختلف از سلول خورشیدی، رسم می‌کنیم. برای این منظور مطابق شکل (۴) مدار آزمایش را ببندید. لامپ شبیه ساز را روشن کنید و جریان گذرنده از مقاومت بار و همچنین ولتاژ دو سر مقاومت را توسط آمپر متر و ولتمتر اندازه‌گیری کرده و در جدول (۱) وارد کنید. آزمایش را برای تمام



شکل (۴): مدار آزمایش



آزمایش نهم

## آزمایش بررسی تشدید اسپین الکترون (ESR)

## هدف آزمایش:

بررسی تشدید اسپین الکترون با استفاده از مدل آزمایشگاهی

## وسایل آزمایش:

میزچه مدور هوا، سیم پیچ‌های ۲۵۰ دور ۴ عدد، هسته آهنی ۲ عدد، دمنده هوا، ژيروسکوپ مغناطیسی، تعویض کننده مغناطیسی (commutator)، منبع تغذیه DC، سیم رابط

## تئوری آزمایش:

الکترونی که دارای اندازه حرکت زاویه‌ای اسپین  $\vec{L}$  و گشتاور دوقطبی مغناطیسی  $\vec{\mu}$  و نسبت زیرومغناطیسی  $\gamma$ ،  $\vec{\mu} = -\gamma\vec{L}$  (لازم به ذکر است که  $\vec{L}$  و  $\vec{\mu}$  مختلف‌الجهت می‌باشند). با قرار گرفتن در میدان مغناطیسی خارجی ثابت  $\vec{B}_0$  تحت تأثیر گشتاور نیرویی معادل:

$$\vec{N} = \vec{\mu} \times \vec{B}_0 = -\gamma\vec{L} \times \vec{B}_0 \quad (1)$$

واقع شده و اندازه حرکت زاویه‌ای آن با زمان تغییر خواهد نمود. بطوری که:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{N} = -\gamma\vec{L} \times \vec{B}_0 \quad (2)$$

$$\frac{dL}{dt} = \gamma L B_0 \sin \theta \quad (3)$$

در نتیجه به علت ثابت بودن سرعت زاویه‌ای حرکت اسپین،  $\vec{L} = I\vec{\omega}$  از نظر مقدار ثابت می‌ماند. لکن در زمان  $dt$  تغییری معادل  $d\vec{L}$  خواهد نمود که باعث تغییر وضعیت این بردار شده و موجب حرکت تقدیمی الکترون می‌گردد. بسامد زاویه‌ای این حرکت تقدیمی با توجه به شکل (۱) بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$\Omega = \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

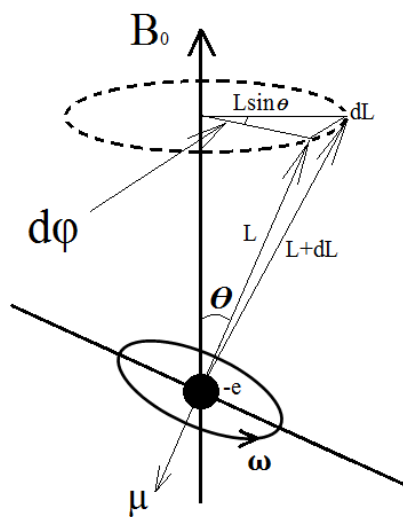
$$dL = L \sin \theta d\phi \quad (5)$$

از ترکیب این روابط (روابط ۴ و ۵) داریم:

$$\Omega = \frac{1}{L \sin \theta} \frac{dL}{dt}$$

و با جایگذاری از رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$\Omega = +\gamma B_0 \quad (6)$$



شکل (۱): چرخش بردارهای  $L$  و  $\mu$  حول میدان مغناطیسی  $B_0$

بسامد زاویه‌ای متناظر با سرعت زاویه‌ای  $\Omega$  را بسامد لارمور<sup>۴۹</sup> می‌نامند. با اندازه‌گیری بسامد لارمور و داشتن شدت القای مغناطیسی  $B_0$  مقدار  $\gamma$  (نسبت ژیرومغناطیسی) قابل اندازه‌گیری است.

با محاسبات می‌توان نشان داد که گشتاور مغناطیسی حاصل از چرخش کلاسیکی الکترون به دور هسته در اولین مدار، معادل  $\frac{e\hbar}{2m}$  (مگنتون بوهر) می‌باشد که در آن  $e$  و  $m$  به ترتیب بار الکترون و جرم الکترون و  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  که ثابت پلانک است. در آزمایش اثر زیمن معلوم می‌شود که نسبت ژیرومغناطیسی اسپین الکترون با تقریب بسیار خوب تقریباً دو برابر نسبت ژیرومغناطیسی حرکت مداری آن یعنی:

$$\gamma_s = \frac{\mu_s}{L_s} = 2 \times (1.001159615) \frac{e}{2m} \quad (۷)$$

است. در صورتیکه بسامد لارمور را برای الکترون اندازه بگیریم، با داشتن  $\omega$  و با استفاده از روابط (۶) و (۷) داریم:

$$\Omega_s = \gamma_s B_0 = \frac{\mu_s}{L_s} B_0 = 2 \times 1.001159615 \frac{e}{2m} B_0 \quad (۸)$$

$$L_s = \frac{\mu_s B_0}{\Omega_s} \quad (۹)$$

که اندازه حرکت زاویه‌ای اسپین الکترون می‌باشد.

چنانچه  $\omega_1 = \Omega_s$  شود، حالت تشدید برای الکترون بوجود آمده و به تدریج از میدان  $B_1$  انرژی خواهد گرفت و انرژی پتانسیل مغناطیسی آن که از رابطه:

$$U_1 = -\vec{\mu}_s \cdot \vec{B}_0 = -\mu_s B_0 \cos \theta \quad (۱۰)$$

بدست می‌آید، با افزایش  $\theta$  فزونی یافته و به  $U_2 = -\mu_s B_0 \cos \theta'$  می‌رسد.

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \mu_s B_0 (\cos \theta - \cos \theta') \quad (۱۱)$$

که با افزایش  $\theta$  و میل کردن آن  $\pi$  و  $\Delta U$  بیشتر می‌شود و حالت بیشینه این تغییر در صورتی است که اسپین آن وارونه شود.<sup>۵۰</sup>

## روش آزمایش:

این آزمایش مدلی قابل مشاهده از حرکت الکترون فرضی در میدان مغناطیسی و دستیابی به حالت تشدید آن است. یک ژيروسکوپ مغناطیسی که حاوی یک آهنربای میله‌ای است به عنوان الکترون با گشتاور مغناطیسی ثابت در نظر گرفته شده است. دو عدد از سیم پیچ‌ها که دارای هسته آهنی هستند در اطراف حفره چرخش ژيروسکوپ طوری قرار می‌گیرند که محور مشترکشان از مرکز میزچه بگذرد و محور دو سیم پیچ دیگر عمود بر محور آنها واقع باشد. سیم پیچ‌های اول به طور سری به یکدیگر بسته شده و از منبع DC تغذیه می‌شوند و میدان  $B_0$  را تولید می‌کنند. سیم پیچ‌های دیگر به طور سری به یکدیگر متصل شده و از خروجی<sup>۵۱</sup> تعویض کننده<sup>۵۲</sup> جریان دریافت می‌کنند. ورودی<sup>۵۳</sup> تعویض کننده از منبع DC و از همان محل که سیم پیچ‌های اول متصل هستند، تغذیه می‌شود و با عمل کردن تعویض کننده دائماً تغییر در قطب داده و میدان متناوب  $B_1$  را بوجود می‌آورند. فرکانس این میدان متناوب با پیچی که بر روی تعویض کننده تعبیه شده قابل تغییر است. به شکل (۲) مراجعه کنید.

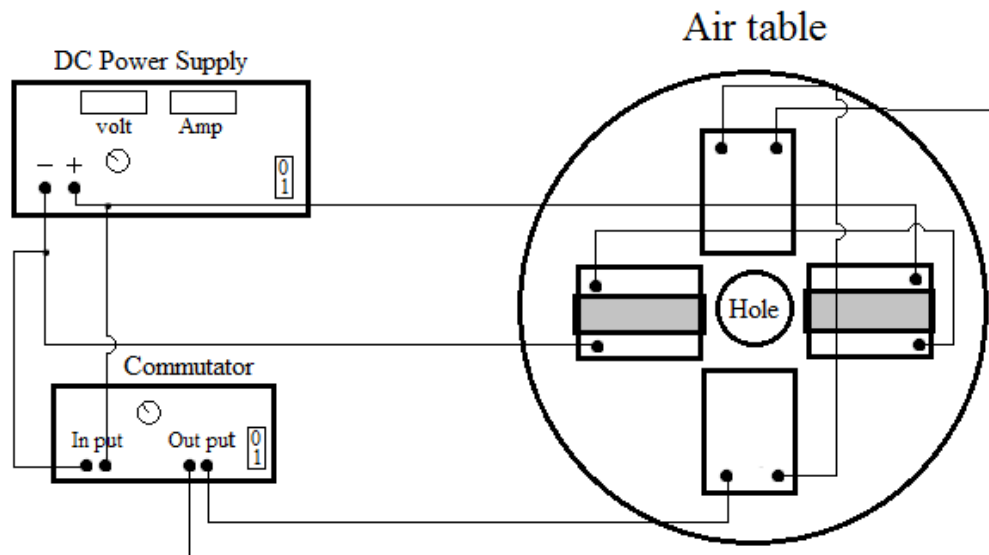
<sup>۴۹</sup>Larmor Frequency

<sup>۵۰</sup>Spin Flip

<sup>۵۱</sup>Out put

<sup>۵۲</sup>Commutator

<sup>۵۳</sup>In put



شکل (۲): وضعیت قرار گرفتن سیم پیچ ها، هسته ها و اتصالات الکتریکی

### آزمایش اول:

در این آزمایش حرکت تقدیمی ژيروسکوپ مغناطیسی در میدان مغناطیسی خارجی مورد مطالعه قرار می گیرد. ژيروسکوپ مغناطیسی را در حفره وسط میزچه هوا قرار دهید و سیم پیچها را مطابق شکل (۲) روی میزچه قرار داده، و سیمهای رابط را متصل کنید. یکی از سیمهای قسمت ورودی تعویض کننده را جدا کنید تا جریان به سیم پیچهای میدان متناوب نرسد. وضعیت اتصالات سیم پیچهای میدان ثابت باید طوری باشد که در دو طرف حفره قطبین مخالف آهنربایی ایجاد گردد. ابتدا به کمک پیچهای قابل تغییر پایههای میزچه، آن را کاملا تراز کنید. دستگاه دمنده هوا را روشن کنید و پیچ تنظیم دور آن را تقریبا تا وضعیت وسط آن بپیچانید تا به کار بیفتد. سپس آن را طوری تنظیم کنید که با داشتن جریان مناسب هوای ملایمی به ژيروسکوپ رسیده و آن را از حفره جدا نگهدارد. به این وسیله اصطکاک ژيروسکوپ با اطراف حفره حذف می شود. پیچ تنظیم پایه‌ی قطورتر میزچه را طوری تغییر دهید که میز اندکی شیب دار شود. در این حالت ژيروسکوپ به یک طرف حفره تمایل یافته و وضعیت خروج هوا از اطراف آن تغییر نموده و موجب می شود که به چرخش درآید. با توجه به اینکه در داخل ژيروسکوپ آهنربای میله‌ای وجود دارد، قطبین آن به طرف هسته‌های آهنی متوجه خواهد بود و دوران تقریبا حول این محور آغاز و ادامه می یابد. میزان هوا را طوری تنظیم کنید که چرخش آن بدون لرزش و بدون برخورد به بدنه صورت گیرد. مدتی صبر کنید تا سرعت چرخش ژيروسکوپ به اندازه کافی (تا حد ممکن) افزایش یابد و به حالت پایدار برسد. پیچ تنظیم شدت جریان منبع تغذیه را به صفر برده و منبع تغذیه را روشن کنید. ولتاژ آن را روی حدود ۱۵ ولت قرار دهید و میزچه هوا را به حالت تراز برگردانید و به آرامی شدت جریان سیم پیچها را افزایش دهید. با توجه به رابطه (۶) چون  $\mu$  مربوط به ژيروسکوپ ثابت است و  $L$  بستگی به سرعت چرخش ژيروسکوپ دارد، مقدار  $\gamma = \frac{\mu}{L}$  ثابت بوده و  $\Omega = \gamma B_0$  بستگی به شدت میدان خواهد داشت.

با افزایش شدت جریان سیم پیچها، میدان  $B_0$  را افزایش داده و تغییر حاصل در حرکت تقدیمی ژيروسکوپ را مشاهده کنید. (چون گشتاور وارد بر آن  $\vec{N} = \vec{\mu} \times \vec{B}_0$  می باشد، در صورتی حرکت تقدیمی مشاهده خواهد شد که محور دوران کاملا در امتداد

سیم پیچ‌ها قرار نگرفته باشد که معمولاً این وضعیت جز در مواقع استثنایی بوجود می‌آید. اگر چنین وضعیتی وجود داشته باشد کافی است که با بستن لحظه‌ای سیمی که از تعویض کننده جدا کرده‌اید و عبور جریان کوتاه مدت از سیم پیچ‌های دوم، ژيروسکوپ را اندکی منحرف نمایید.

در مدت ۱۵ ثانیه تعداد چرخش تقدیمی ژيروسکوپ را اندازه‌گیری و بسامد آن را به دست آورید و با تغییر دادن شدت جریان سیم‌پیچ‌ها، مجدداً این کار را تکرار کنید و برای چند مقدار از جریان، جدول ذیل را تکمیل نمایید.

جدول (۱):

بسامد زاویه ای حرکت تقدیمی $\Omega = \frac{2\pi n}{t}$	تعداد چرخش تقدیمی $n$	زمان اندازه گیری $t$	شدت جریان $I$	آزمایش
				۱
				۲
				۳
				۴

توجه داشته باشید که در تمام این مدت باید سرعت چرخش ژيروسکوپ با دمیدن مناسب هوا و عدم برخورد آن با لبه‌های حفره ثابت نگاه داشته شود.

- ۱- منحنی تغییرات  $\Omega$  بر حسب شدت القای مغناطیسی  $B_0$  (که با شدت جریان  $I$  متناسب است) را رسم کنید .
- ۲- شکل منحنی چگونه است؟ چرا؟
- ۳- آیا بسامد زاویه‌ای حرکت تقدیمی ( $\Omega$ ) به زاویه انحراف محور دوران ژيروسکوپ نسبت به امتداد میدان  $B_0$  (امتداد محور سیم پیچ‌ها) بستگی دارد؟

### آزمایش دوم:

در این آزمایش شدید حرکت تقدیمی ژيروسکوپ مغناطیسی مورد مشاهده و مطالعه قرار می‌گیرد. پس از انجام آزمایش اول مجدداً جریان سیم پیچ‌ها را صفر کنید و شیب میزچه را تغییر و اجازه دهید تا ژيروسکوپ مغناطیسی سرعت بگیرد. پس از دسترسی به سرعت مناسب، میزچه را افقی کنید و جریان سیم پیچ‌های میدان ثابت را برقرار کنید تا حرکت تقدیمی آغاز گردد. بدون آن که سیم باز شده از تعویض کننده را به محل آن ببندید، تعویض کننده را روشن نمایید و پیچ تنظیم بسامد را طوری میزان کنید که با بسامد حرکت تقدیمی ژيروسکوپ انطباق یابد. (هر ۲ بار صدا کردن رله تعویض به منزله یک نوسان در میدان متناوب است.) بطوریکه در هر بار حرکت کامل تقدیمی رله آن ۲ مرتبه صدا کند. پس از اطمینان از همزمانی آنها سیم باز شده را به ورودی تعویض کننده متصل کنید. ملاحظه خواهید نمود که در هر تعویض، اندکی به زاویه انحراف ژيروسکوپ

نسبت به امتداد میدان  $B_0$  اضافه می‌شود. اگر انطباق خوبی صورت گرفته باشد، حرکت تشدید و محل قطبین ژيروسکوپ تعویض شده و جهت چرخش آن نسبت به حالت اول معکوس می‌گردد (Spin Flip). در این حالت که ژيروسکوپ از میدان خارجی انرژی دریافت نموده و انرژی پتانسیل آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$U_1 = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_0$$

می‌تواند از مقدار حداقل  $U_1 = -\mu B_0$  به حداکثر  $U_2 = +\mu B_0$  ترقی نموده و

$$\Delta U = (\vec{\mu} \cdot \vec{B}_0) - (-\vec{\mu} \cdot \vec{B}_0) = -\mu B_0 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (۱۲)$$

برسد که بیشترین تغییر معادل  $\Delta U_{max} = 2\mu B_0$  خواهد بود.

چنانچه انطباق لازم بین بسامد حرکت تقدیمی و بسامد تعویض میدان وجود نداشته باشد، حرکت تقدیمی ژيروسکوپ با سرگشتگی مواجه شده و در برخی حالات زاویه افزایش و در برخی حالات دیگر کاهش می‌یابد و انرژی دریافتی در یک پریود را در پریود دیگر از دست می‌دهد و قادر نخواهد بود اسپین خود را تعویض نماید.

## مراجع:

- 1- Principle of electronic materials and devices – S.KASAP (Mc Grow-hill)
- 2- Solid State Physics, ASHCROFT, NEIL W.

۳- مبانی فیزیک (جلد دوم) - هالیدی، رزنیکی، واکر

۴- آشنایی با الکترو دینامیک - دیوید جی. گریفیث

۵- آشنایی با فیزیک حالت جامد - چارلز کیتل

۶- فیزیک و تکنولوژی قطعات نیمه رسانا - اس.ام.زی