

# بسم الله الرحمن الرحيم

گزارش آزمایشگاه فیزیک ۴ – دکتر ایرجی زاد

گروه اول – چهارشنبه از ساعت ۱۰:۰۰ الی ۱۴:۰۰

آزمایش دوم

آزمایش اثر هال

حسین محمدی

۹۶۱۰۱۰۳۵

در این آزمایش اثر هال را بررسی کردیم و توانستیم ضریب هال را برای ماده InSb بخوانیم، مقاومت نمونه را پیدا کنیم و  $\sigma$  یعنی ضریب هدایت الکتریکی و  $\mu$  یعنی تحرک بارهای الکتریکی را برای این ماده پیدا کنیم. در این فایل گزارش این آزمایش را آورده ام.

## آزمایش اول و دوم و سوم:

در این سه آزمایش ما با تنظیم کردن میدان سیم پیچ و ثابت نگه داشتن جریان مدار اصلی، ولتاژ هال را خواندیم و ثابت هال و ضرایب  $\sigma$  و  $\mu$  را محاسبه کردیم.

ابتدا داده های این سه آزمایش را ببینید:

جدول ۱ : داده های آزمایش اول؛ ولتاژ نمونه و ولتاژ هال اندازه گیری شده (میلی ولت) بر حسب جریان مدار اصلی (میلی آمپر) بدون میدان سیم پیچ

ولتاژ نمونه (میلی ولت)	ولتاژ هال (میلی ولت)	جریان (میلی آمپر)
۰	۰	۰
۱۲۷,۶	۰,۴	۲۰
۲۵۸,۶	۰,۹	۴۰
۳۸۷,۱	۱,۴	۶۰
۵۱۳	۱,۹	۸۰
۶۴۲	۲,۴	۱۰۰
۷۶۷	۲,۸	۱۲۰
۸۹۸	۳,۴	۱۴۰
۱۰۲۳	۳,۸	۱۶۰
۱۱۴۸	۴,۳	۱۸۰
۱۲۷۶	۴,۸	۲۰۰

در این آزمایش قرار شد که میدان مغناطیسی را حساب کنیم. ولی مطابق رابطه  $V_H = \frac{R_H B}{w} I$  برای محاسبه میدان بایستی ثابت هال را هم داشته باشیم، پس مستقلا از این آزمایش نمی توان ثابت هال را به دست آورد. ولی از آزمایش ۲ ما مقدار ثابت هال را به دست آوردیم و با جاگذاری در این رابطه و با داشتن شیب خط از نمودار ۱ ، مقدار میدان را حساب کردیم. (بدست آوردن ضرایب هال را در سوال ۲ انتهای این گزارش می بینید).

به دست آمد:  $B_{ext} = \frac{w \times \text{شیب خط}}{R_H} = 302 \text{ G}$  که البته از میدان مغناطیسی زمین بسیار بزرگتر است و احتمالا اثرات پسماندی باشد.

جدول ۲: داده های آزمایش اول؛ ولتاژ نمونه و ولتاژ هال اندازه گیری شده (میلی ولت) بر حسب جریان مدار اصلی (میلی آمپر) – میدان سیم پیچ ۰.۱۹ تسلا

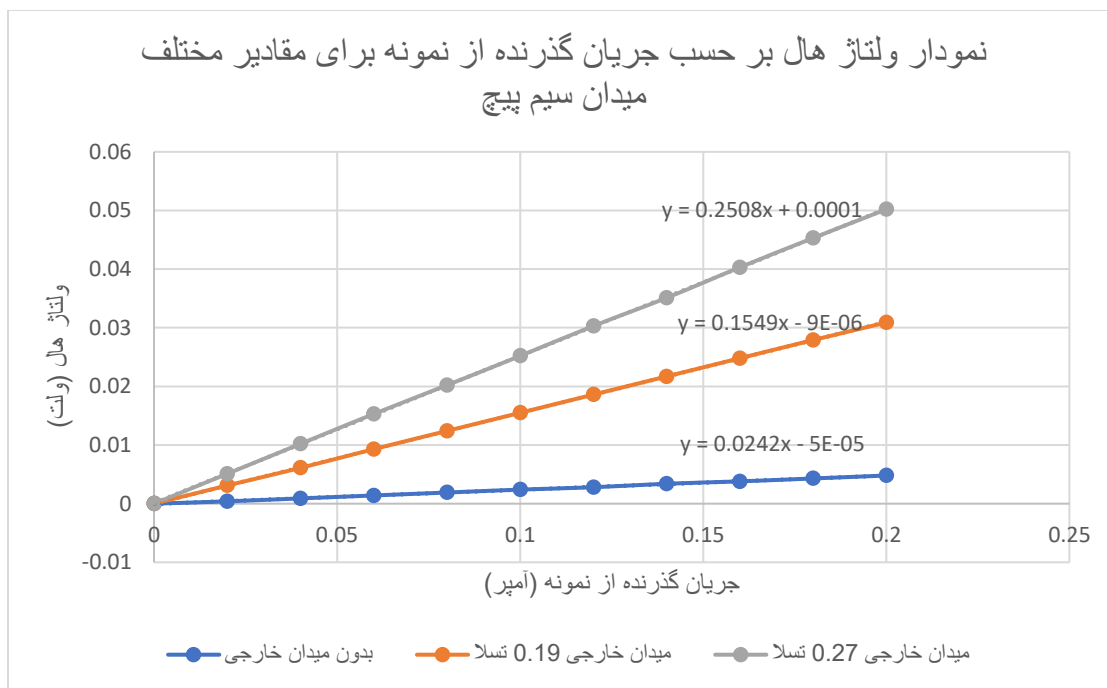
ولتاژ نمونه (میلی ولت)	ولتاژ هال (میلی ولت)	جریان (میلی آمپر)
۰	۰	۰
۱۳۲	۳,۱	۲۰
۲۵۸,۲	۶,۱	۴۰
۳۸۹,۸	۹,۳	۶۰
۵۱۹	۱۲,۴	۸۰
۶۴۵	۱۵,۵	۱۰۰
۷۷۳	۱۸,۶	۱۲۰
۹۰۲	۲۱,۷	۱۴۰
۱۰۳۲	۲۴,۸	۱۶۰
۱۱۶۰	۲۷,۹	۱۸۰
۱۲۸۶	۳۰,۹	۲۰۰

و در نهایت جدول آخر:

جدول ۳: داده های آزمایش اول؛ ولتاژ نمونه و ولتاژ هال اندازه گیری شده (میلی ولت) بر حسب جریان مدار اصلی (میلی آمپر) – میدان سیم پیچ ۰.۲۷ تسلا

ولتاژ نمونه (میلی ولت)	ولتاژ هال (میلی ولت)	جریان (میلی آمپر)
۰	۰	۰
۱۳۴,۳	۵,۱	۲۰
۲۶۵,۲	۱۰,۲	۴۰
۳۹۶,۹	۱۵,۳	۶۰
۵۲۲	۲۰,۲	۸۰
۶۵۱	۲۵,۲	۱۰۰
۷۸۲	۳۰,۳	۱۲۰
۹۰۸	۳۵,۱	۱۴۰
۱۰۴۰	۴۰,۳	۱۶۰
۱۱۶۹	۴۵,۳	۱۸۰
۱۲۹۷	۵۰,۲	۲۰۰

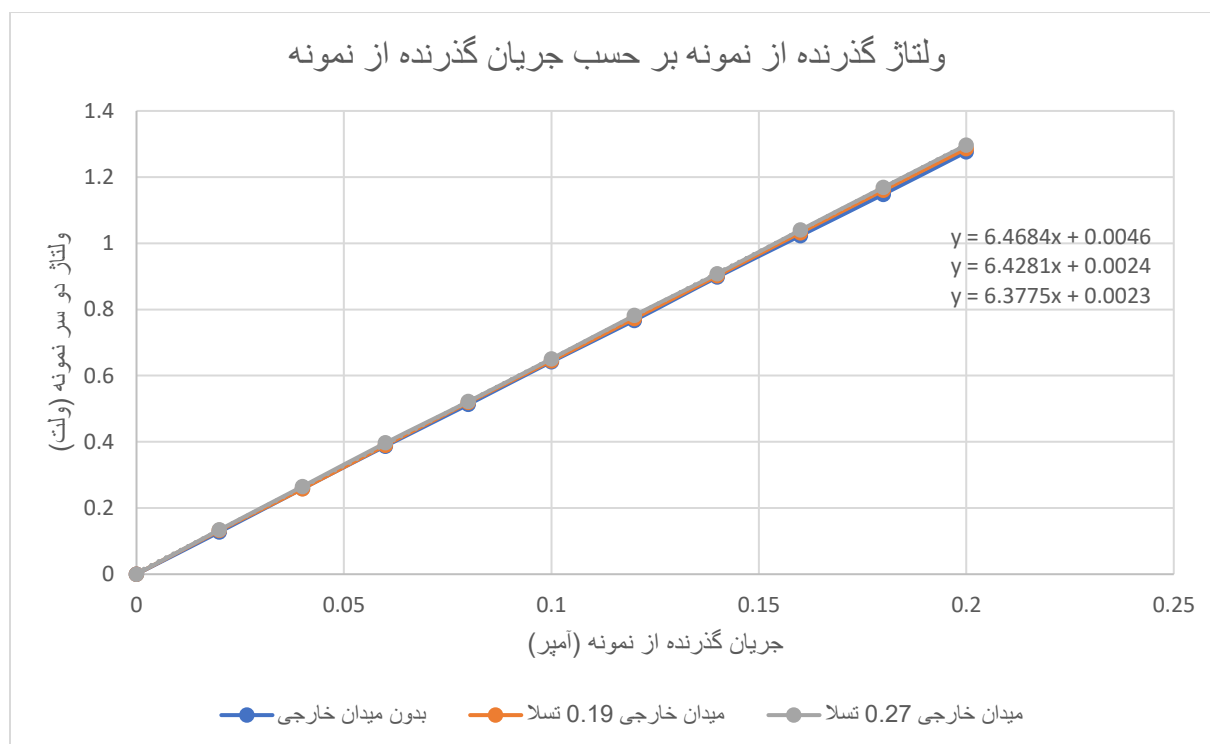
با رسم کردن نمودار ولتاژ هال بر حسب جریان و نمودار ولتاژ نمونه بر حسب جریان به نمودار های زیر می  
رسیم<sup>۱</sup>:



نمودار ۱: ولتاژ هال ( $V_H$ ) بر حسب جریان گذرنده از مدار اصلی ( $I$ ) برای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی

نمودار ولتاژ نمونه بر حسب جریان خیلی بر هم منطبق می شود و برای دیدن بهتر آن، خوب است که در فایل اکسل، اندازه نمودار را با کشیدن نمودار بزرگ کنید تا بتوانید تفکیک بین این خطوط را مشاهده کنید.

همانطور که در تصویر زیر هم مشاهده می کنید، مقدار شیب خط در حقیقت همان مقاومت اهمی است که برای هر سه حالت میدان مغناطیسی این شیب بدست آمده است.



نمودار ۲: ولتاژ بایاس (دوسر نمونه) ( $V_x$ ) بر حسب جریان گذرنده از مدار اصلی ( $I$ ) برای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی

## آزمایش چهارم:

بررسی علامت پتانسیل هال یا جهت میدان الکتریکی که در اثر فرایند هال ایجاد می شود.

جدول زیر را برای بررسی علامت پتانسیل هال رسم کرده ایم.

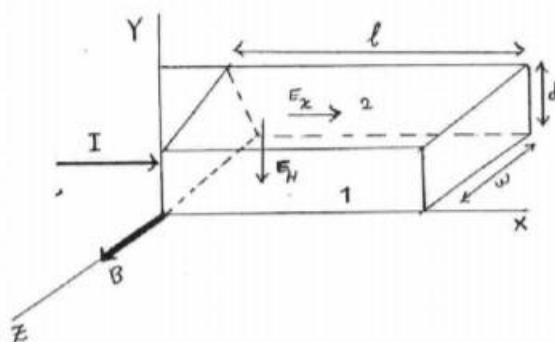
جدول ۴: علامت پتانسیل هال برای جهت های متفاوت میدان مغناطیسی و جریان گذرنده از نمونه

$V_H$	+	-	-	+
$I$	+	+	-	-
$B$	+	-	+	-

توجه کنید که باید به سری چیزها را قرار داد کرد و سپس به ادامه پرداخت:

به شکل شماره یک توجه کنید. علی الاصول می دانیم که ولتاژ هال بین صفحات بالایی و پایینی این نمونه ایجاد می شود؛ یعنی بین صفحه  $y = 0$  و صفحه  $y = d$  اختلاف پتانسیلی هست. فرض می کنیم که ما سیم قطب مثبت ولت سنج را به صفحه  $y = d$  وصل کرده ایم و سیم با قطب منفی را به صفحه  $y = 0$  وصل کرده ایم پس عددی که ولت سنج به ما می دهد دقیقاً برابر با عبارت زیر است:

$$\Delta V = V_{y=d} - V_{y=0}.$$



شکل ۱: قرار گیری نمونه در میدان مغناطیسی در اثر هال و معرفی قرار داد برای طول و عرض و جهت جریان و میدان

در ضمن قرار داد می کنیم که جهت مثبت جریان (خلاف جهت حرکت الکترون) در راستای مثبت محور X باشد و جهت مثبت میدان مغناطیسی در جهت مثبت محور Z باشد.

حالا با این قرار داد مثال سعی می کنیم جدول شماره ۴ را پر کنیم؛ به عنوان مثال من حالت دوم را اینجا ذکر می کنم و بقیه را مشابهها پر می کنم:

مطابق رابطه نیروی لورنتز که  $F = q v \times B$  است، وقتی جریان در جهت  $x$  باشد، چون الکترون در خلاف جهت جریان حرکت می کند پس بردار سرعت در جهت  $-x$  است و میدان هم که در جهت  $-z$  است پس مطابق این رابطه برای محاسبه علامت بردار نیرو داریم:

$$\text{Sign of } F = (-)(-x \times -z)$$

توجه کنید که منفی اولی به خاطر منفی بودن بار الکترون است و نتیجه این است که نیرو در جهت  $+y$  است و این یعنی الکترون ها به سمت صفحه بالایی می روند پس صفحه پایینی دارای پتانسیل بیشتری خواهد شد و علامت عبارت  $\Delta V = V_{y=d} - V_{y=0}$  منفی خواهد بود.

با بررسی سایر موارد به صورت مشابه جدول ۴ را پر می کنیم.

### آزمایش پنجم:

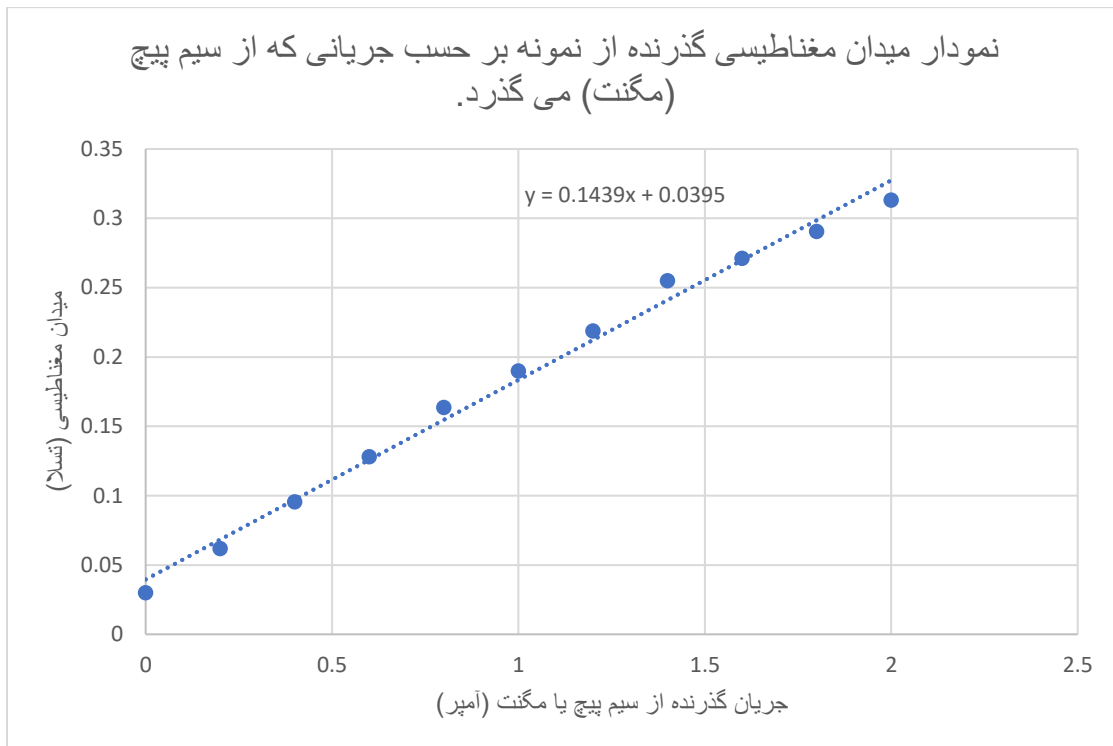
در این آزمایش ما جریان گذرنده از مگنت را تغییر می دهیم و ولتاژ هال را یادداشت می کنیم. سپس با کمک رابطه  $B = \frac{V_{HW}}{I R_H}$  میدان مغناطیسی را به دست می آوریم و نمودار میدان را بر حسب جریان گذرنده از مگنت رسم می کنیم. (توجه داشته باشید که جریان مدار اصلی که نمونه در آن قرار دارد، ثابت و برابر ۲۰۰ میلی آمپر است و در رابطه ی  $B = \frac{V_{HW}}{I R_H}$  منظور از جریان همان جریان اصلی مدار است که برابر ۲۰۰ میلی آمپر است.) سپس می توانیم پس از رسم نمودار به تفسیر آن می پردازیم و اثر اشباع و پسماند را می بینیم.

ابتدا جدول داده ها را مشاهده کنید:

جدول ۵: جدول ولتاژ هال بر حسب جریان گذرنده از مگنت و یافتن میدان مغناطیسی مگنت

میدان مغناطیسی (تسلا)	ولتاژ هال (میلی ولت)	جریان (میلی آمپر)
(پسماند؟) ۰,۰۳	۴,۸	۰
۰,۰۶۱۸۷۵	۹,۹	۰,۲
۰,۰۹۵۶۲۵	۱۵,۳	۰,۴
۰,۱۲۸۱۲۵	۲۰,۵	۰,۶
۰,۱۶۳۷۵	۲۶,۲	۰,۸
۰,۱۹	۳۰,۴	۱
۰,۲۱۸۷۵	۳۵	۱,۲
۰,۲۵۵	۴۰,۸	۱,۴
۰,۲۷۱۲۵	۴۳,۴	۱,۶
۰,۲۹۰۶۲۵	۴۶,۵	۱,۸
۰,۳۱۳۱۲۵	۵۰,۱	۲

و ترسیم داده های این آزمایش یعنی رسم  $B$  بر حسب  $I_m$  شکل زیر را به دست می دهد:



نمودار ۳: در این گراف میدان مغناطیسی ای عبوری از نمونه بر حسب جریان مگنت رسم شده است.

در رابطه با این شکل چند نکته قابل ذکر است:

- اولا کاربرد این نمودار در «کالیبراسیون گaus متر» است. یعنی برای ساخت وسیله ای که میدان مغناطیسی را می سنجد (گaus متر) کافی است یک سنسور هال داشته باشیم<sup>۲</sup> و با قرار دادن این سنسور در معرض میدان های مختلف، ولتاژ هال آن را در یک جریان معین (مثلا اینجا ۲۰۰ میلی آمپر) بخوانیم. حالا می توانیم ریز تراشه هایی درست کنیم که وقتی ولتاژ هال سنسور مثلا برابر ۳۰.۴ میلی ولت شد، اعلام کند که میدان ۰.۱۹ تسلا است. یعنی از جدول شماره ۵ استفاده می شود تا به کمک آن این سنسور را برنامه ریزی کرد. به همین دلیل است که به این جدول جدول کالیبراسیون می گوییم.
- ثانیا می بینیم که عرض از مبدا نمودار ۳ برابر صفر نیست، یعنی که ما هرچه جریان را در سیم پیچ کمتر کنیم و حتی اگر آن را صفر کنیم، ولتاژ هال صفر نیست چرا که در سیم پیچ یک میدان مغناطیسی پسمانده وجود دارد و این خود باعث می شود که حتی وقتی که  $I_m = 0$  باز هم ولتاژ هال

<sup>۲</sup> سنسور هال دقیقا همان کارکرد اثر هال را پیاده سازی می کند با این تفاوت که در اندازه بسیار کوچکتر است و از وسایل آزمایشگاهی پیشرفته تر است. و معمولا در وسایل الکترونیک کاربرد دارد.

ناصر شود. موقع ساختن گاوس متر باید حواسمان به اثرات پسماندی باشد. ( در آزمایشگاه با تنظیم مجدد مگنت این اثر را خنثی می کنیم.)

- نکته جالب توجه دیگر این است که در جریان های کم مگنت، ولتاژ هال با جریان مگنت رابطه خطی دارد، این رابطه چندان هم دور از انتظار نیست چرا که هم رابطه بیو-ساوار و رابطه  $B = \frac{V_{HW}}{I R_H}$  خطی هستند.
- اما هر چه به جریان های بیشتر نزدیک می شویم، انحراف از خطی بودن آشکارتر می شود. دلیل آن هم این است:

وقتی جریان خیلی زیاد شود، تمام حوزه های مغناطیسی هسته آهنی ای که سیم پیچ دور آن پیچیده شده است، همراستا می شوند و با افزایش جریان بیشتر از حد اشباع، دیگر اتفاق خاصی نمی افتد و تمامی حوزه ها همچنان هم جهت می مانند و میدان مغناطیسی به حد اشباع می رسد.

پس از یک جریانی به بعد ولتاژ هال دیگر زیاد نمی شود و این به خاطر پدیده اشباع حوزه های مغناطیسی است.



## ۱. علت مشاهده ولتاژ هال زمانی که جریان مگنت صفر است را توضیح دهید.

می دانیم که زمین دارای میدان مغناطیسی ای به اندازه ی حدودا ۰.۲ تا ۰.۶ گاوس است و جهت آن از قطب شمال به قطب جنوب است، با تقویت کردن ولتاژ هال به کمک «تقویت کننده ها» این ولتاژ قابل مشاهده است و حتی وقتی  $I_m = 0$  باز هم اثر هال مشاهده می کنیم. (توجه کنید که جهت جریان در نمونه نباید موازی با جهت میدان مغناطیسی زمین باشد، چرا که طبق رابطه ی نیروی لورنتز، نیروی صفر می شود و اثر هال مشاهده نمی شود و ماکسیمم ولتاژ هال وقتی مشاهده می شود که میدان مغناطیسی زمین عمود بر جهت جریان باشد).

## ۲. جدول مقادیر عددی ولتاژ هال را از سه آزمایش اول ، در شرایطی که دیگر پارامتر ها برابرند مقایسه کنید.

همانطور که در جدول های ۱ و ۲ و ۳ مشاهده می شود، هر گاه جریان مدار اصلی یکسان باشد، مقدار ولتاژ هال وقتی بیشتر است که میدان مغناطیسی بیشتر باشد، و این دقیقا همان رابطه  $BI \frac{R_H}{w} = V_H$  است، یعنی با ثابت ماندن جریان (I) و سایر پارامتر ها، میدان با ولتاژ هال رابطه مستقیم دارد.

## ۳. جدول ۴ را تفسیر کنید.

در «آزمایش ۴» چگونگی پر کردن خانه های جدول را با شرح یک مثال گفتم؛ اما تفسیر این جدول چنین است: اگر جهت یکی از کمیت های I یا B عوض شد، آنگاه علامت پتانسیل هال عوض می شود (یعنی جای صفحه با پتانسیل بیشتر عوض می شود) و این دقیقا همان خاصیت حاصل ضربی اثر هال است. (این دقیقا ویژگی ضرب خارجی در رابطه نیروی لورنتز است).

در ضمن از کاربردهای این خاصیت این است که می توانیم نوع نیمرسانا را مشخص کنیم. به عنوان مثال اگر نیم رسانا نوع p باشد، در این صورت (مطابق شکل ۱)  $\Delta V < 0$  می شود و در صورتی که نوع n باشد،  $\Delta V > 0$  می شود.

۴. سعی کنید میدان را یک بار در راستای زمین و بار دیگر عمود بر آن ورقه اعمال کنید. ولتاژ هال را برای یک جریان ثابت و میدان ثابت اندازه بگیرید و علت تفاوت آن را توصیف کنید. آیا مقدار میدان زمین قابل اندازه گیری است؟

علت تفاوت واضح است چرا که وقتی میدان زمین در راستای ورقه باشد در آن صورت مطابق رابطه ی نیروی لورنتز، ضرب خارجی میدان در جریان صفر است ( زیرا دو بردار موازی اند) و اگر میدان عمود بر ورقه باشد، در این صورت میدان زمین با میدان مگنت باید به صورت بردار جمع شوند (اگر هم جهت باشند اندازه ها جمع شود و اگر خلاف جهت باشد، اندازه ها کم شود) و در این صورت میدان زمین روی نتیجه کلی آزمایش اثر می گذارد. امکان انجام این آزمایش را نداشتیم ولی آن طور که دکتر اشاره کردند، در آزمایشگاه حتی امکان آشکارسازی ولتاژ های نانو ولتی را هم داریم و این یعنی که احتمالا شاید بتوان میدان زمین را با این روش اندازه گیری کرد.

### سوالات:

۱. بر روی یک کاغذ منحنی تغییرات ولتاژ هال بر حسب جریان را مطابق جدول های ۱ تا ۳ رسم کنید. با استفاده از شیب منحنی ضریب هال را بیابید.

رسم نمودار ها که در بالا انجام شده است.

در این آزمایش ها ما فقط جریان مگنت (B) را عوض می کنیم و با خواندن ولتاژ هال بر حسب ولتاژ دو سر نمونه به محاسبه  $R_H$  می پردازیم.

همانطور که در قسمت «آزمایش ۱ و ۲ و ۳» توضیح داده شد، مقدار ثابت هال را مستقلا از آزمایش یک نمی توان حاصل کرد برای همین به سراغ آزمایش های دو و سه می رویم.

برای آزمایش دوم:

$$R_H = \frac{w \times \text{شیب خط}}{B_{ext}} = \frac{5 \times 10^{-4} \times 0.1549}{0.19} = 0.00041 \frac{m^3}{C}$$

برای آزمایش سوم:

$$R_H = \frac{w \times \text{شیب خط}}{B_{ext}} = \frac{5 * 10^{-4} * 0.2508}{0.27} = 0.00046 \frac{m^3}{C}$$

این دو عدد تفاوت دارند و درصد تفاوت آن ها حدودا ۱۲ درصد است. احتمالا این تفاوت به خاطر این است که میدان مغناطیسی سیم لوله در جریان های زیاد دقیقا به صورت کاملا خطی رفتار نمی کند.

۲. با استفاده از نتیجه به دست آمده از جدول ۵، منحنی میدان مغناطیسی بر حسب جریان مگنت را رسم کنید و منحنی را تفسیر کنید.

در بخش «آزمایش پنجم» دقیقا همین کار انجام شده است.

۳. مقاومت نمونه را در هر یک از مراحل ۱ تا ۳ آزمایش بیابید و آن ها را با هم مقایسه کنید و علت اختلاف را تفسیر کنید.

از روی نمودار شماره ۲ داریم:

$$R_1 = 6.3775 \Omega$$

$$R_2 = 6.4281 \Omega$$

$$R_3 = 6.4684 \Omega$$

که در آن اندیس ها شماره آزمایش هستند و داریم:  $R_3 > R_2 > R_1$

دو نکته قابل ذکر هستند: یکی این که در آزمایش های متوالی، اندازه مقاومت زیاد تر می شود، و شاید به این دلیل است که مقاومت در رژیم اهمی نیست، یا حتی ممکن است که اعمال میدان مغناطیسی متفاوت بر نمونه در هر مرحله، باعث این رفتار برای مقاومت شده است.

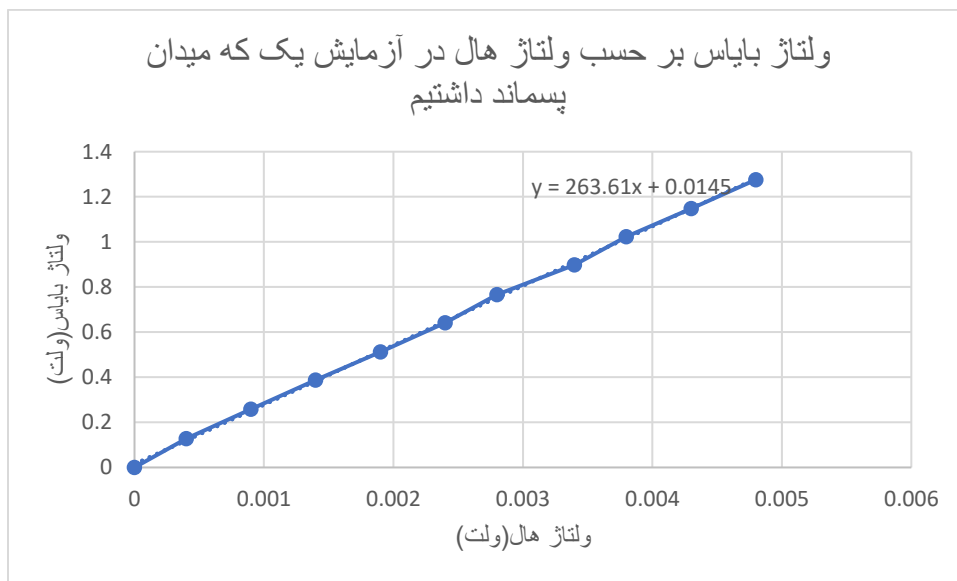
دیگر این که عرض از مبدا این نمودارها ناصفر است که در این مورد دلیل خاصی نمی دانم.

۴. مقدار  $\sigma$  و  $\mu$  را برای InSb بدست آورید.

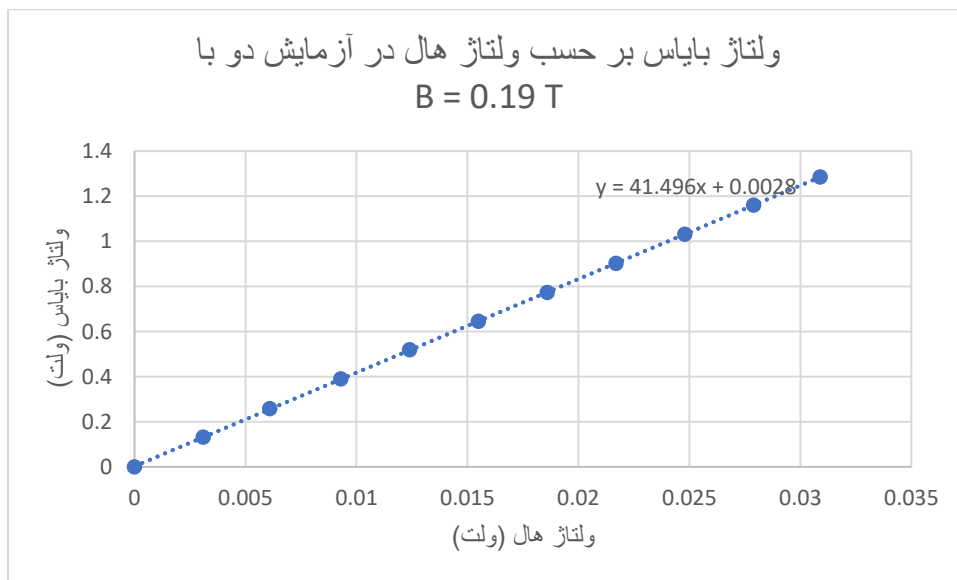
برای بدست آوردن  $\sigma$  از رابطه ۴ در دستور کار استفاده می کنیم:

$$\sigma R_H = \frac{V_H l}{V_X B d}$$

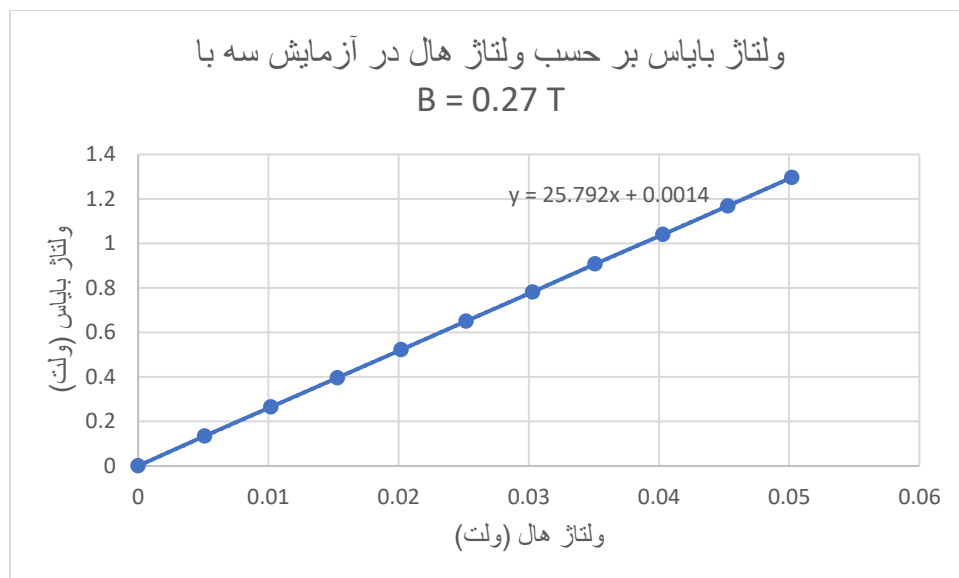
این یعنی که شیب نمودار  $V_X$  بر حسب ولتاژ هال برابر با  $\frac{l}{\sigma B d R_H}$  و ما این نمودار ها را برای آزمایش اول و دوم و سوم رسم کرده ایم.



نمودار ۴: گراف ولتاژ بایاس بر حسب ولتاژ هال در میدان خارجی تقریباً صفر (پسماند)



نمودار ۵: گراف ولتاژ بایاس بر حسب ولتاژ هال در میدان خارجی  $0.19 \text{ T}$



نمودار ۵: گراف ولتاژ بایاس بر حسب ولتاژ هال در میدان خارجی ۰.۲۷ T

حالا وقت آن است که هدایت الکتریکی را بخوانیم:

$$\sigma_1 = \frac{l}{\text{شیب} \times B \times d \times R_H} = \frac{13 \times 10^{-3}}{263.61 \times 0.00041 \times 0.03 \times 6 \times 10^{-3}} = 668 \frac{A}{m^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{l}{\text{شیب} \times B \times d \times R_H} = \frac{13 \times 10^{-3}}{41.5 \times 0.00041 \times 0.19 \times 6 \times 10^{-3}} = 670 \frac{A}{m^2}$$

$$\sigma_3 = \frac{l}{\text{شیب} \times B \times d \times R_H} = \frac{13 \times 10^{-3}}{25.79 \times 0.00046 \times 0.27 \times 6 \times 10^{-3}} = 676 \frac{A}{m^2}$$

میانگین هدایت الکتریکی برابر با ۶۷۱ آمپر بر متر مربع است.

و مطابق رابطه ۴ دستور کار که  $\mu = \sigma R_H$  می توانیم برای مقادیر مختلف سیگما، مقدار تحرک بارهای الکتریکی را بخوانیم:

$$\mu_1 = 0.274 \frac{m^2}{Vs}$$

$$\mu_2 = 0.275 \frac{m^2}{Vs}$$

$$\mu_3 = 0.311 \frac{m^2}{Vs}$$

و مقدار میانگین هست:

$$\bar{\mu} = 0.287 \frac{m^2}{Vs}$$

۵. به نظر شما مشاهده اثر هال در فلزات آسان تر است یا در نیمه هادی ها؟ توضیح بدهید.

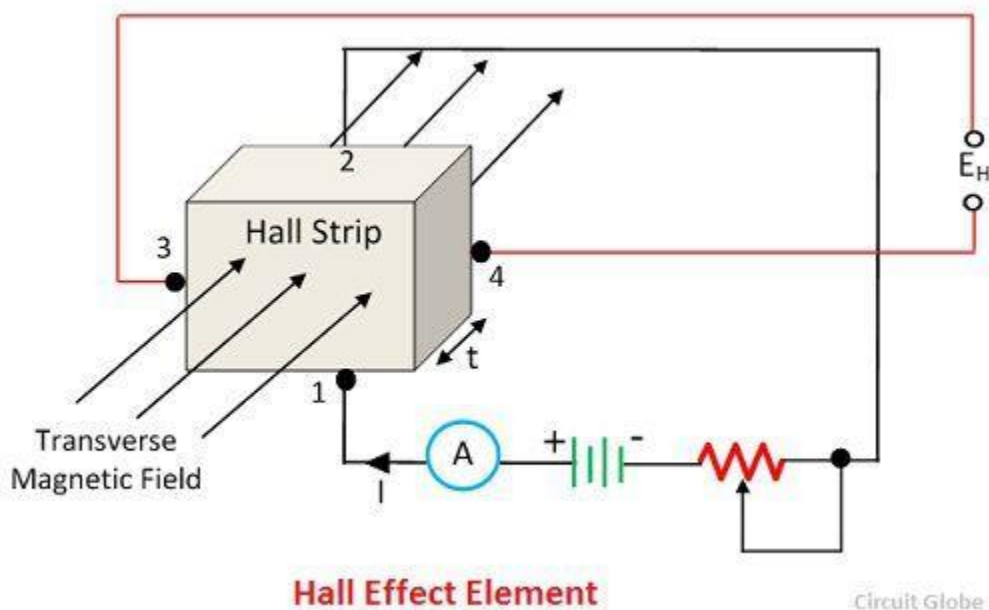
$$R_H = \frac{1}{ne}$$

توجه کنید که در سوال هفت خواهیم دید که :

و با توجه به این که در یک ماده رسانا چگالی الکترون ها زیاد است، پس ضریب هال برای رسانا ها عموماً از نیمه رسانا ها کمتر است و چون که  $R_H = V_H \frac{BI}{w}$  پس هر چه ثابت هال کمتر باشد، ولتاژ هال کمتر است و مشاهده اثر هال سخت تر است.

۶. با استفاده از این آزمایش یک دستگاه گaus متر چه ساختاری دارد؟

شالوده کار دقیقاً همانی است که در آزمایش ۵ بحث شد، یعنی یک سنسور هال را طوری کالیبره می کنند که به ازای هر ولتاژ خاصی که اندازه می گیرد، میدان مغناطیسی را از روی داده های ذخیره شده در حافظه بخواند و بر روی نمایشگر نشان دهد. یعنی با جدول ۵ عمل کالیبره کردن انجام می شود و سپس با ذخیره میدان بر حسب ولتاژ هال بر روی میکروپردازنده، طراحی و تولید آن انجام میگیرد.



شکل ۲: طرح شماتیک یک گaus متر که در حقیقت یک آزمایش اثر هال مینیاتوری است.

۷. رابطه ثابت هال بر حسب ولتاژ هال، عرض نمونه و جریان و میدان را بنویسید و آن را بدست آورید.

از رابطه نیروی لورنتز استفاده می کنیم و می دانیم وقتی که نیروی وارد بر الکترون در میدان الکتریکی برابر با نیروی وارد بر الکترون در میدان مغناطیسی شود (شکل ۱ را ببینید) در این صورت شارش بار به صفحه های  $y = d$  و  $y = 0$  صورت نمی گیرد و بدین طریق می توان نوشت که:

$$eE_H = e v_x B_z$$

اما شارش بار توزیع یکنواخت دارد و می توان پتانسیل یک نواخت را برای میدان هال تعریف کرد یعنی که  $E_H = \frac{V_H}{d}$  (توجه کنید که  $d$  مقدار طول نمونه در راستای جریان است) و همینطور می توان سمت چپ رابطه بالا را بر  $ne$  ضرب و تقسیم کرد که  $n$  چگالی تعداد الکترون هاست.

$$\frac{V_H}{d} = \frac{nev_x}{ne} B_z$$

حالا قرار دهید که  $R_H = \frac{1}{ne}$  و چون که می دانیم  $J = nev_x$  و جریان برابر است با  $I = JA$  می توانیم با جایگذاری در رابطه بالا عبارت را ساده تر کنیم (A سطح مقطع عمود بر جریان است که همان  $wd$  می شود).

$$\frac{V_H}{d} = \frac{I}{wd} R_H B_z \longrightarrow V_H = \frac{I R_H B}{w}$$

پس این رابطه را اثبات کردیم.

## ۸. منابع خطا را ذکر کرده و در صورت امکان خطای سیستماتیک را وارد محاسباتتان کنید.

پسماند یک خطای سیستماتیک است که به صورت جدی نتایج را تحت اثر قرار میدهد و کاری که می کنیم صفر کردن این پسماند است و از همان اول اثر آن را از بین می بریم.

میدانیم که میدان یک سیم لوله فقط در وسط آن به صورت یکنواخت است و اگر از مرکز آن دور شویم میدان به شکل دوکی شکل می شود، پس با این که نمونه ضخامت کمی دارید ولی اگر به خوبی در میدان تنظیم نشده باشد، ممکن است فرض میدان مغناطیسی یکنواخت در حل مساله ما دچار اشکال شود، پس بایستی نمونه را به خوبی در میدان مغناطیسی تنظیم کرد.

تنظیم و کالیبره بودن هر یک از اجزای آزمایش نیز اهمیت دارد به خصوص این که از وسایل الکتریکی زیادی مانند آمپرسنج و ولت سنج (۲تا) و آمپلی فایر هم استفاده می شود.

حتی باید توجه کرد که قطعه در میدان به شکلی قرار گرفته باشد که جهت جریان بر جهت میدان عمود باشد، در غیر این صورت موقع نوشتن نیروی لورنتز، چون در رابطه یک ضرب خارجی وجود دارد باید یک عبارت  $\sin(\theta)$  ظاهر می شود که زاویه ی تتا زاویه ی بین جهت جریان و جهت میدان است.

باید حتی الامکان از وسایل الکترونیکی و وسایل موتوری قوی دور شد و این آزمایش را انجام داد چرا که این وسایل میدان مغناطیسی نسبتاً قوی ای ایجاد می کنند و وارد کردن اثر آن ها در معادلات کمی دشوار است چرا که بایستی جهت و اندازه آن ها را دقیقاً دانست و معادله را نوشت.